

## ESTUDIO DE LA CONVECCION NATURAL EN UNA CAVIDAD TRIDIMENSIONAL CON DISTINTAS GEOMETRIAS

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

<sup>a</sup>*Departamento de Matemática. Facultad de Ciencias Exactas. UNSa, Av. Bolivia 5150 - 4400  
Tel: 0387-4255424 - fax 0387 - 4255888, [aaramayo@unsa.edu.ar](mailto:aaramayo@unsa.edu.ar)*

<sup>b</sup>*INENCO–Instituto de Energía No Convencional, Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas. Av. Bolivia 5150-4400, [s.esteban593@gmail.com](mailto:s.esteban593@gmail.com)*

**Palabras Claves:** convección natural tridimensional, geometría de la cavidad, patrones de flujo, número de Nusselt.

### Resumen:

En un trabajo previo se realizó la simulación numérica, utilizando OpenFOAM, del problema de convección natural en una cavidad tridimensional de sección transversal trapezoidal y base cuadrada, considerando distintas inclinaciones de la superficie superior. Las paredes superiores consideradas fueron: lisa, ondulada y tipo diente de sierra; y los ángulos de inclinación de: 0°, 5°, 10°, 20° y 30°.

La temperatura impuesta en la superficie inferior es mayor que la impuesta en la superior, mientras que las paredes laterales se mantienen adiabáticas. La diferencia de temperatura entre la superficie inferior y superior considerada fue de 40 °C y 90 °C.

Se ha calculado el promedio espacial y temporal del número de Nusselt, que permitió analizar la transferencia de calor en la pared superior. Los resultados mostraron que la transferencia de calor aumenta a medida que se incrementa la inclinación de pared superior, para todas las geometrías consideradas. Para valores de número de Rayleigh (Ra) considerados, a una inclinación dada, los distintos tipos de geometrías de la pared superior no influyen significativamente en la transferencia de calor.

En este trabajo se completa el estudio antes mencionado, utilizando paredes superior con mayor número de onda y distintas amplitudes; así como mayor variación de la altura del recinto, para abarcar un rango mayor de número de Ra.

Mediante el estudio de los patrones de flujo se analiza si la amplitud de onda de la pared superior influye en la formación de celdas secundarias, en las adyacencias de la misma.

Los distintos tipos de geometría de la pared superior considerados, determinan una variación del área que atraviesa el flujo de calor, por lo que se realiza un estudio una longitud característica que permita relacionar el valor de Nu con Ra, basado en dicha longitud.

## 1 INTRODUCCIÓN

La convección natural en recintos tridimensionales ha sido estudiada en forma experimental y numérica por diversos autores, para investigar el acondicionamiento térmico en habitaciones, dispositivos electrónicos, invernaderos, entre otros ejemplos. Debido a que la ecuaciones de velocidad y temperatura están acoplados a través del término de flotación, el análisis de la convección natural en cavidades es muy complejo.

Distintos trabajos, mencionados en Esteban, et. al. (2012), han estudiado el efecto en la transferencia de calor, debido a una variación sinusoidal en la temperatura impuesta en una de las paredes. Los resultados concuerdan en cuanto al incremento del número de Nusselt con la amplitud sinusoidal. No sucede lo mismo cuando se aumenta el número de ondulaciones por encima de dos. En todos los casos las geometrías consideradas corresponden a recintos porosos bi-dimensionales de sección rectangular.

El efecto de una pared ondulada en la convección natural, en el interior de una cavidad inclinada, diferencialmente calentada ha sido estudiado por Adjlout, et. al. (2002). El trabajo considera que la pared ondulada, en la que se impone la mayor temperatura, puede tener una o tres ondulaciones. Para distintos ángulos de inclinación considerados, sus resultados muestran que la ondulación de la pared afecta el flujo y la transferencia de calor en la cavidad. El número de Nusselt decrece cuando se compara con la cavidad cuadrada y un incremento en el número de ondulaciones disminuye la transferencia de calor para una inclinación mayor a 75°.

Dalal A. y Kumar Das M., (2005) estudian la convección natural en un recinto bidimensional con una pared vertical ondulada. La pared superior presenta una variación sinusoidal para la temperatura; mientras que las paredes restantes, incluida la ondulada, se mantiene a una temperatura constante fría. Consideran diferentes ángulos de inclinación, amplitudes y números de Rayleigh. La pared ondulada presenta una, dos y tres ondulaciones. Los resultados muestran que un aumento de la amplitud de las ondulaciones, produce un incremento del número de Nusselt promedio en la pared ondulada, a bajos valores de Rayleigh. El incremento del número de ondulaciones por arriba de dos, no es beneficioso.

Aunque la definición del número de Nusselt, en convección natural, basada en la distancia de las paredes activas, es utilizada en cavidades bidimensionales formadas por dos paredes verticales activas y las restantes aisladas, el trabajo de Bairi (2008) propone una modificación a la misma cuando se trate de cavidades con área paralelogramicas. Este número de Nusselt adaptado mantiene su sentido físico y tiene en cuenta la geometría de la cavidad considerada.

El objetivo del presente trabajo es continuar con el análisis desarrollado en Esteban, et. al. (2012) en el que se ha simulado la convección natural Rayleigh-Bénard transitoria en distintos tipos de cavidades tridimensionales, variando la inclinación y la geometría de la pared superior. En aquel trabajo, se consideraron paredes superiores lisas, onduladas y tipo diente de sierra; los ángulos de inclinación de: 0°, 5°, 10°, 20° y 30°; y dos y cuatro ondulaciones. Se obtuvo que la transferencia de calor aumenta con el incremento de la inclinación de pared superior, para todas las geometrías consideradas, hasta 30°.

En el presente trabajo, se ha modificado el área de la pared superior considerando hasta cinco de número de onda, con distintas amplitudes, para las dos geometrías mencionadas anteriormente (tipo sierra y ondulada).

## 2 ECUACIONES Y DOMINIO DE CALCULO

El dominio de cálculo utilizado en las simulaciones se muestra en la figura 1, consiste en un recinto con base cuadrada y sección transversal trapezoidal. La pared superior se eleva  $\gamma$

grados y se modifica la geometría considerando tres tipos de superficies: lisa, ondulada y tipo sierra.

La dimensión de la cavidad estudiada es: pared inferior (base) de 0.30m x 0.30m, altura mínima de 0.1m y una altura máxima que depende del ángulo de inclinación de la pared superior (techo). Para 5° la altura máxima es de 0.126m, mientras que para 30° se incrementa a 0.293m.

A fin de unificar la nomenclatura utilizada para los dos tipos de geometrías (ondulada y tipo sierra) se denomina número de onda (N) a la cantidad de períodos contenidos en la longitud W del recinto; y amplitud de las ondulaciones (A) a la diferencia entre la altura máxima y mínima del techo considerado.

En las simulaciones realizadas, la amplitud de las ondulaciones varían entre de 0.008m a 0.04m; en tanto que el número de onda entre 1 y 5.

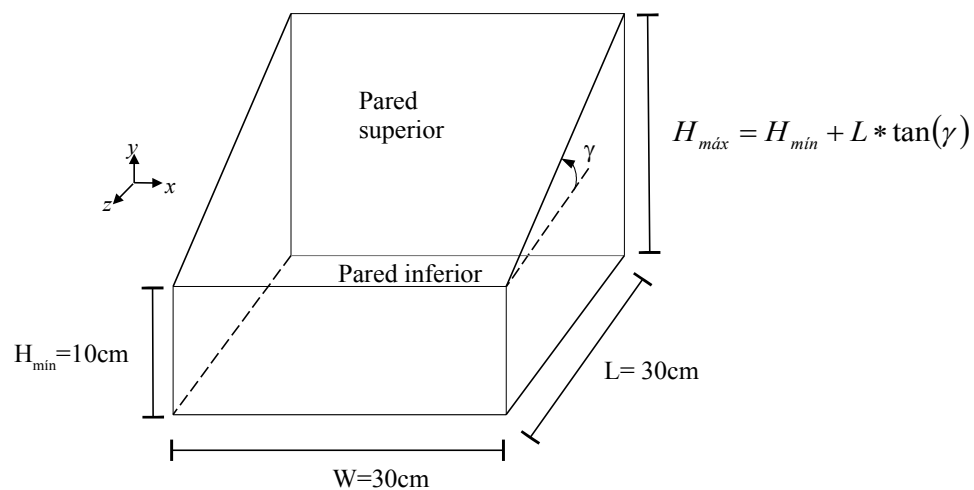


Figura 1. Dimensiones de la cavidad.

En la figura 2 se muestra, a modo de ejemplo, dos recintos con los tipos de geometrías estudiadas. El gráfico 2-a corresponde a un techo ondulado con N=2 y A=0.04m; en tanto que el gráfico 2-b a un techo tipo sierra con N=4 y A=0.04m.

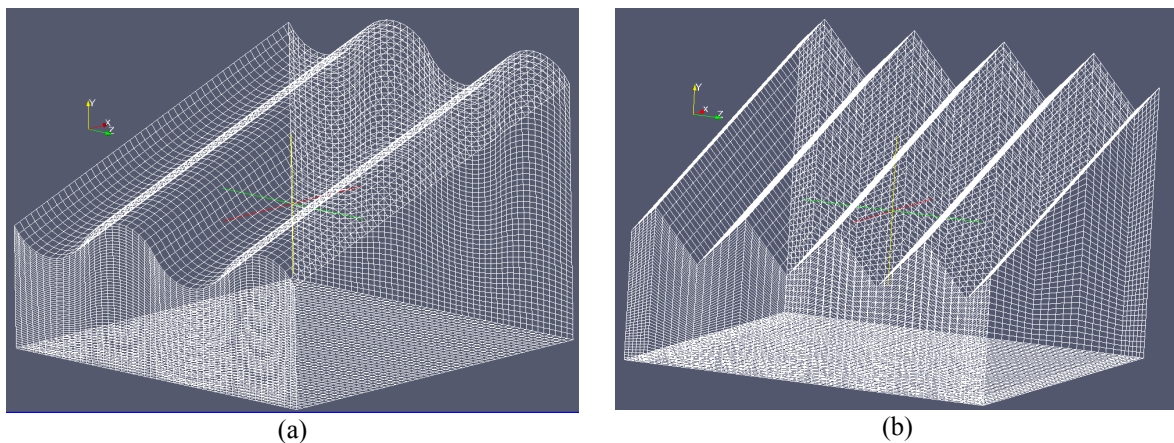


Figura 2. Geometrías estudiadas.

La convección natural transitoria en recintos está gobernada por las siguientes ecuaciones:

De continuidad:  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$  (1)

De momento:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla \cdot (\nabla \mathbf{u}) - \beta_T \mathbf{g}(T - T_{ref})$$
 (2)

De energía:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \alpha \nabla \cdot (\nabla T)$$
 (3)

donde  $\mathbf{u}$ , es el campo de velocidad,  $T$  de temperatura,  $P$  de presión,  $\mathbf{g}$  es la aceleración de la gravedad,  $T_{ref}$  la temperatura de referencia,  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido,  $\rho$  es la densidad,  $\beta_T$  el coeficiente de expansión volumétrico y  $\alpha$  la difusividad térmica del fluido, evaluados a la temperatura de referencia,  $T_0 = 293^\circ K$ .

Se han considerado las siguientes condiciones de borde e iniciales:

- paredes verticales:  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ , siendo  $n$  la dirección normal a cada superficie.
- pared inferior:  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ ,  $T = T_C = 363^\circ K$ , pared superior:  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ ,  $T = T_F = 273^\circ K$ ,
- inicialmente todo el recinto se encuentra estanco y a la temperatura de referencia.

La transferencia de calor en la pared superior, a un determinado tiempo, se ha determinado mediante el número de Nusselt promedio espacial, calculado de la siguiente manera:

$$\overline{Nu} = \frac{H_{max}}{S \cdot \Delta T} \iint_A \frac{\partial T}{\partial n} ds$$
 (4)

donde  $H_{max}$  es la altura máxima del recinto,  $S$  área del techo,  $\Delta T$  salto de temperatura impuesto entre la base y el techo,  $\vec{n}$  normal a la superficie considerada,  $ds$  diferencial de superficie.

En la tabla 1 se muestran los valores de número de Rayleigh calculados según la ecuación 5, para un salto de temperatura de  $90^\circ$ , propiedades evaluadas a la temperatura de referencia ( $T_0 = 293^\circ K$ ) y tomando como longitud característica la altura máxima de la cavidad ( $H_{max}$ ). De los valores obtenidos se puede inferir que el tipo de régimen del flujo es laminar para el caso horizontal, y para mayores inclinaciones se encuentra en la transición a la turbulencia.

$$Ra = \frac{g\beta}{\alpha\nu} H_{max}^3 \Delta T$$
 (5)

Grado	Ra
0	8,80E+06
5	1,77E+07
10	3,15E+07
20	8,06E+07
30	1,79E+08

Tabla 1. Números de Rayleigh considerados.

Debemos señalar que tanto el cálculo de  $Nu$  (ec. 4) como  $Ra$  (ec. 5) se ha basado en la

longitud  $H_{max}$ , la cual sólo tiene en cuenta la inclinación de la pared superior y no la geometría de dicha pared (ondulado o sierra) ni la tridimensionalidad del recinto, efectos que se pretenden estudiar en el presente trabajo. Al igual que propone Bairi (2008) es necesario modificar las expresiones de  $Nu$  y  $Ra$ , utilizando una longitud característica que tenga en cuenta los aspectos geométricos del recinto.

A fin de comparar los distintos resultados de los patrones de flujo se han analizado los mapas de temperatura sobre los siguientes planos:

- $z=\text{constante}$ , correspondiente a los valores en los que el techo tiene mayor altura ( $z_{max}$ ) y menor altura ( $z_{min}$ ).
- $x=\text{constante}$ , correspondiente a  $x=0$ ,  $x=0.015m$ ;  $x=0.03m$ .
- $y=\text{constante}$ , correspondiente a  $y=0$ ;  $y=H_{min}$ .

En la figura 3-a muestra el dominio discretizado, la 3-b los planos  $z=\text{constante}$ , la 3-c  $x=\text{constante}$  y la 3-d  $y=\text{constante}$ , para un recinto con techo ondulado:  $N=2$ ,  $A=0.04m$  y  $\gamma=20^\circ$

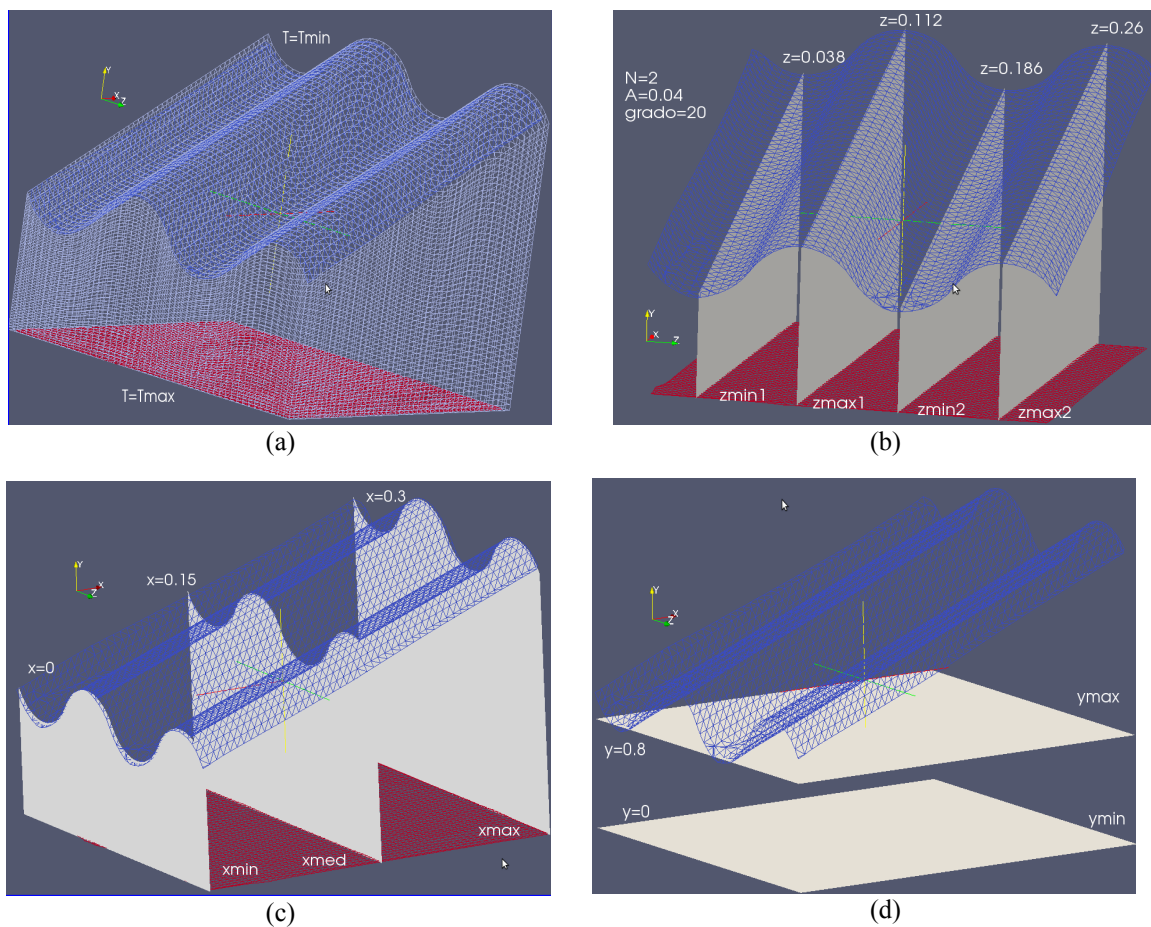


Figura 3. Planos transversales utilizados.

### 3 PATRONES DE FLUJO

En esta sección se presentan algunos resultados obtenidos, que permitirán describir los patrones de flujo para casos significativos, para la última iteración temporal ( $t=1000s$ ).

#### 3.1 Isosuperficies de temperatura

Debido al movimiento convectivo desarrollado en el interior de la cavidad, se forman jets

de temperatura caliente que impactan en el techo y jets de temperatura fría que impactan en la base. Para mejor visualización de los mismos se han graficado las isosuperficies de temperatura correspondientes a  $T=303^{\circ}\text{K}$  y  $T=318^{\circ}\text{K}$ , orientando los ejes de manera conveniente.

En las figuras 4 y 5 se han graficado isosuperficies para cavidades con techo tipo sierra, con  $\gamma=20^{\circ}$ , para  $N=1$  y  $A=0.04\text{m}$  y para  $N=4$  y  $A=0.02\text{m}$ , respectivamente. En ambos casos, el jet de temperatura fría ( $T=303^{\circ}\text{K}$ ) desciende por la zona de menor altura, en tanto que el jet de temperatura caliente ( $T=318^{\circ}\text{K}$ ) asciende por la zona de mayor altura. Con el aumento del número de onda, aparecen más jets ascendentes y descendentes.

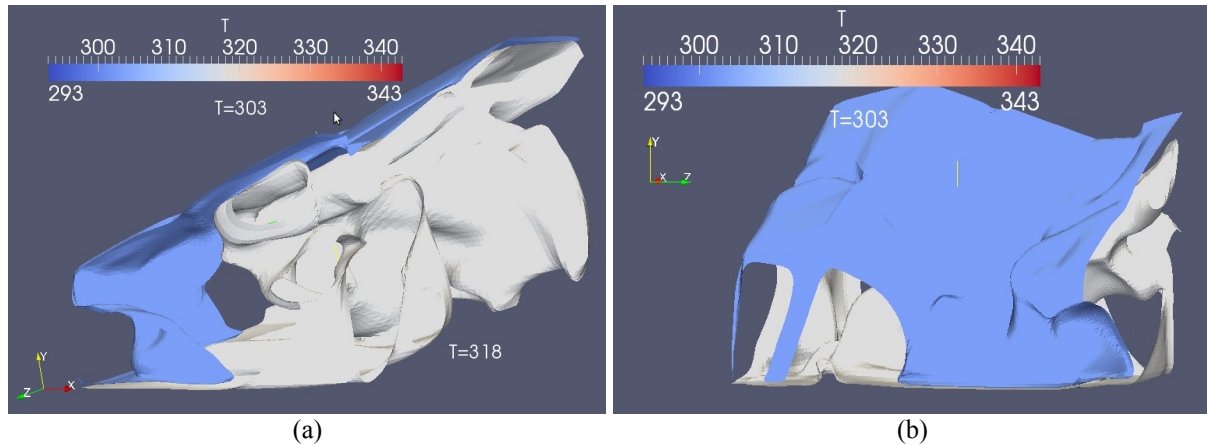


Figura 4 . Isosuperficie de temperatura para una cavidad con techo tipo sierra,  $N=1$ ,  $A=0.04\text{m}$ ,  $\gamma=20^{\circ}$

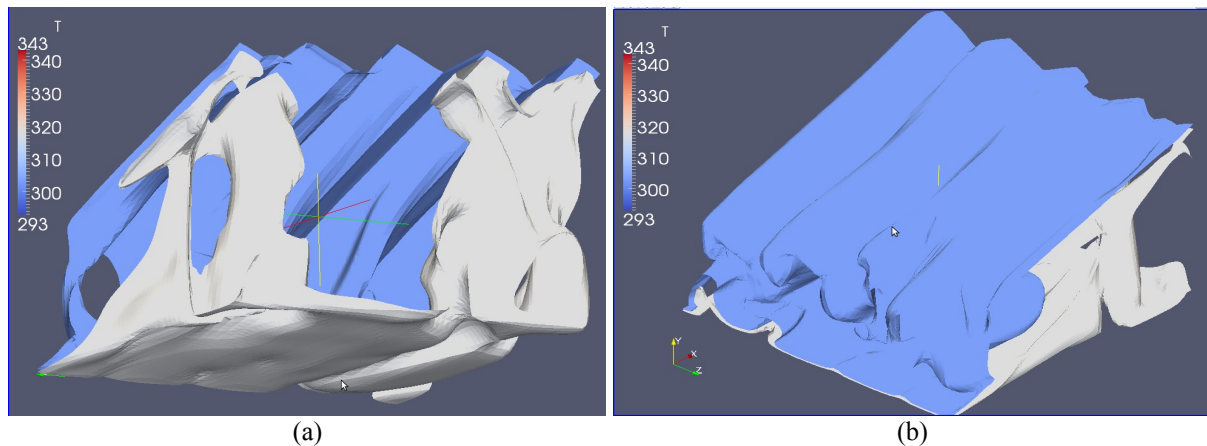


Figura 5 . Isosuperficie de temperatura para una cavidad con techo tipo sierra,  $N=4$ ,  $A=0.02\text{m}$ ,  $\gamma=20^{\circ}$

### 3.2 Distribución de temperatura en planos transversales

En esta subsección se presenta las distribuciones de temperatura en planos:  $x=0\text{m}$ ,  $0.15\text{m}$ ,  $0.3\text{m}$ ;  $y=\text{constante}$ ,  $z=\text{constante}$ , según lo detallado en la figura 3. Se ha utilizado la misma escala de temperatura para todas las figuras mostradas, el color rojo corresponde a los puntos de mayor temperatura ( $T=343^{\circ}\text{K}$ ) en tanto que el azul a los de menor temperatura ( $T=293^{\circ}\text{K}$ ).

En la figura 6 se muestra los resultados correspondientes a una cavidad con techo tipo sierra,  $A=0.04\text{m}$ ,  $\gamma=20^{\circ}$  y  $N=1$ . El gráfico 6-a corresponde a planos  $x=\text{cte}$  y el gráfico 6-b a planos  $z=\text{cte}$ .

Se puede observar el efecto del jet ascendente y descendente en la distribución de

temperatura en las zonas de mayor y menor altura, respectivamente (Figura 6-a,  $x=0.3\text{m}$  y  $x=0.005\text{m}$ ). Esto queda en evidencia por el color rojo que presenta el mapa de isotermas en todo el plano a  $x=0.3\text{m}$ .

Los patrones de temperatura de la figura 6-b, muestran el enfriamiento provocado por los jets descendentes en el plano  $y=0.005\text{m}$ ; en la zona de menor altura de la cavidad identificada con el color azul. En el plano  $y=0.08\text{m}$  (cercano a  $H_{\min}$ ) la temperatura toma valores próximos a la temperatura media ( $T=318^\circ\text{K}$ ).

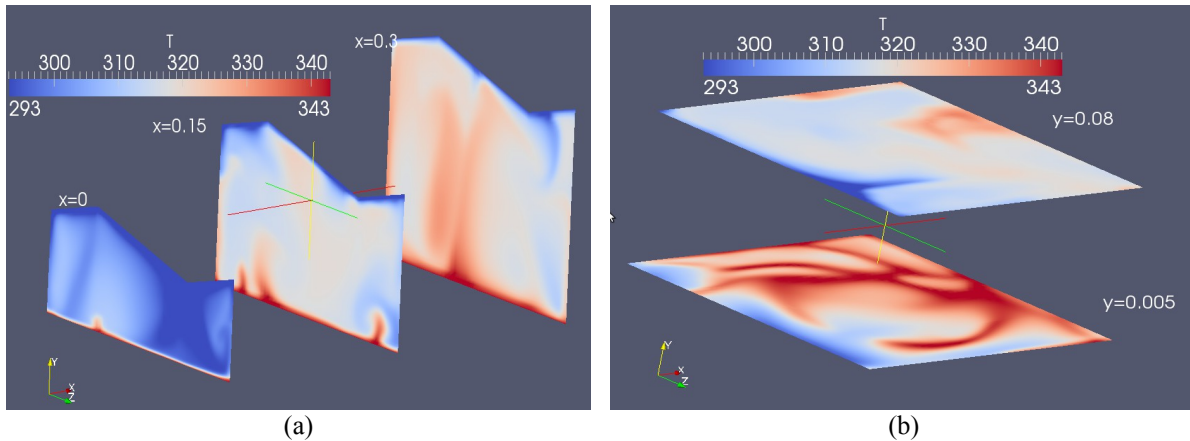


Figura 6 . Distribución de temperatura para una cavidad con techo tipo sierra,  $N=1$ ,  $A=0.04\text{m}$ ,  $\gamma=20^\circ$

En las figuras 7, se presentan la distribución de temperatura para una cavidad con techo ondulado con  $A=0.02\text{m}$ ,  $\gamma=30^\circ$  y  $N=4$ . El gráfico 7-a corresponde a planos  $x=\text{cte}$ , en tanto que los gráficos 7-b, a  $y=\text{cte}$ .

En el patrón desarrollado en el plano  $x=0.3\text{m}$  (figura 7-a) se puede observar una débil influencia del jet ascendente en la distribución de temperatura. En el plano  $x=0.15\text{m}$  (figura 7-a), se observa que las plumas ascendentes se producen en las posiciones donde el techo ondulado presenta mayor altura. En el plano  $y=0.01\text{m}$  (7-b), el efecto del jet descendente produce el enfriamiento de prácticamente toda la pared inferior, efecto que se evidencia por el color azul que presenta este mapa de isotermas.

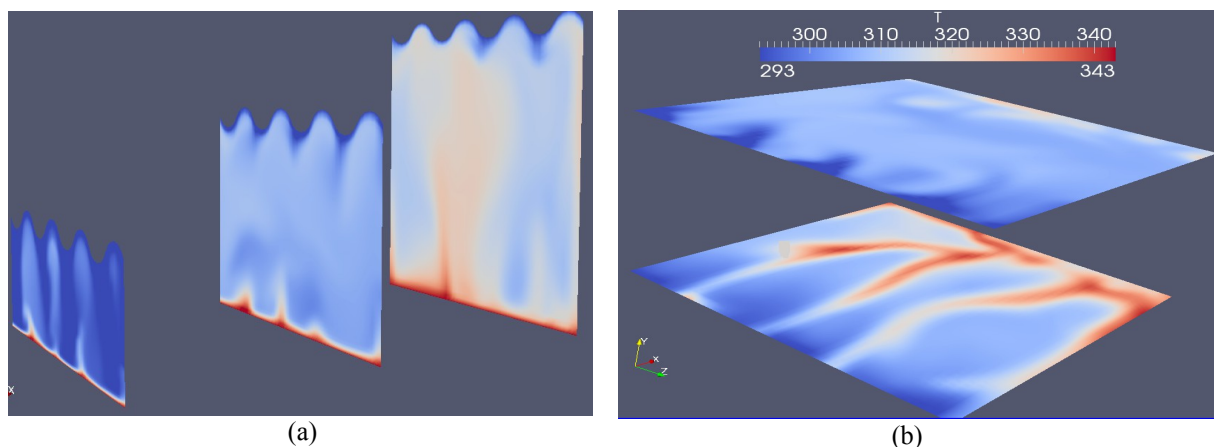


Figura 7 . Distribución de temperatura para una cavidad con techo ondulado,  $N=4$ ,  $A=0.02\text{m}$ ,  $\gamma=30^\circ$

En las figuras 8, 9, y 10, se muestran la distribución de temperatura en distintos planos para una cavidad con techo tipo sierra,  $\gamma=20^\circ$  y  $N=4$ . Las figuras 8 y 9 corresponden a sierras

con  $A=0.02\text{m}$ , mientras que la figura 10 con  $A=0.04\text{m}$ .

Las figuras 8-a y 10-a corresponden a planos verticales ubicados en  $x=0\text{m}$ ,  $0.15\text{m}$ ,  $0.30\text{m}$ ; las figuras 8-b y 10-b a planos horizontales en  $y=0.005\text{m}$ ,  $0.09\text{m}$ ; en tanto que en la figura 9, los correspondientes a  $z=\text{constante}$ . La gráfica 9-a corresponde a planos ubicados en  $z_{\text{max}}$ , mientras que la gráfica 9-b, a planos ubicados en  $z_{\text{min}}$ .

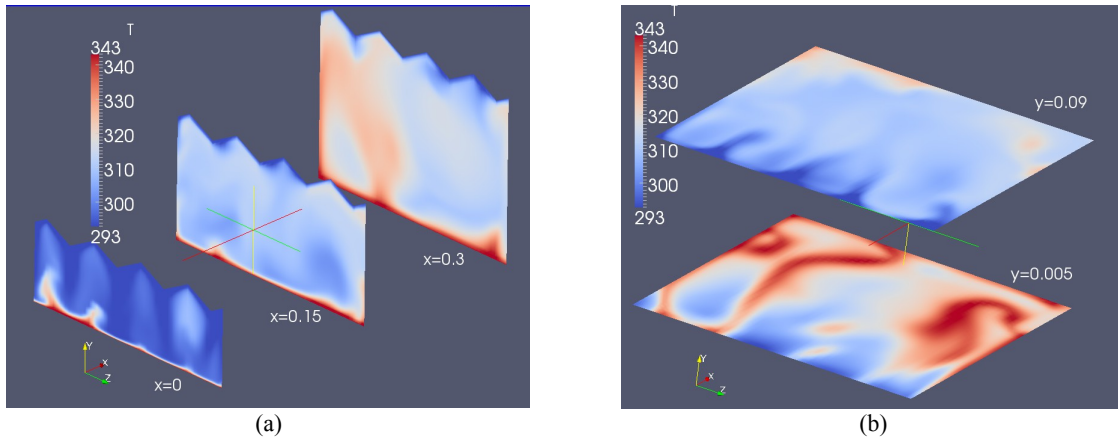


Figura 8 . Distribución de temperatura para una cavidad con techo tipo sierra,  $N=4$ ,  $A=0.02\text{m}$ ,  $\gamma=20^\circ$

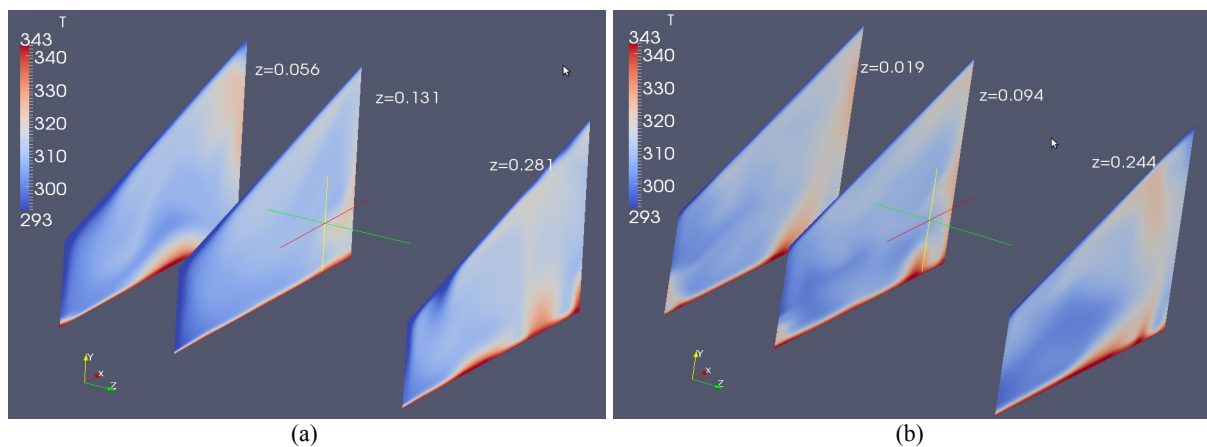


Figura 9 . Distribución de temperatura para una cavidad con techo tipo sierra,  $N=4$ ,  $A=0.02\text{m}$ ,  $\gamma=20^\circ$

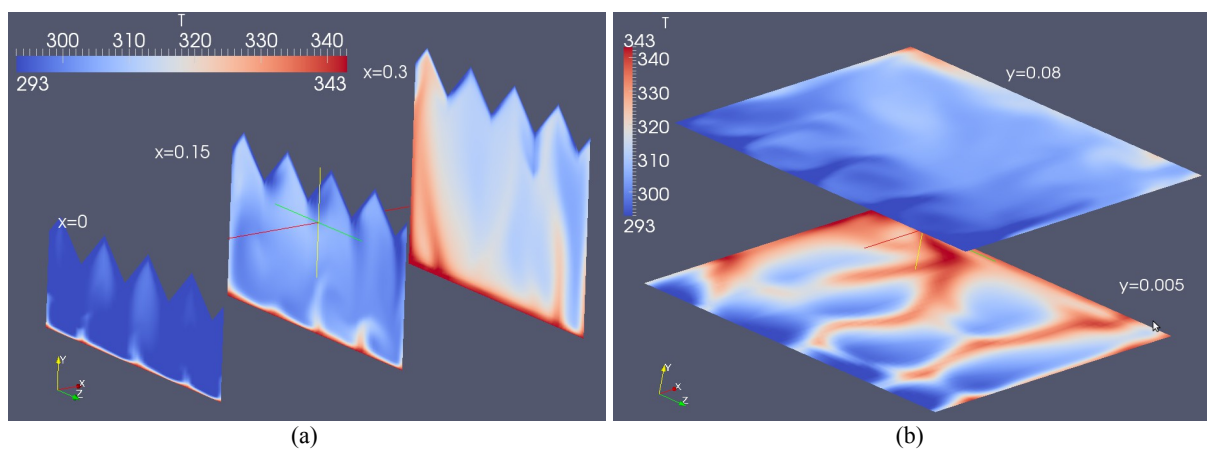


Figura 10 . Distribución de temperatura para una cavidad con techo tipo sierra,  $N=4$ ,  $A=0.04\text{m}$ ,  $\gamma=20^\circ$

El comportamiento observado en los patrones de las figuras 8-a y 10-a, es similar al



descripto para la figura 6-a, esto es, los jets que transporta el aire caliente lo hacen por la zona de mayor altura en tanto que los que transportan el aire frío por las zonas de menor altura.

Comparando los patrones mostrados en las figuras 8-b y 10-b se puede observar, en un recinto con techo de mayor amplitud (fig. 10-b), la formación de jets descendentes que enfrían la base ampliamente; en cambio, a menor amplitud (fig. 8-b) este efecto se ve disminuido dando lugar a la formación de menos jets descendentes de menor intensidad.

Observando los patrones de temperatura de las figuras 9-a y 9-b, para los planos  $z=cte$ , se concluye que las distintas alturas determinadas por la geometría del techo no influyen significativamente en la distribución de temperatura.

### 3.3 Movimiento en el interior de la cavidad

A fin de estudiar el movimiento convectivo que se produce en el interior de la cavidad, se ha graficado líneas de corriente, a las que se ha agregado una flecha para indicar el sentido del movimiento. Estas gráficas se muestran en la figura 11, los distintos colores indican los valores de la magnitud del vector velocidad, es todos los casos se ha utilizado la misma escala para esta magnitud.

La figura 11-a, 11-b, 11-c y 11-d, corresponden a una cavidad con techo tipo sierra  $\gamma=30^\circ$ ,  $A=0.04m$  y  $N= 2, 3, 4$  y  $5$ , respectivamente.

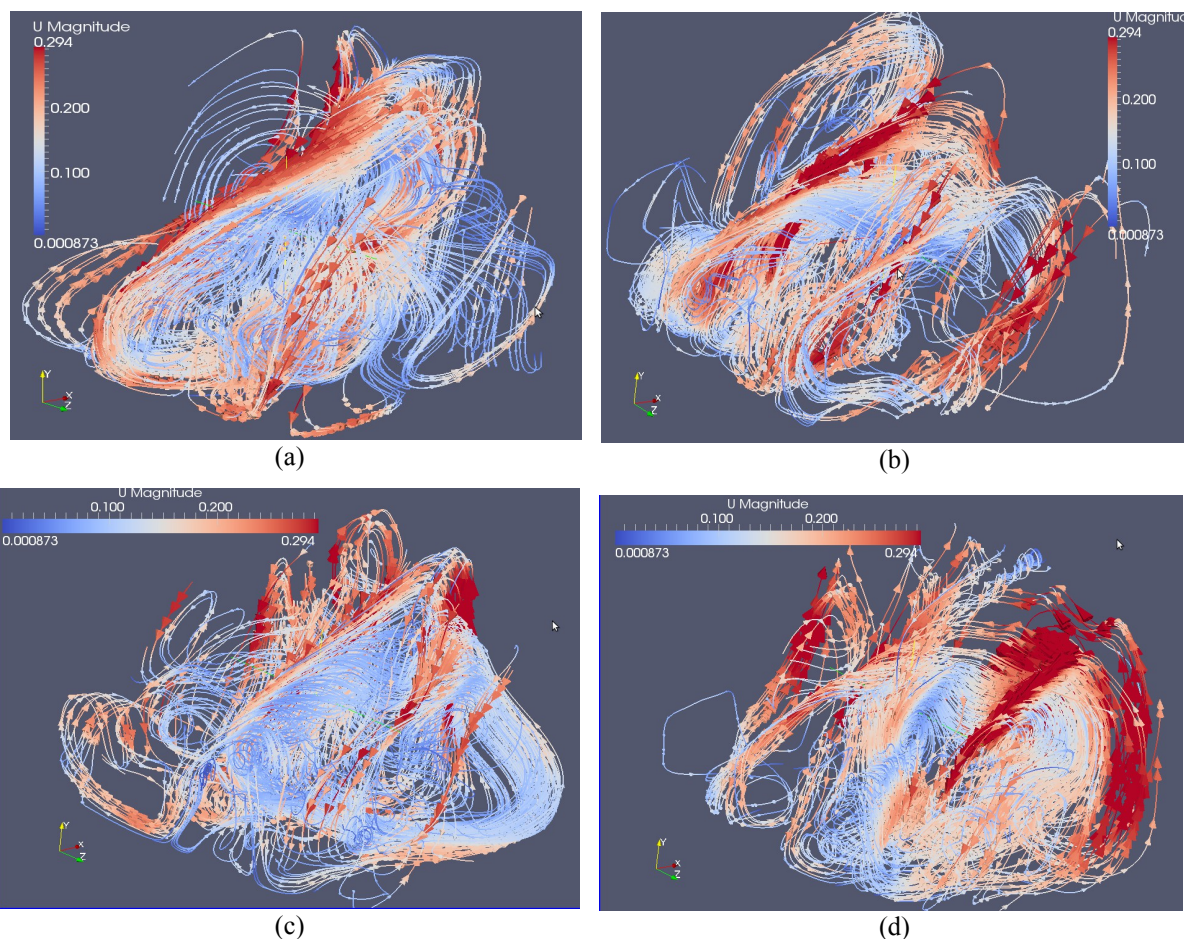


Figura 11 . Líneas de corriente para una cavidad con techo tipo sierra,  $A=0.04m$ ,  $\gamma=20^\circ$

En general, se observa que el movimiento en el interior de la cavidad no presenta un patrón

definido. No obstante, el ascenso del aire caliente se produce por las zonas de mayor altura ( $H_{max}$ ), en tanto que el descenso del aire frío se realiza mayoritariamente por las zonas de menor altura ( $H_{min}$ ).

La geometría de la cavidad condiciona el movimiento del flujo, orientándolo de acuerdo a la zonas de mayor o menor altura, por lo que a medida que aumenta el número de onda, el flujo se vuelve más complejo.

#### 4 TRANSFERENCIA DE CALOR

La figura 12 muestra la evolución temporal de  $Nu$ , su comportamiento con el número de onda  $y$ , en cada caso, con la amplitud; para dos tipos de techos: ondulado y tipo sierra, con una inclinación de  $\gamma=30^\circ$ . La columna izquierda corresponde al caso ondulado y la derecha a tipo sierra. Los resultados obtenidos (no incluidos en este trabajo) muestran que para ambos techos hasta  $N=3$ ,  $Nu$  es independiente de la amplitud de la onda considerada.

Para techo tipo sierra con  $A=0.04m$ ,  $Nu$  es menor que el correspondiente a  $A=0.02m$ , esta diferencia es más notoria a medida que aumenta el número de ondas, como se puede observar en la figura 12-d, correspondiente a  $N=5$ , en el que se presenta mayor dependencia de  $Nu$  con  $A$ .

Por otro lado para el caso ondulado  $Nu$  no cambia con la amplitud ni con el número de onda hasta  $N=4$ . Para  $N=5$  comienza a notarse una pequeña disminución de  $Nu$  con el aumento  $A$ .

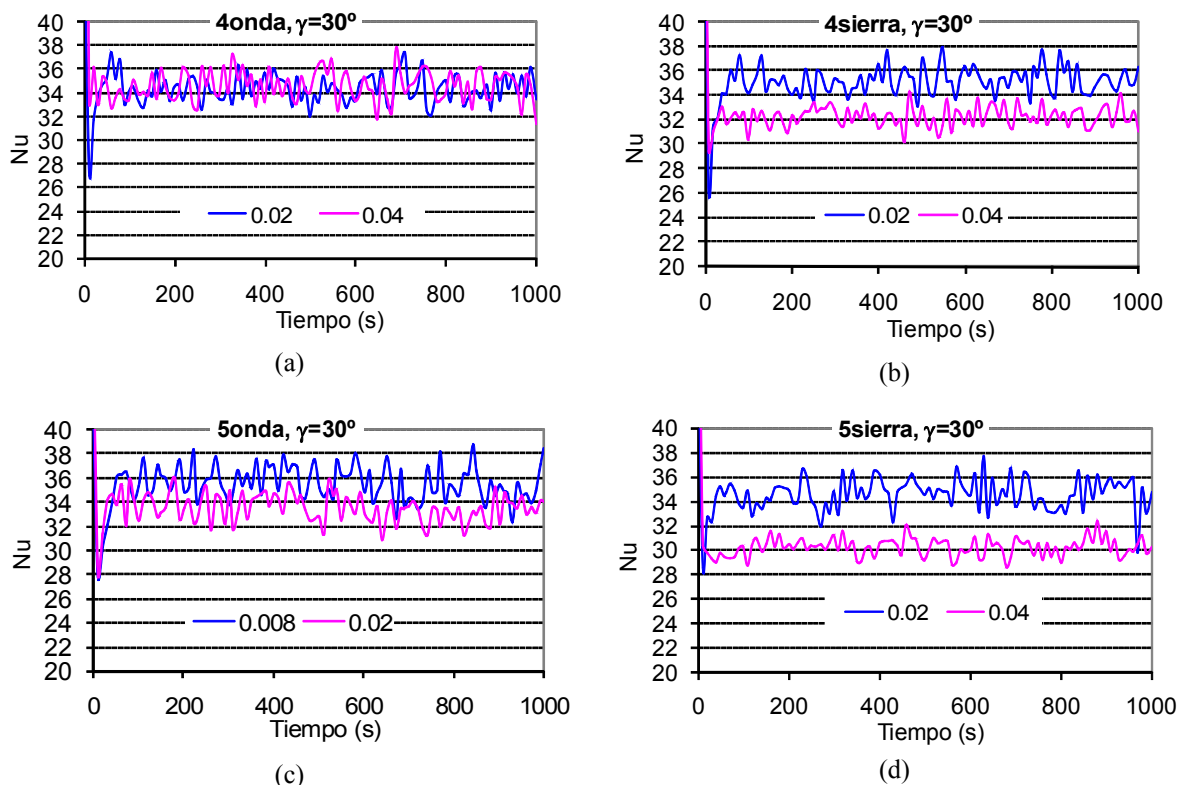


Figura 12 . Evolución temporal del número de Nusselt.

La figura 13 muestra la evolución temporal de  $Nu$  para todos los casos simulados a  $\gamma=30^\circ$ . Las figuras 13-a y 13-b corresponden a un techo tipo sierra para  $A=0.02m$  y  $0.04m$ , respectivamente. En tanto que las figuras 13-c y 13-d corresponden a un techo ondulado para

las amplitudes antes mencionadas.

En el caso sierra, se observa la independencia de Nu con la cantidad de ondas para  $A=0.02m$ , figura 13-a. Este último comportamiento se observa también para el caso ondulado, para ambas amplitudes, figura 13-c y 13-d. En cambio, para techo tipo sierra con  $A=0.04m$  (figura 13-b) Nu disminuye con el incremento de N y esta disminución es más notoria a partir de  $N=3$ .

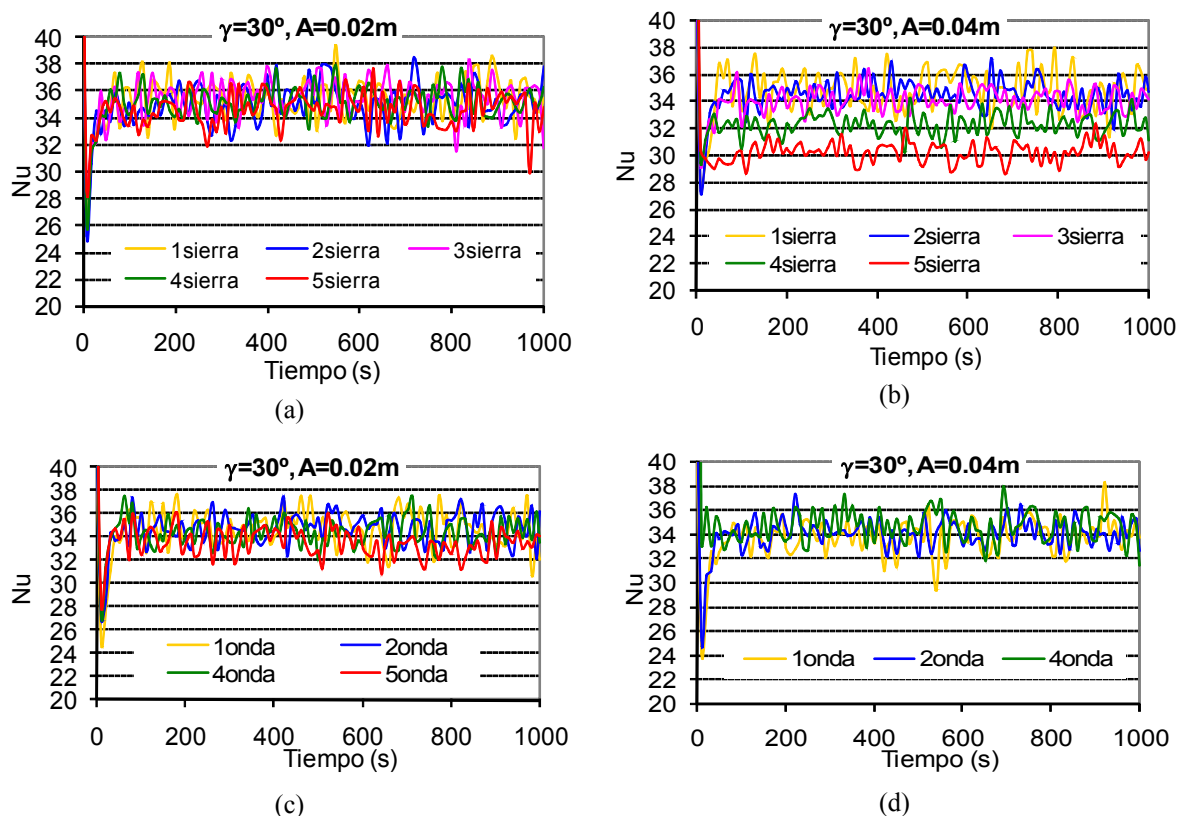


Figura 13. Evolución temporal del número de Nusselt.

En los gráficos anteriores, correspondientes a la evolución temporal de Nu, se observa que estos valores oscilan, durante toda la simulación, alrededor de un valor; por lo tanto para el análisis de la transferencia de calor se ha calculado el promedio temporal. La tabla 2 muestra estos valores de Nu, para todos los casos estudiados.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se advierte un aumento del Nu con la inclinación para cualquier tipo de geometría; en cambio, no se puede generalizar su comportamiento con la variación de N y A

Para techo ondulado con  $N=2, 3, 4, 5$  y  $\gamma$  hasta  $20^\circ$  Nu promedio, es superior respecto del caso liso, esta diferencia llega al 28% para  $N=4, A=0.04m$  y  $\gamma=5^\circ$ . En todos estos casos, Nu aumenta con la amplitud.

Un comportamiento distinto se presenta a  $\gamma=30^\circ$ . En estos casos la transferencia de calor para techos ondulados es menor que el obtenido para uno liso, la mayor disminución corresponde a  $N=5$  y  $A=0.02m$ , alcanzando un 5% de disminución.

De igual manera que techo ondulado para tipo sierra, los valores de Nu aumenta con la amplitud hasta  $\gamma=20^\circ$  y  $N=3$ , para  $N=3, A=0.04m$  y  $\gamma=5^\circ$  alcanza un 18% de incremento. En cambio, para  $\gamma>20^\circ$  y  $N>3$  los valores de Nu correspondientes a  $A=0.04m$  son menores que para  $0.02m$ .

Un comportamiento similar al caso ondulado se presenta a  $\gamma = 30^\circ$ , obteniéndose la mayor disminución a  $N=5$  y  $A=0.04m$ , alcanzando un 14% de disminución, respecto al valor obtenido para techo liso.

		Amplitud	$\gamma=0$	$\gamma=5$	$\gamma=10$	$\gamma=20$	$\gamma=30$	
<b>Liso</b>			13,25	16,09	19,59	27,54	35,75	
<b>Ondas</b>	<b>N=1</b>	0,02	13,59	16,24	19,58	27,16	34,97	
		0,04	13,79	16,59	19,62	27,01	34,07	
		0,08	15,28				36,80	
	<b>N=2</b>	0,02	14,14	17,24	20,79	27,95	35,10	
		0,04	14,26	18,37	21,25	28,19	34,45	
	<b>N=3</b>	0,014	14,22	17,59	21,23	28,47	35,50	
		0,026	14,67	18,68	21,74	28,79	35,14	
	<b>N=4</b>	0,01	14,22	17,51	21,06	28,64	35,84	
		0,02	14,61	18,32	21,54	28,57	34,80	
		0,04	16,63	20,56	24,49	30,94	35,49	
	<b>N=5</b>	0,008	14,31	17,67	21,04	28,62	35,92	
		0,016	14,66	18,04	21,51	28,44	35,00	
		0,02	14,60	18,14	21,44	28,27	33,98	
	<b>Diente sierra</b>	<b>N=1</b>	0,02	13,94	16,68		28,07	35,71
			0,04	14,25				35,21
<b>N=2</b>		0,02	14,07	17,38	20,82	28,05	35,36	
		0,04	14,82	18,57	21,73	28,57	34,94	
<b>N=3</b>		0,02	14,59	18,10	21,50	28,88	35,82	
		0,04	14,81	18,93	22,40	28,60	34,52	
<b>N=4</b>		0,02	14,74	16,17	21,80	28,83	35,53	
		0,04	14,51	18,24	21,58	27,40	32,78	
<b>N=5</b>		0,02	14,75	18,06	21,54	28,55	34,98	
		0,04	14,04	17,33	20,77	26,10	30,80	

Tabla 2 . Número de Nusselt promedio.

Teniendo en cuenta que el área del techo aumenta con la inclinación y el número de onda, para analizar la dependencia de  $Nu$  con la geometría del techo y la amplitud de onda, se han graficado en la figura 14,  $Nu$  promedio (espacial y temporal) en función del área, para cada inclinación y para todos los números de onda considerados. La columna izquierda de la figura 14 corresponde al techo ondulado mientras que la derecha a tipo sierra.

Las figuras 14-a y 14-b, correspondientes a  $A=0.02m$  con ambos techos, muestran que la transferencia de calor aumenta con la inclinación y es prácticamente independiente del área del techo. Lo anterior indica que para aumentar la transferencia de calor no es necesario modificar la geometría del techo, pues con un techo liso se obtiene prácticamente la misma transferencia que el obtenido para las otras dos geometrías.

La figura 14-c corresponde al caso de techo ondulado,  $A=0.04m$ . Para un ángulo dado existe un incremento de  $Nu$  con el área, hasta  $\gamma=10^\circ$ . Por otro lado, para  $\gamma=20^\circ$  y  $30^\circ$  se observa un cambio de pendiente en el comportamiento de  $Nu$ ; tomando como referencia el

valor obtenido para un techo liso  $Nu$  disminuye para  $N=1$  y luego incrementa hasta  $N=5$ .

El comportamiento obtenido para un techo tipo sierra con  $A=0.04m$ , se muestra en la figura 14-d. A diferencia del caso ondulado, para un determinado  $\gamma$ ,  $Nu$  aumenta con el área hasta un determinado valor; superado este valor un aumento del área produce una disminución de  $Nu$ .

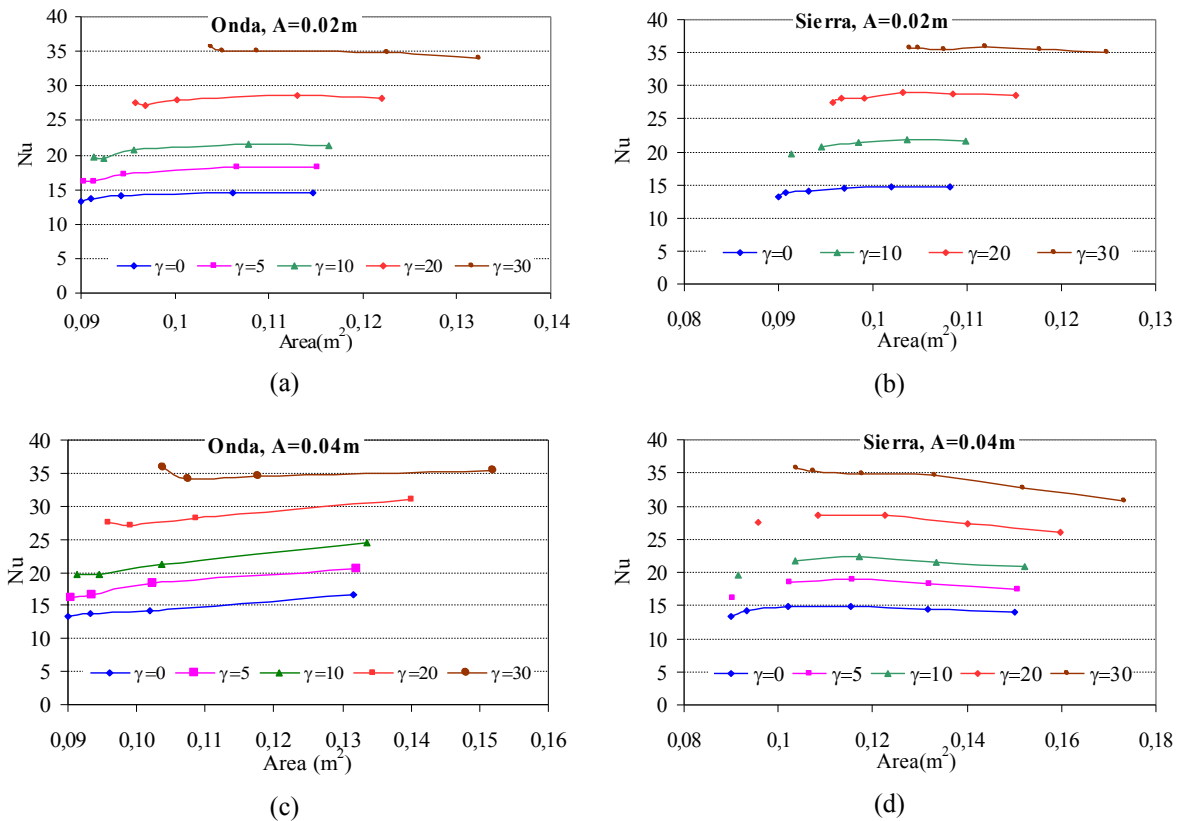


Figura 14 . Dependencia de  $Nu$  con la geometría de techo.

## 5 CONCLUSIONES

Se ha simulado la convección natural Rayleigh-Bénard transitoria en distintos tipos de cavidades tridimensionales, se ha variado la inclinación y la geometría de la pared superior; se ha considerado paredes superiores lisas, onduladas y tipo diente de sierra; los ángulos de inclinación de:  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ ; con una a cinco ondulaciones y distintas amplitudes de onda.

Del análisis de las líneas de corriente, las isosuperficies y los mapas de temperatura, se puede inferir que la geometría del techo determina tanto el movimiento como las características térmicas dentro de la cavidad.

Los resultados obtenidos indican que la transferencia de calor aumenta con el incremento de la inclinación de pared superior, para todas las geometrías consideradas.

Para techo ondulado, la transferencia de calor promedio es superior respecto del caso liso, aumento que alcanza el 28%; en tanto que para el caso tipo sierra el 18%. Un comportamiento diferente se tiene a  $\gamma=30^\circ$ , en que se observa una disminución de la transferencia de calor promedio, para el caso ondulado del 5% y en el tipo sierra del 14%.

Para el caso de un techo tipo sierra, a una inclinación dada y amplitud de onda  $0.04m$ , la transferencia de calor aumenta con el número de onda hasta un determinado valor, superado este valor un aumento del mismo produce una disminución de la transferencia de calor.

De los resultados obtenido, si se pretende aumentar la transferencia de calor es necesario modificar la geometría del techo respecto de un techo liso; por el contrario si se quiere disminuir la transferencia de calor deberá inclinarse el techo (onda o sierra) a 30°.

Los valores de transferencia de calor, para todos los casos simulados, se obtuvieron a través de la expresión clásica de número de Nusselt, la cual no tiene en cuenta la tridimensionalidad de la cavidad ni la geometría del techo. Por ello, es necesario continuar con un análisis que permita incorporar estos aspectos a la definición del número de Nusselt, de modo similar al propuesto por Bairi (2008).

## REFERENCIAS

- Bairi, A. (2008), "On the Nusselt number definition adapted to natural convection in parallelogrammic cavities". *Applied Thermal Engineering* 28, pgs: 1267–1271.
- Adjlout L., Imine O. , Azzi A., Belkadi M., (2002), "Laminar natural convection in an inclined cavity with a wavy wall". *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, pags.: 2141–2152.
- Dalal A. , Kumar Das M. , (2005), "Laminar natural convection in an inclined complicated cavity with spatially variable wall temperature". *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 2986–3007
- Esteban E. S., Aramayo A. M., Cardón L. (2012), "Efecto de distintas geometrías de la superficie superior en la transferencia de calor en una cavidad tridimensional (3D)". *Mecánica Computacional Vol XXXI*, págs. 1985-1996