



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CONVECCIÓN NATURAL EN CAVIDADES  
OSCILANTES

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

P R E S E N T A:

RAFAEL CHÁVEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ



CD. UNIVERSITARIA

MAYO, 2008.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. JAIME CERVANTES DE GORTARI  
Secretario: DR. FEDERICO MENDEZ LAVIELLE  
Vocal: DR. FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ  
1er. Suplente: DR. RUBEN ÁVILA RODRIGUEZ  
2do. Suplente: DR. MARTÍN SALINAS VAZQUEZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:  
Ciudad Universitaria, Coyoacán.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. FRANCISCO J SOLORIO ORDAZ

---

FIRMA

## **Agradecimientos.**

A mi familia por haberme apoyado todos estos años.

Al Dr. Francisco J. Solorio Ordaz por su apoyo y paciencia en la dirección de esta tesis.

A todos los profesores del Laboratorio de Termofluidos.

Al personal del laboratorio de Temofluidos, Conchita, Galán y Daniel.

A todos mis amigos y compañeros por su apoyo incondicional

“La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica”

Aristóteles.

# CONTENIDO.

<i>Nomenclatura</i>	<i>vi</i>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>Objetivo</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1.</b>	
<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Generalidades sobre la convección en cavidades</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Estudios experimentales sobre convección natural en cavidades estáticas.</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Estudios experimentales sobre convección natural en Cavidades dinámicas</b>	<b>21</b>
<i>1.3.1 Cavidades rotatorias</i>	<i>21</i>
<i>1.3.2 Cavidades oscilatorias</i>	<i>28</i>
<b>1.4 Objetivo de la Tesis.</b>	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1 Definición general del problema.</b>	<b>33</b>
<b>2.2 Desarrollo experimental.</b>	<b>35</b>
<i>2.2.1 Modelo experimental</i>	<i>36</i>
<i>2.2.2 Sistema giratorio</i>	<i>37</i>

2.2.3 Sistema de control de movimiento	39	
<b>2.3 Preparación de los experimentos</b>		<b>43</b>
<b>2.4 Desarrollo de los experimento.</b>		<b>45</b>
2.4.1 Estudio cualitativo.	45	
2.4.2 Estudio cuantitativo.	47	
<b>2.5 Obtención de resultados.</b>		<b>49</b>
2.5.1 Generalidades sobre el método PIV.	49	
2.5.2 Sistema PIV utilizado en los experimentos.	50	
2.5.3 Procedimiento para obtener los resultados.	51	
 <b>CAPÍTULO 3.</b>		
<b>RESULTADOS.....</b>		<b>54</b>
<b>3.1 Estudio cualitativo.</b>		<b>55</b>
3.1.1 Efecto del número de Rayleigh, cuando la cavidad se encuentra oscilando.	55	
3.1.2 Efecto del periodo de oscilación	59	
<b>3.2 Estudio cuantitativo.</b>		<b>68</b>
3.2.1 Estudio del estado transitorio del patrón convectivo, cuando la cavidad experimenta un cambio súbito en su ángulo de inclinación.	69	
3.2.1.1 Influencia de la relación de giro.	78	
3.2.1.2 Influencia de la amplitud de giro.	88	
3.2.1.3 Dependencia con el número de Rayleigh.	103	
3.2.2 Comportamiento del patrón convectivo cuando la cavidad oscila continuamente.		119

<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>133</b>
<b>APÉNDICE A</b>	
<b>PROGRAMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO PARA RELACIÓN</b>	
<b>DE GIRO CUADRADA.....</b>	<b>138</b>
<b>PROGRAMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO PARA RELACIÓN</b>	
<b>DE GIRO SENIODAL.....</b>	<b>139</b>
<b>APÉNDICE B</b>	
<b>TABLA B.1. DIFERENCIA DE TEMPERATURAS PARA DIFERENTES</b>	
<b>NÚMEROS DE RAYLEIGH.....</b>	<b>140</b>
<b>APÉNDICE C</b>	
<b>PROGRAMA PARA CALCULAR EL NÚMERO DE RAYLEIGH.....</b>	<b>141</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>142</b>

# INTRODUCCIÓN

## Objetivo.

La presente tesis tiene por objetivo el estudio experimental del fenómeno de convección natural en cavidades oscilantes o que experimenta un cambio brusco en su ángulo de inclinación. Se enfoca principalmente a la visualización de los patrones de flujo convectivo y a la medición de los campos de velocidad, utilizando el método PIV (velocimetría por imágenes de partículas). Como modelo experimental se utiliza una cavidad de sección cuadrada de 4cm de lado, cuya pared inferior es calentada por medio de una resistencia, en tanto que la pared superior es enfriada con agua proveniente de un baño térmico, ambas paredes se encuentran aisladas por la cara exterior y se consideran isotérmicas, mientras que las paredes laterales tienen una conductividad térmica finita y son transparentes para facilitar la iluminación del plano de visualización. El modelo experimental es montado en una estructura, la cual oscila a diferentes frecuencias y amplitudes. Se utiliza glicerina de alta pureza como fluido de trabajo.

El fenómeno de transferencia de calor por convección natural en cavidades cerradas ha sido ampliamente estudiado dada la importancia que tiene en múltiples aplicaciones en ingeniería. En particular la convección natural en cavidades oscilantes tiene aplicación en metalurgia, para uniformizar el tamaño de grano y por consiguiente mejorar las propiedades mecánicas de los

materiales, también se utiliza para mejorar el rendimiento de los colectores solares, que modifican su posición con respecto al sol.

En el primer capítulo se da una introducción al fenómeno de la convección natural en cavidades. Se revisan artículos de estudios realizados sobre cavidades inclinadas y cavidades rotatorias, y se menciona la importancia del tema de esta tesis. En el segundo capítulo se describen el modelo experimental, así como los diferentes sistemas, la lista de materiales y equipos utilizados para la puesta en marcha del mismo. Se explica la metodología utilizada en el desarrollo de los experimentos y en la obtención de los patrones de flujo y los campos de velocidad. En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos de los experimentos, así como una discusión de los mismos. En el cuarto capítulo se plantean las conclusiones generales de la tesis. Finalmente en los apéndices se desglosan los programas desarrollados para el sistema de control de movimiento y el cálculo del número de Rayleigh.

Hasta donde se sabe, esta es la primera vez que se estudian estos fenómenos transitorios producidos por la oscilación o cambio repentino en el ángulo de inclinación de la cavidad.



# CAPÍTULO 1

## Antecedentes.

### 1.1 Generalidades sobre la convección natural en cavidades.

A pesar de que el fenómeno de la convección natural en cavidad es un problema relativamente sencillo, no se ha podido obtener una solución analítica exacta para la mayoría de los casos de estudio. Se han intentado resolver las ecuaciones que gobiernan el fenómeno, de forma analítica como numérica, para casos particulares con resultados alentadores, pero para casos más complejos, queda mucho trabajo por hacer.

Dado que existe una infinidad de parámetros que influyen en la convección natural en cavidades cerradas, se han creado varias formas de clasificar dicho fenómeno. Una de las más utilizadas es por el tipo de calentamiento: cavidades calentadas por debajo (problema de Rayleigh-Bénard) o lateralmente. Otras utilizan la orientación o la razón de forma de la cavidad. Considerando el tipo de estudio que se está realizando, se puede tomar un nuevo tipo de clasificación utilizando el estado de la cavidad, estas pueden ser estáticas y dinámicas. Dentro de las primeras se encuentran las cavidades calentadas por de abajo, de forma lateral y cavidades inclinadas, en estas últimas la pared caliente se encuentra inclinada un ángulo  $\theta$  con respecto a la horizontal, y puede estar tanto arriba como debajo de la pared fría. El segundo grupo corresponde a las cavidades dinámicas, es decir, las cavidades que se encuentran en movimiento, dentro de estas se encuentran las cavidades rotatorias y oscilatorias.

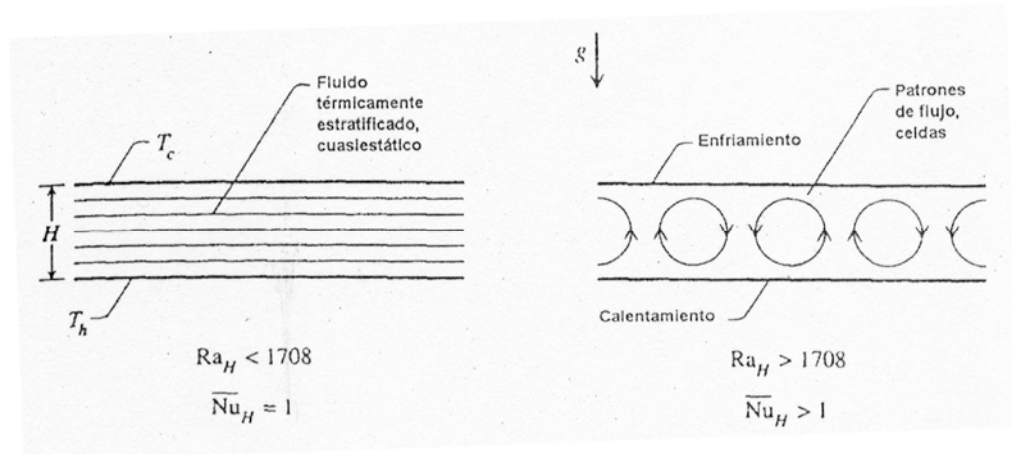


Figura 1.1. Capa de fluido entre dos paredes planas y horizontales, calentadas en la pared inferior.

Para comprender mejor el fenómeno de la convección natural en una cavidad calentada por debajo, considérese una capa de fluido la cual comienza a ser inestable cuando la diferencia de temperaturas entre la pared superior e inferior es mayor a un valor crítico. Esta transición se puede entender como la competencia de dos efectos: la flotación, debida a la expansión térmica y la disipación de calor por las difusiones térmica y viscosa. Véase la Figura 1.1. El efecto de dichas fuerzas se puede observar con mayor claridad cuando se expresan en un número adimensional que recibe el nombre de número de Rayleigh.

El número de Rayleigh se define como  $Ra = g\beta\Delta TL^3 / (\alpha\nu)$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica,  $L$  es una longitud característica,  $\alpha$  la difusividad térmica,  $\nu$  la viscosidad cinemática del fluido y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura entre la pared fría y caliente.

Cuando la diferencia de temperaturas entre las paredes es lo suficientemente grande, las fuerzas de flotación superan a las fuerzas viscosas y al efecto de la

difusividad térmica, lo cual ésta asociado directamente con el número de Rayleigh. Unny [1] propone un valor crítico del número de Rayleigh ( $Ra_c$ ) de 1708, para una cavidad lo suficientemente larga y ancha. Otros autores consideran que 7000 es el valor crítico del número de Rayleigh para una cavidad cúbica con paredes laterales conductoras [2, 3]. Por debajo de este valor no existe movimiento del fluido y la transferencia de calor es únicamente por conducción.

Una vez que la convección ha comenzado, se forman patrones convectivos en los cuales el fluido sube por algunas caras y cae por otras, como se ilustra en la Figura 1.1. Conforme aumenta el valor del número de Rayleigh los patrones de flujo se vuelven cada vez más complejos y pasan de patrones bidimensionales a tridimensionales, hasta que finalmente se llega a un flujo turbulento. La naturaleza de estos patrones convectivos es fuertemente influenciada por las condiciones de frontera de la cavidad. Uno de los parámetros que tiene más peso en la formación de los patrones convectivos es el ángulo de inclinación, debido a que la fuerza de flotación y la difusión de calor varían con la inclinación de la cavidad. Unny [1] determinó que para una cavidad inclinada entre  $0^\circ$  y  $168^\circ$  el principal modo de transferencia de calor es por convección (efecto de la fuerza de flotación), mientras que para ángulos mayores el principal modo de transferencia de calor es por conducción, para una cavidad calentada por debajo.

## 1.2 Estudios experimentales sobre convección natural en cavidades estáticas.

Existen muchos trabajos publicados en los que se estudia la convección natural en cavidades de diferente razón de forma, en cavidades cuadradas o cúbicas. También se consideran diferentes condiciones de frontera como paredes adiabáticas, conductoras o con distribución lineal de temperatura.

Hamady et al. [4] realizan un estudio numérico y experimental, para observar el efecto de la inclinación en las características de la transferencia de calor por convección, en estado permanente, dentro de una cavidad con una razón de forma de uno. Obtienen el número de Nusselt local y promedio, para varios ángulos de inclinación entre  $0^\circ$  (calentado por arriba) y  $180^\circ$  (calentado por debajo). El rango del número de Rayleigh es de  $10^4$  a  $10^6$  y utilizan aire como de fluido de trabajo. Las paredes superior e inferior se consideran isotérmicas, mientras que las paredes laterales son adiabáticas.

El modelo matemático se obtuvo utilizando las ecuaciones que gobiernan la convección natural en cavidades en régimen laminar: conservación de masa, energía y cantidad de movimiento. Las ecuaciones fueron discretizadas para aproximar el volumen de control y asegurar las características de conservación. Se utilizó el esquema QUICK (quadratic upstream interpolation for convection kinematics) extendido para cálculos tridimensionales. Las razones de forma son:  $A_x = W/H = 1$  y  $A_z = L/H = 10$ , donde  $W$  es el ancho,  $L$  es el largo y  $H$  la altura de la cavidad. En el análisis numérico se utilizan las condiciones de frontera experimentales.

El dispositivo que utilizaron se muestra en la Figura 1.2. Este consiste en dos placas verticales de aluminio, de  $50.80\text{cm} \times 50.80\text{cm}$  y  $2.54\text{cm}$  de espesor, de alta

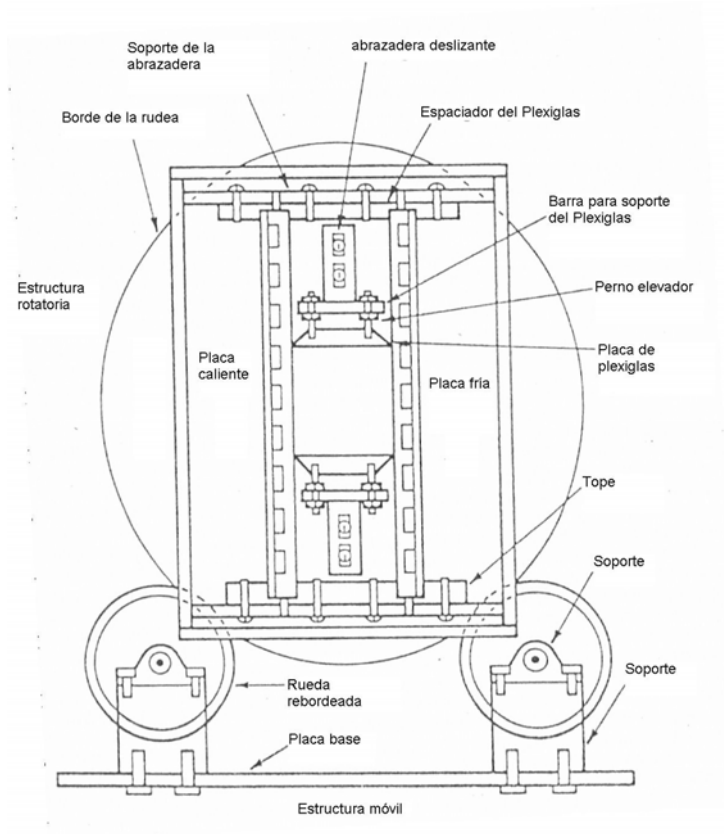


Figura 1.2. Diagrama esquemático del dispositivo experimental. Hamady et al.[4]

conductividad para asegurar que la placa sea isotérmica. En su parte exterior se maquinaron canales, por los que pasa agua proveniente de dos baños térmicos independientes. Las placas horizontales son de plexiglás,  $50.80\text{cm} \times 5.08\text{cm}$  y  $1.27\text{cm}$  de espesor, las esquinas se rebajan a un ángulo de  $60^\circ$  para minimizar la conducción. El modelo tiene las siguientes dimensiones internas  $W = 5.08\text{cm}$ ,  $H = 5.08\text{cm}$  y  $L = 50.8\text{cm}$ . El dispositivo se aísla con una capa de fibra de vidrio de  $7\text{cm}$  de espesor y se monta en una estructura rotatoria.

Para la medición del campo de temperaturas se utilizó un interferómetro Mach-Zhender, mientras que para realizar la observación de los patrones de flujo utilizaron una hoja láser, con humo como trazador. El número de Nusselt

se calculó a partir de gradiente de temperatura adimensional multiplicado por la relación de conductividades del fluido, en la pared fría y caliente, la ecuación se expresa como:

$$Nu(\zeta) = \left[ \frac{K_H}{K_C} \frac{\partial(T - T_C)/(T_H - T_C)}{\partial(x/H)} \right] \quad (1.1)$$

donde  $\zeta$  es la distancia adimensional en la dirección  $x$  que se define como  $\zeta = x/H$ , donde  $H$  es la altura de la cavidad.

En tanto que el número de Nusselt promedio se calcula de la siguiente forma:

$$\overline{Nu} = \int_0^1 Nu(\zeta) d\zeta \quad (1.2)$$

Hamady obtiene una correlación para obtener el número de Nusselt promedio a un ángulo de  $90^\circ$ :

$$Nu = 0.175Ra^{0.275} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^6 \quad (1.3)$$

En la Figura 1.3 se muestran en forma gráfica los resultados obtenidos de forma experimental y numérica por Hamady y otros investigadores referidos por él. En esta gráfica se puede observar claramente el efecto de la inclinación en la transferencia de calor por convección. El número de Nusselt aumenta conforme se incrementa el ángulo de inclinación, teniéndose un máximo entre  $110^\circ$  y  $120^\circ$ . Este efecto se debe a que al aumentar el ángulo de inclinación se incrementa la transferencia de calor por convección natural. El autor recomienda un par de

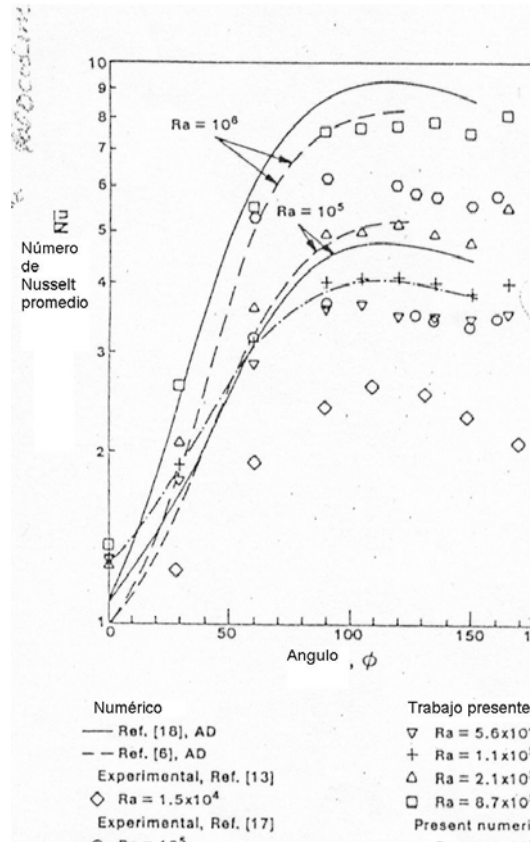


Figura 1.3. Efecto del ángulo de inclinación en el número de Nusselt promedio, a  $A_x = 1.0$ . Hamady et al. [4]

correlaciones para la obtención del número de Nusselt promedio ( $\overline{Nu}$ ) en función del ángulo de inclinación:

$$\overline{Nu}(\phi) = \overline{Nu}(180^\circ)(\cos(\phi - 180^\circ)) \quad 150^\circ \leq \phi \leq 180^\circ \quad (1.4)$$

$$\overline{Nu}(\phi) = [\overline{Nu}(90^\circ) - \overline{Nu}(0^\circ)] \left[ \frac{2}{\pi} \phi \sin(\phi) \right] + \overline{Nu}(0^\circ) \quad \phi \leq 150^\circ \quad (1.5)$$

Ambas ecuaciones para:  $10^4 \leq Ra \leq 10^6$

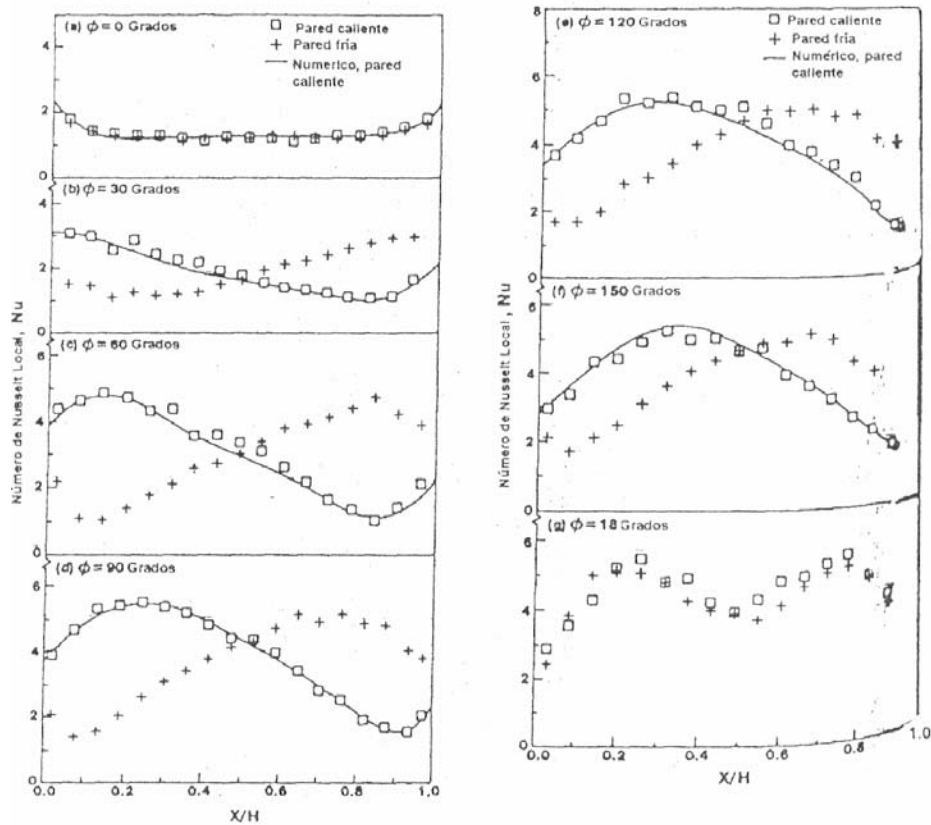


Figura 1.4. Efecto del ángulo de inclinación sobre el número de Nusselt local a lo largo de la pared caliente y fría, para  $A_x = 1.0$  y  $Ra = 1.1 \times 10^5$ . Hamady et al. [4]

En la Figura 1.4 se muestra el comportamiento del número de Nusselt local para  $Ra = 1.1 \times 10^5$  obtenidos experimentalmente para la pared caliente y fría, siendo comparados con los resultados obtenidos numéricamente para la pared caliente. En la Figura 1.5a se pueden observar los patrones de flujo obtenidos en los experimentos, mientras que en la Figura 1.5b se muestran las predicciones obtenidas a partir del código numérico, ambas tienen una gran similitud y fueron obtenidas para un  $Ra = 3.0 \times 10^5$  y diferentes inclinaciones. Los campos de temperaturas obtenidos experimentalmente se muestran en la Figura 1.6a y los



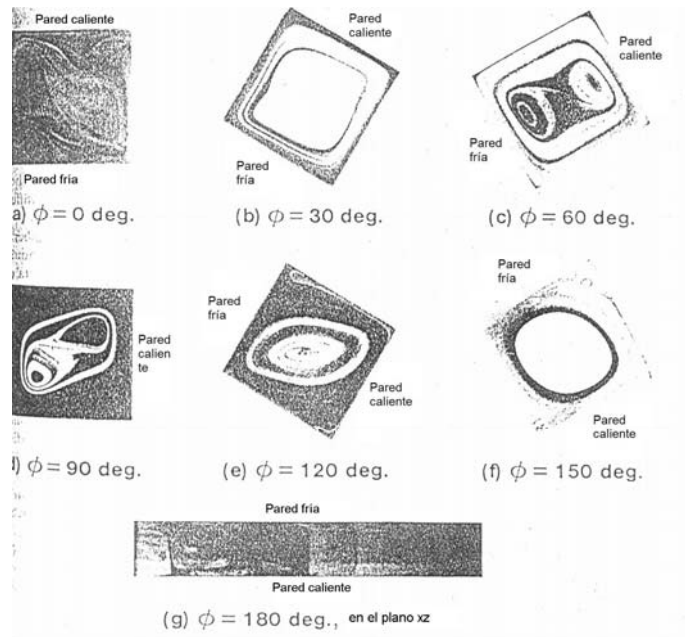


Figura 1.5a. Patrones de flujo en el plano x-y, para  $Ra = 3.0 \times 10^5$ . Hamady et al. [4]

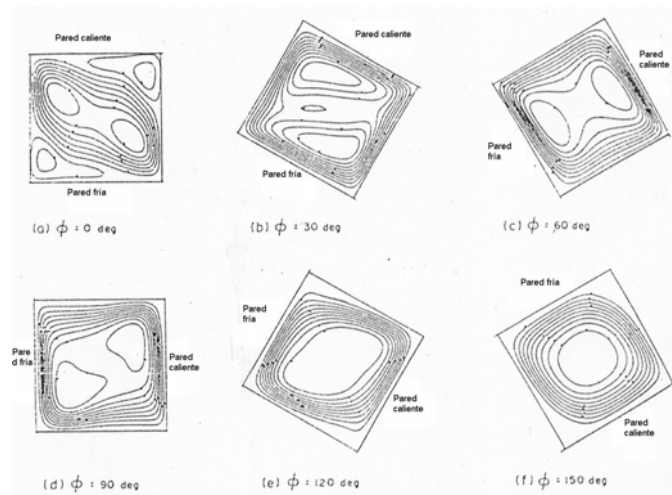


Figura 1.5b. Funciones de corriente en el plano x-y,  $Ra = 3.0 \times 10^5$ . Hamady et al. [4]

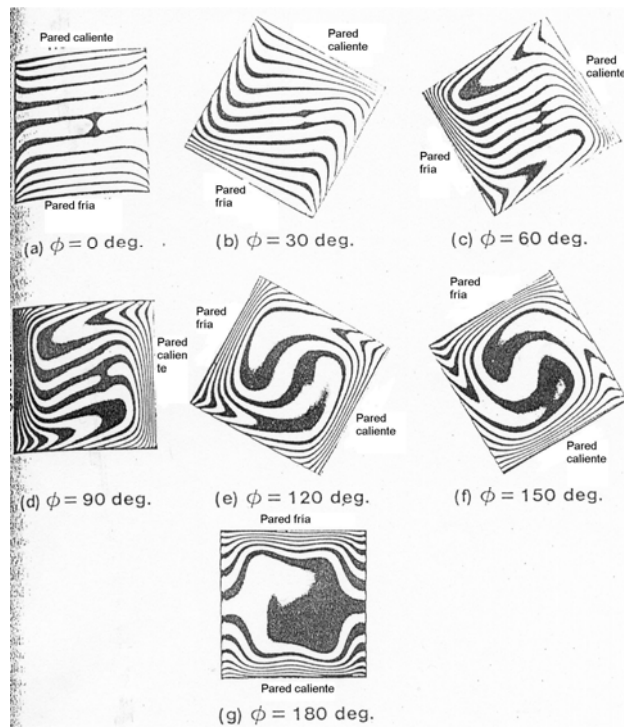


Figura 1.6a. Patrones de Isotermas, para  $Ra = 1.1 \times 10^5$ . Hamady et al. [4]

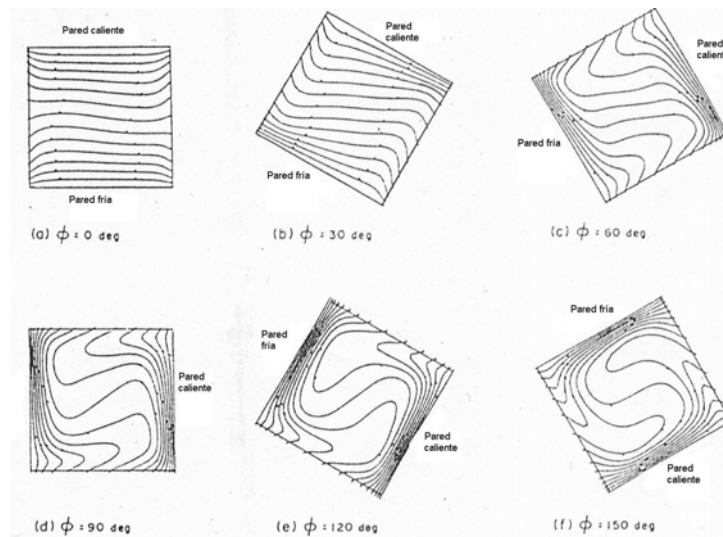


Figura 1.6b. Isotermas, para  $Ra = 1.1 \times 10^5$ . Hamady et al. [4]

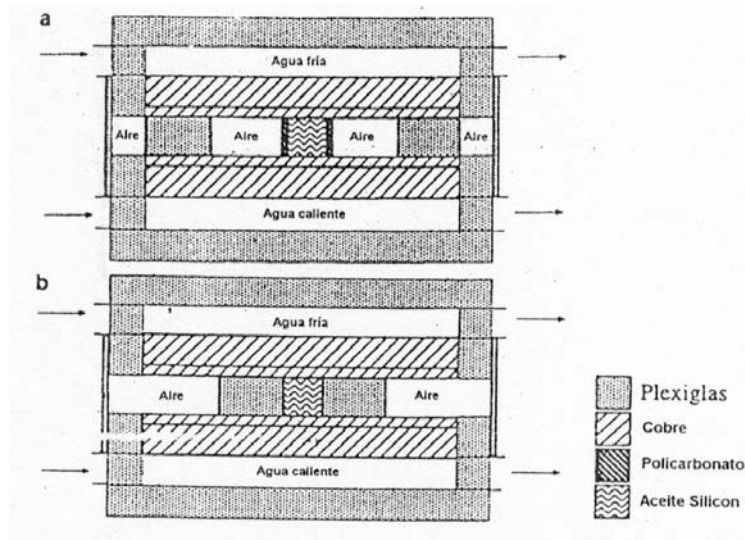


Figura 1.7. Corte seccional de la cavidad. a) con paredes laterales adiabáticas, b) con paredes laterales conductoras. Pallares et al. [5]

resultados de las predicciones numéricas se observan en la Figura 1.6b, teniendo también una gran similitud y fueron obtenidos para un  $Ra = 1.1 \times 10^5$  y diferentes ángulos de inclinación.

Pallares et al. [5] realizaron una serie de experimentos en los cuales midieron el flujo convectivo en una cavidad cúbica calentada en la pared inferior, para números de Rayleigh menores a  $8 \times 10^4$ , proponiendo dos condiciones de frontera en la paredes laterales; para la primera condición de frontera se tienen paredes adiabáticas, mientras que para la segunda se presentan paredes conductoras con un perfil lineal de temperatura. Realizaron visualizaciones de los campos de flujos así como la medición de los campos de velocidades utilizando velocimetría por imágenes de partículas (PIV) en diferentes planos verticales y a diferentes profundidades. El fluido de trabajo es aceite silicón ( $Pr = 130$ ).

El dispositivo consiste en una cavidad cúbica de 12.5mm de lado, la pared superior e inferior son de cobre de 4mm de espesor comprimidas por dos placas de cobre de 10mm de espesor, alimentadas con agua fría o caliente respectivamente de forma independiente por dos baños térmicos. Para lograr la condición de paredes adiabáticas, se utilizaron placas de policarbonato de 1mm de espesor tal como se muestra en la Figura 1.7a, en tanto que para la condición de paredes laterales conductoras y perfil lineal de temperatura se utilizaron placas de plexiglás de 20mm de espesor como se muestra e la Figura 1.7b.

Los autores reportaron siete estructuras estables que se presentan a diferentes números de Rayleigh, ver Figura 1.8. Hacen referencia a estas estructuras tanto para paredes laterales adiabáticas como conductoras. Para todas las estructuras el área sombreada indica que el fluido va en ascenso y el área clara señala que el fluido va en descenso. La estructura S1 tiene su celda convectiva perpendicular a dos paredes verticales opuestas. Para la estructura S2 la celda convectiva tiene su eje de rotación orientado en diagonal cerca de dos esquinas verticales opuestas. Las estructuras S3 y S7 son muy similares a S1 pero el eje rotación de la celda convectiva es irregular. La estructura S4 es un toroide en donde el fluido asciende cerca de las paredes laterales y desciende en la parte central de la cavidad. En la estructura S5 se presentan cuatro estructuras, cada una con la celda convectiva perpendicular a una de las paredes verticales. La estructura S6 presenta cuatro celdas convectivas, cada una con el eje de rotación perpendicular a una de las esquinas verticales de la cavidad.

Se hace una comparación entre los resultados obtenidos en los experimentos y los obtenidos en el estudio numérico hecho por Pallares et al. [6] encontrando que las estructuras que habían observado en los experimentos son similares a las que se habían observado en las simulaciones numéricas para  $Pr = 130$  y  $Ra < 8 \times 10^4$ . (Figuras 1.9 y 1.10).

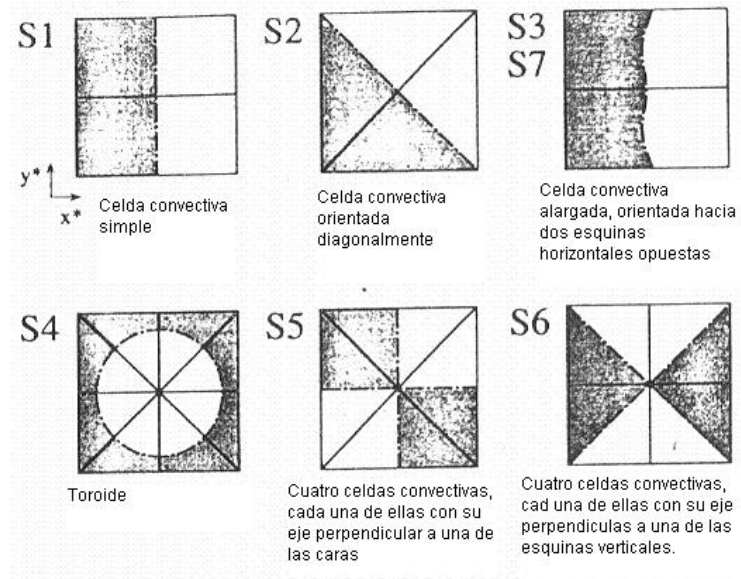


Figura 1.8. Celdas convectivas desarrolladas en una cavidad cúbica. Pallares et al. [5]

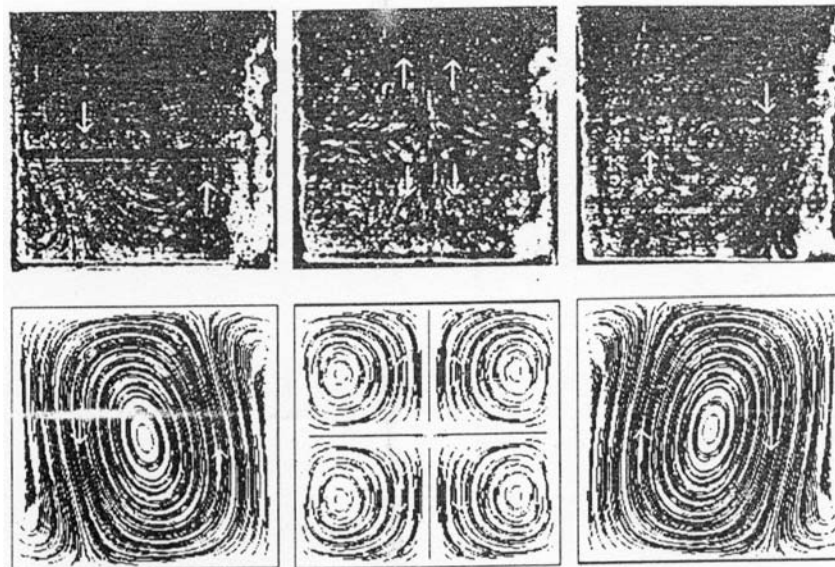


Figura 1.9. Patrones de flujo para las cinco estructuras en tres distintos planos verticales. (a) Visualización para el número de Rayleigh de  $7 \times 10^4$ . (b) Predicción hecha por Pallares [5]

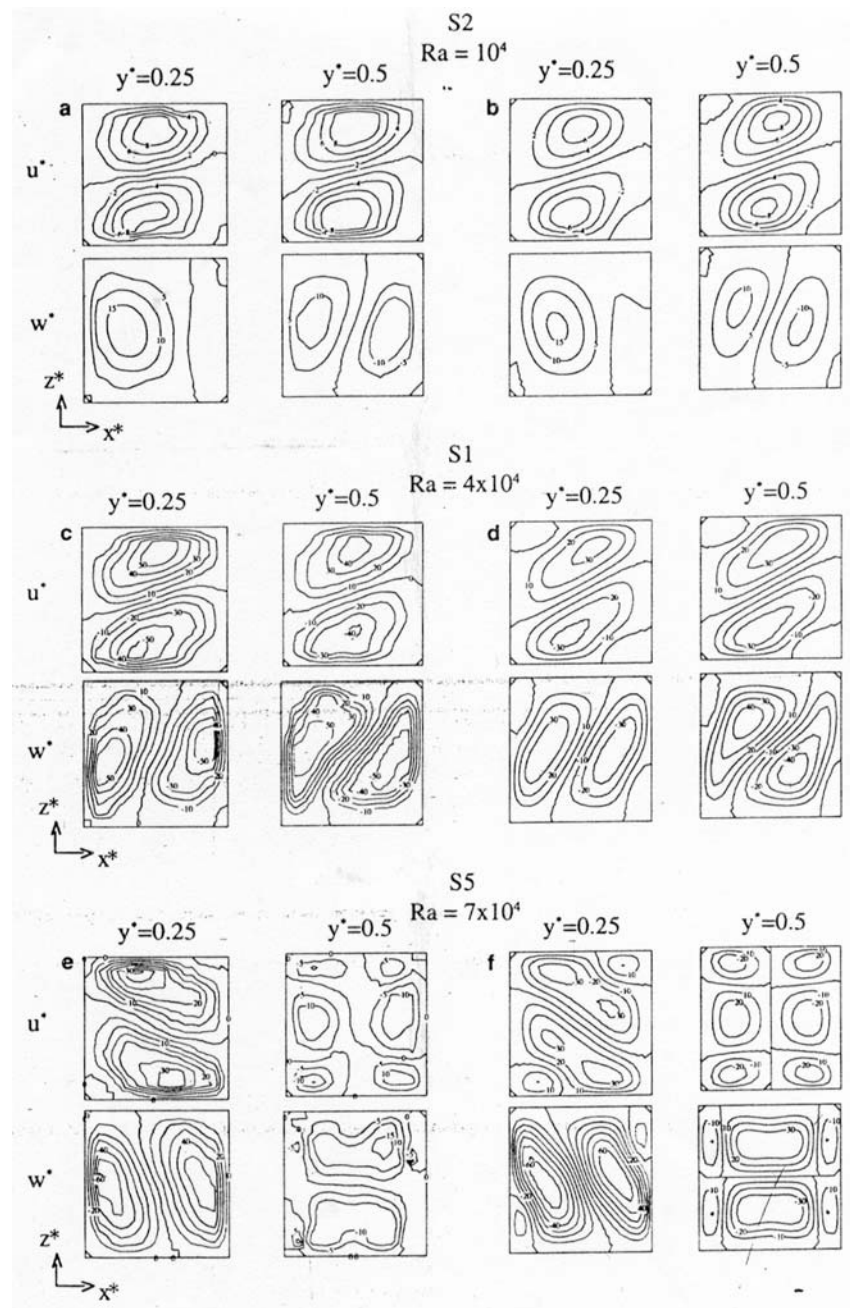


Figura 1.10. Comparación entre los resultados, de las componentes de la velocidad, numéricos y experimentales, para la cavidad B y tres distintas estructuras. Para S2 a un  $Ra=10^4$ , S1 para un  $Ra=4 \times 10^4$ , y S5 a un  $Ra=7 \times 10^4$ . Pallares et al. [5]

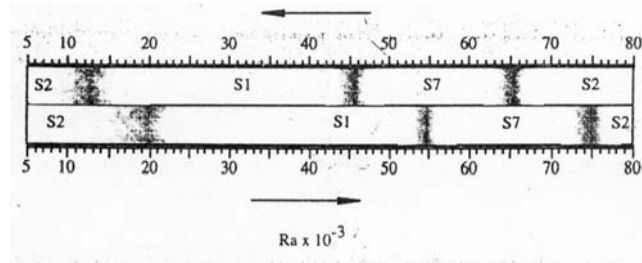


Figura 1.11a. Secuencia experimental de las estructuras y la transición para el flujo en la cavidad con paredes laterales adiabáticas. Pallares et al. [5]

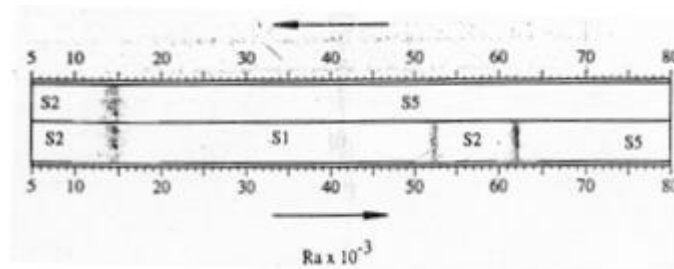


Figura 1.11b. Secuencia experimental para las estructuras y la transición para el flujo en la cavidad con paredes laterales conductoras. Pallares et al. [5]

En las Figuras 1.11a y 1.11b se muestra la histéresis, se señala la evolución de las configuraciones para un número de Rayleigh ascendente y descendente, para ambas condiciones de frontera. La zona blanca muestra el rango en el que cada estructura es estable, mientras que las zonas oscuras señalan el rango en el que se hace la transición de una estructura a otra.

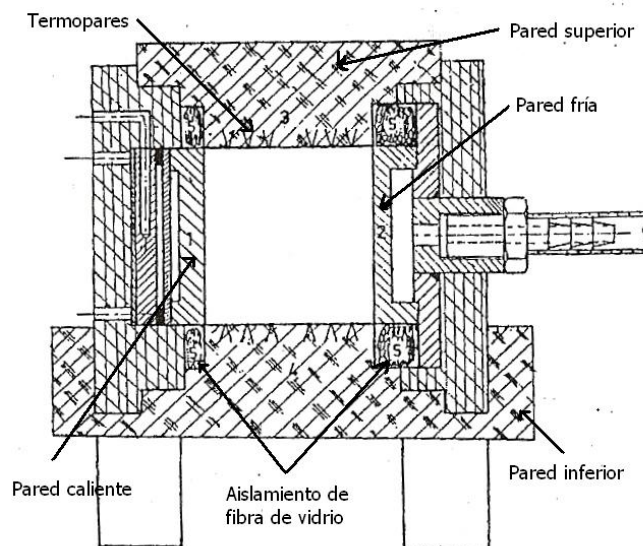


Figura 1.12. Esquema de la cavidad de 40mm×40mm. Ramesh et al. [7]

Para el caso de paredes calentadas lateralmente, Ramesh et al. [7] realizaron un estudio experimental en una cavidad cuadrada en la cual, las paredes laterales se consideran isotérmicas y las paredes superior e inferior se consideran adiabáticas. Utilizaron aire como fluido de trabajo.

Emplearon dos modelos experimentales, el primero de 40mm × 40mm y 200mm de profundidad, mientras que el segundo modelo tiene las siguientes dimensiones: 60mm × 60mm × 300mm. Las paredes fría y caliente se fabricaron con aluminio, en la parte exterior de la pared fría se maquinaron canales en los que circula agua a temperatura constante proveniente de un baño térmico, mientras que en la pared caliente se incorporó un calentador eléctrico fabricado con cinta de nicromel y aislándolos eléctricamente con una hoja de mica de rubí. Para medir la temperatura de las placas se colocan termopares tipo K embebidos en las paredes caliente y fría. Se utilizaron dos tipos de materiales



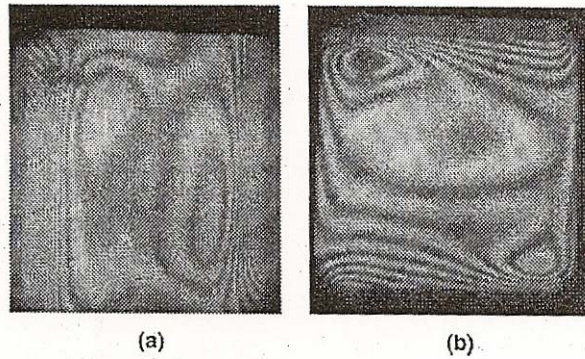


Figura 1.13. a) Interferograma en el que se muestra la presencia de un capa límite térmica adyacente a las paredes caliente (izquierda) y fría (derecha). b) La capa límite se encuentra adyacente a las paredes superior e inferior. El material de las paredes superior e inferior es corcho. Ramesh et al. [7]

para las paredes superior e inferior, perspex y corcho, para tener un buen aislamiento; además de ser pintadas de color negro con el fin de tener una baja emisividad. En las paredes anterior y posterior de la cavidad se utilizó vidrio de alta calidad; para evitar el contacto directo de las paredes que conforman la cavidad con el vidrio se utilizó una junta de nitrilo de rubí de 3mm. Todo el modelo fue aislado del ambiente con una capa de fibra de vidrio de 25cm, a excepción de las paredes anterior y posterior del modelo.

Ramesh utilizó un interferómetro diferencial para estudiar la transferencia de calor. Un interferograma da el valor del coeficiente de transferencia de calor convectivo a lo largo de la superficie por medición directa de la deflexión de las franjas respecto a la superficie de interés. En la figura 1.13 se muestra un interferograma, en esta figura cada franja representa un gradiente constante de la densidad, en la dirección perpendicular a las paredes, por lo que estas líneas

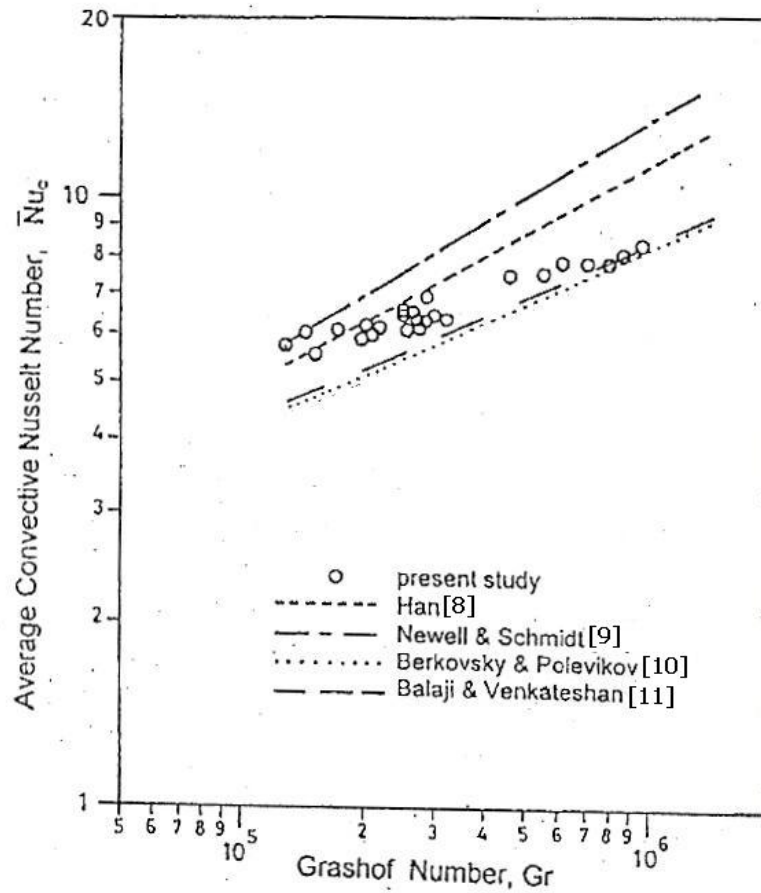


Figura 1.14. Variación del número de Nusselt promedio respecto al número de Grashof. . Ramesh et al. [7]

representan líneas de flujo de calor conductivo constante a lo largo de ambas paredes. Debido a dificultades para medir dicha deflexión de las franjas, los interferogramas fueron usados solo para un análisis cualitativo. Basándose en los resultados de sus experimentos Ramesh propone una correlación para calcular el número de Nusselt en función del número de Grashof:

$$\overline{Nu} = 0.560Gr^{0.195} \quad 5 \times 10^4 \leq Gr \leq 2 \times 10^6, \quad (1.6)$$

las propiedades del fluido son evaluadas a la temperatura promedio.

En la figura 1.14 se comparan los resultados obtenidos experimentalmente, con las correlaciones de Han [12], Newell [13], Berkowsky [14] y Balaji [15]. Como se puede observar los resultados experimentales se encuentran dentro de la banda cubierta por todos los resultados numéricos, las discrepancias se deben a que los códigos numéricos utilizan diferentes métodos de aproximación, discretización del dominio de interés entre otros parámetros, lo que conlleva a la variación de resultados numéricos

### **1.3 Estudios experimentales sobre convección natural en cavidades dinámicas.**

#### **1.3.1 Cavidades rotatorias.**

Mientras que en el problema de Rayleigh-Bénard la convección es producida por un gradiente de densidad y la fuerza de gravedad paralelo a dicho gradiente, para el fenómeno de la convección en cavidades rotatorias, la aceleración centrífuga induce la convección dentro de la cavidad, cuando ésta se encuentra expuesta a un gradiente de temperatura. Para el estudio del fenómeno de la convección en cavidades rotatorias, se introduce un nuevo parámetro adimensional:

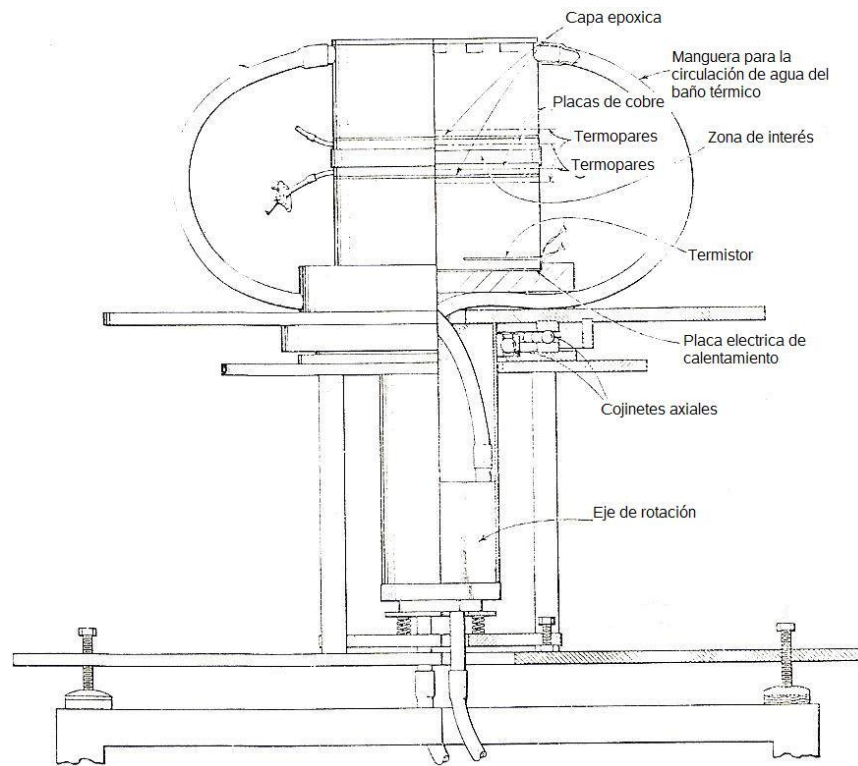
$$Ta = \frac{4\Omega^2 l^4}{\nu^2} \text{ Número de Taylor,} \quad (1.7)$$

donde  $\Omega$  es la velocidad de rotación,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $l$  es la altura de la cavidad, es decir la distancia entre la pared fría y la pared caliente. El número de Taylor mide la influencia de la rotación sobre el sistema convectivo.

Rossby et al [12] realizaron un estudio experimental para observar la respuesta de una capa delgada de fluido rotando al rededor de su eje vertical cuando es sujeta a un gradiente de temperaturas vertical. Utilizan agua y mercurio como fluidos de trabajo, teniendo así números de Prandtl de 6.8 y 0.025 respectivamente. La primera parte del estudio se dedica a establecer de forma experimental la relación entre el número de Rayleigh crítico y el número de Taylor, para ambos fluidos de trabajo. La segunda parte del estudio se enfoca a estudiar el comportamiento del flujo de calor con respecto al número de Rayleigh y el número de Taylor, una vez que se establece la convección, tanto para el mercurio como el agua.

El dispositivo experimental consiste en un arreglo tipo sandwich el cual está formado por dos cilindros sólidos de  $8\frac{3}{4}$  pulgadas de diámetro y 4 pulgadas de altura, cuya función es uniformizar la temperatura de pared, el cilindro superior es enfriado por agua proveniente de baño térmico Haake, en tanto que el cilindro inferior es calentado eléctricamente con una placa de calentamiento, colocado directamente en la cara exterior de dicho cilindro. Estos cilindros se encuentran en contacto con las paredes que conforman la cavidad, dichas paredes son cilíndricas y fueron maquinadas de cobre de  $8\frac{3}{4}$  pulgadas de diámetro y  $\frac{1}{2}$  pulgada de espesor. El modelo experimental es soportado en un bloque grande de formica centrada sobre una placa de acero de  $\frac{1}{2}$  pulgada de espesor y 30 pulgadas de diámetro, el cual es soportado por medio de cojinetes axiales. Un eje de 5 pulgadas de diámetro desciende por debajo de la mesa y dentro de dos cojinetes. Dentro del eje se monta un sistema de anillos que permite la circulación del agua del baño térmico de y hacia el modelo experimental. Figura 1.15.

Rossby realiza visualizaciones con la cavidad estática y cuando se encuentra girando, con el propósito de entender las estructuras del flujo convectivo, para



1.15 Vista del modelo experimental centrado en una mesa rotatoria. Rossby et al. [12].

diferentes valores del número de Rayleigh y Taylor. Como trazador utilizó partículas de aluminio y un haz de luz colimado para iluminar la zona de interés.

Cuando la cavidad se encuentra estática observó que la estructura convectiva preferida son rollos y celdas con forma de rollos para  $2.2 \times 10^3 \leq Ra \leq 8.7 \times 10^4$ . Para  $1.1 \times 10^4 \leq Ra \leq 2.6 \times 10^4$ , dichos rollos pierden su estructura bidimensional para incluir una estructura triangular periódica, esta estructura es estable para valores del número de Rayleigh del orden de  $10^5$  o superior, dependiendo del número de Prandtl. Cuando la cavidad se encuentra girando rápidamente, se

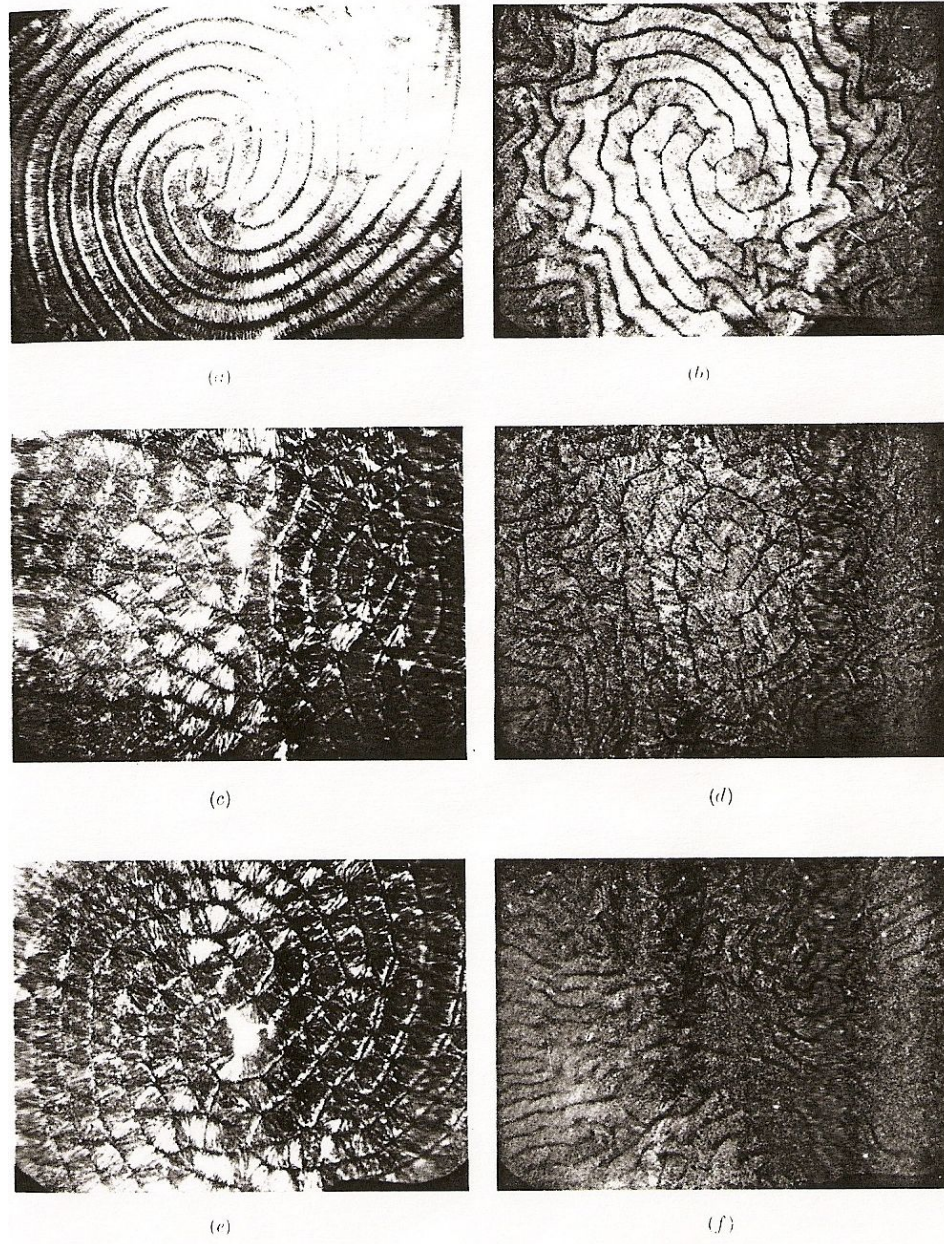


Figura 1.16. Patrones convectivos para diferentes valores del número de Raleigh y número de Taylor.  $Ta=0$  para a), c) y e),  $Ta=1400$  para b),  $Ta=1060$  para d) y  $Ta=1580$  para f).  $Ra=10300$  para a) y b),  $Ra=26000$  para c),  $Ra=25000$  para d),  $Ra=43000$  para e) y  $Ra=42000$  para f).  $Pr=100$ . Altura de la cavidad 0.7cm. Rossby et al.[12].

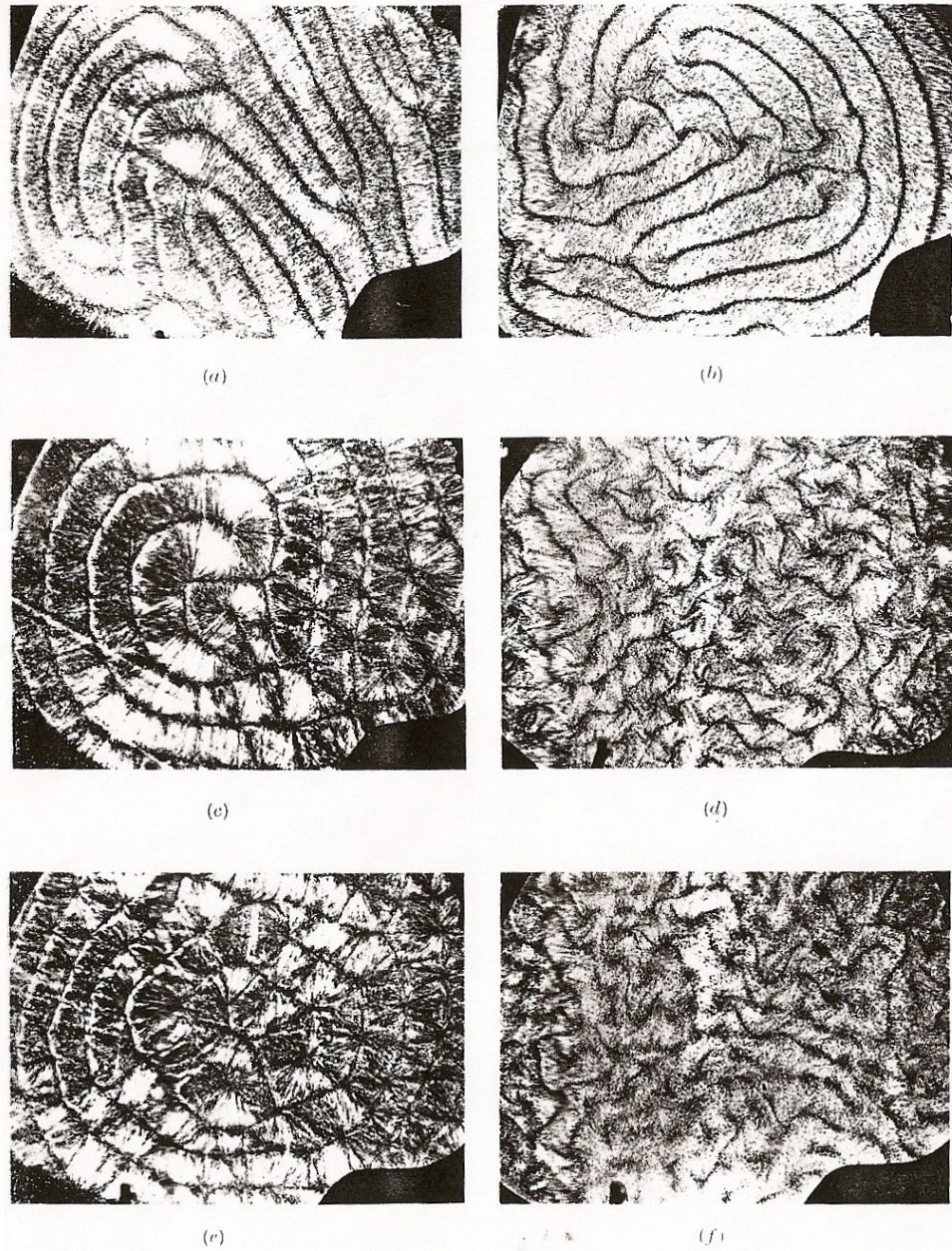


Figura 1.17. Patrones convectivos para diferentes valores de número de Rayleigh y número de Taylor.  $Ta=0$  para a), c) y e),  $Ta=2020$  para b) y d) y  $Ta=1970$  para f).  $Ra=11000$  para a) y b),  $Ra=35000$  para c) y d),  $Ra=87000$  para e) y  $Ra=84000$  para f).  $Pr=100$ . Altura de la cavidad 1cm. Rossby et al.[12].

presenta una transición a un cierto radio, a partir del cual los rollos son orientados radialmente, debido a la aceleración radial. Figuras 1.16 y 1.17.

Así mismo midieron el flujo de calor en un amplio rango de números de Rayleigh y de Taylor, encontrando generalmente valores mayores del número de Nusselt para el agua que para el mercurio. Para el agua, se presenta una estabilidad subcrítica para números de Taylor mayores a  $5 \times 10^4$ , de igual forma presenta un flujo de calor máximo para números de Taylor el cuál es una función creciente del número de Rayleigh,  $Ra = 206Ta^{0.63}$ . Para el mercurio se encuentra que existe una estabilidad de amplitud finita para  $0 < Ta < 1.8 \times 10^4$ , mientras que para  $1.8 \times 10^4 < Ta \leq 10^5$  se presenta una estabilidad oscilatoria de amplitud finita; para valores del número de Taylor mayores a  $10^5$  se tiene una buena concordancia con la teoría de estabilidad lineal.

Finalmente presenta correlaciones del número de Nusselt, con Taylor igual a cero (cavidad fija):

$$N = 0.184Ra^{0.281} \quad \text{para } Ra > 4 \times 10^3 \text{ para aceite silicón, Pr=200}$$

$$\text{para } Ra < 7 \times 10^3 \text{ para agua y} \quad (1.8)$$

$$N = 0.147Ra^{0.257} \quad \text{para } Ra > 2 \times 10^4 \text{ para mercurio} \quad (1.9)$$

Abell et al. [13] realizaron un estudio experimental para observar el efecto de la fuerza centrífuga dentro de una cavidad rectangular con una longitud de 27.94cm, altura de 2.62cm y un ancho de 2.54cm. La cavidad se calentó por la pared superior y se enfrió en la cara inferior; se hizo rotar alrededor del eje vertical, que pasa por el centro de la cavidad, a una velocidad de 565 rev/min. Utilizan dos tipos de aceite silicón teniendo así 7 y 3000 como valores para el número de Prandtl.



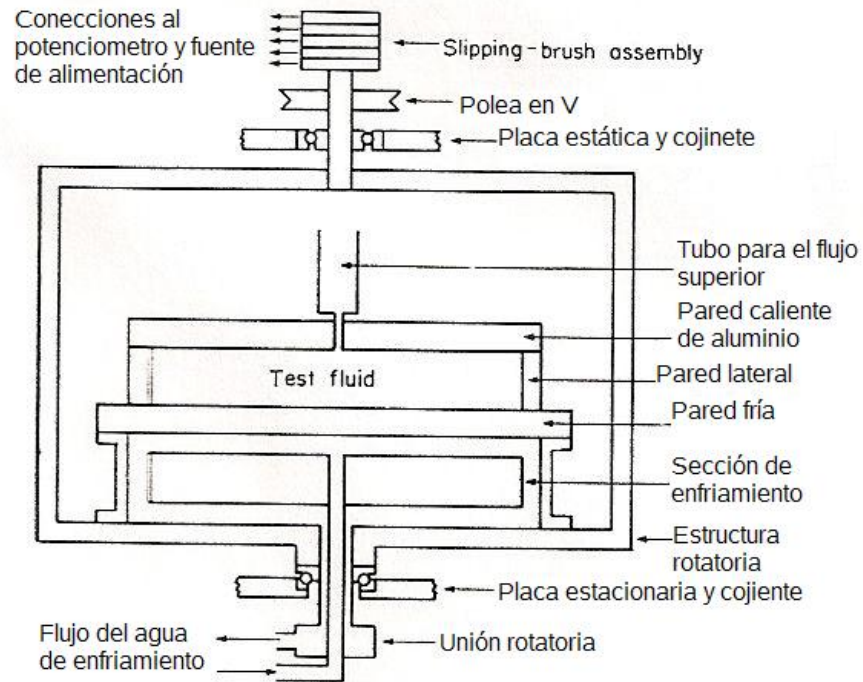


Figura 1.18. Esquema del modelo experimental. Abell et al. [13].

El modelo experimental se muestra en la figura 1.18. La pared superior es una placa de aluminio de  $30.48 \times 5.08 \times 1.27$  cm de espesor, con un elemento de calentamiento dentro de esta. La pared inferior es un disco de aluminio de 35.56 cm de diámetro y 1.27 cm de espesor, por la que se hace circular agua a temperatura constante proveniente de un baño térmico. Las paredes laterales fueron maquinadas en acrílico. Las temperaturas de la pared superior e inferior fueron monitoreadas por medio de termopares cobre-constantan.

Se colocaron cinco termopares dentro de la cavidad, sobre la pared lateral, para medir el campo de temperaturas. Estos termopares se colocaron a 2.5, 6.98, 10.80 y 13.65 cm del centro de la cavidad, el quinto termopar se colocó en el

centro de la cavidad. Los voltajes de los termopares fueron leídos por un potenciómetro, con una resolución de  $1\mu\text{V}$ .

Encontraron que el número de Nusselt depende de la diferencia de temperatura a la 0.4 y 0.25 potencia para el aceite de baja y alta viscosidad, respectivamente. La dependencia del número de Nusselt con respecto a la velocidad de rotación es a la 0.5 y 0.6 potencia, para el aceite de baja y alta viscosidad, respectivamente. Así mismo el número de Nusselt se puede expresar por medio de las siguientes correlaciones:

$$Nu = 2.28\beta^{0.4}\varepsilon^{-0.5} = 0.702\frac{\alpha^{0.4}b}{\nu^{0.5}a^{0.25}}\Delta T^{0.4}A^{0.25} \quad (1.10)$$

Para el aceite de baja velocidad y

$$Nu = 3.37\beta^{0.25}\varepsilon^{-0.6} = 1.32\frac{\alpha^{0.25}b^{1.2}}{\nu^{0.6}a^{0.3}}\Delta T^{0.25}A^{0.3} \quad (1.11)$$

para el aceite de alta viscosidad. Donde  $\beta$  es el número de Rossby ( $\alpha\Delta T/8$ ),  $\varepsilon$  es el número de Ekman ( $2\nu/\omega b^2$ ),  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $\alpha$  difusividad térmica,  $a$  altura media de la cavidad,  $A$  aceleración centrífuga y  $b$  altura de la cavidad.

### 1.3.2 Cavidades oscilatorias.

El fenómeno de la convección natural en cavidades oscilatorias es un campo poco explorado, tal como lo indican Rogers et al. [14] quienes realizaron un estudio experimental para la convección de Rayleigh-Bénard en una capa de fluido con oscilación vertical:

“We report on the first quantitative observations of convection in a fluid layer driven by both heating from below and vertical sinusoidal oscillation”.

Utilizaron una cavidad circular de 3.8cm de diámetro. La pared inferior es una placa de aluminio de 0.6cm de espesor, la cual se calienta por medio de una resistencia que se encuentra embebida dentro de dicha placa. La pared superior consiste en una placa de zafiro por la que se hace circular agua a temperatura constante, proveniente de un baño térmico. Con el fin de estudiar la formación de los patrones convectivos inducidos de forma geométrica, la pared lateral consiste en un anillo de papel filtro con una altura de  $6.50 \times 10^{-2}$  cm y  $6.72 \times 10^{-2}$  cm. Para observar la formación de los patrones inducidos por efectos dispersivos, se hace vibrar a la cavidad por medio de un pistón hidráulico. Utilizan gas de CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo.

Para realizar las visualizaciones utilizan el método shadowgraph y hacen grabaciones por medio de un sistema de adquisición de imágenes digital. Para determinar la amplitud de modulación armónica (H) o sub-armónica (S) las imágenes se capturan a aproximadamente 20Hz y para periodos de tiempo más largos se graban a una frecuencia de 0.5Hz utilizando un disparador sincronizado con el movimiento del pistón. En su trabajo Rogers et al. introducen nuevas variables adimensionales:

$$\omega = \frac{d^2}{\kappa} 2\pi f \quad \text{frecuencia de oscilación y} \quad (1.12)$$

$$\delta = \frac{\kappa^2}{gd^4} \delta' \quad \text{amplitud de desplazamiento,} \quad (1.13)$$

donde,  $d$  es la profundidad de la cavidad,  $\kappa$  difusividad térmica,  $f$  frecuencia forzada (Hz),  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\delta'$  amplitud (cm).

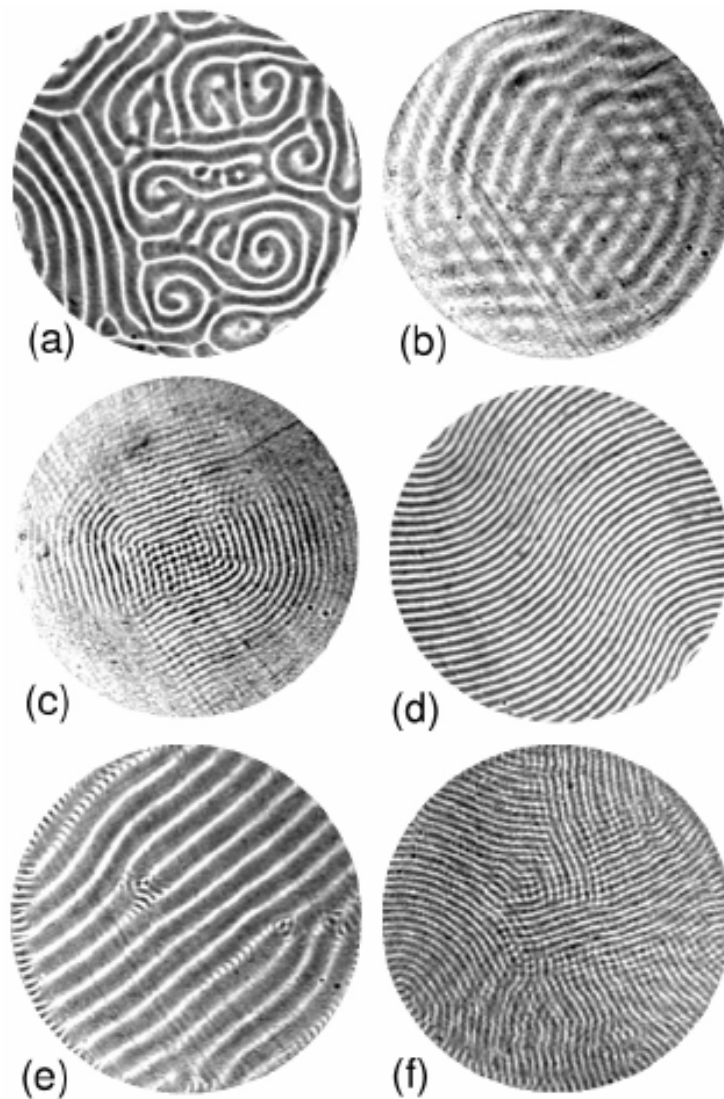


Figura 1.19. Patrones convectivos visualizados utilizando la técnica de shadowgraph, para  $Pr= 0.93$ ,  $\omega=98$ . a) Espiral armónica  $\delta=1.76\times 10^{-4}$  y  $Ra=3198$ . b) Coexistencia de rollos H y hexágonos,  $\delta=3.74\times 10^{-4}$  y  $Ra=4216$ . c) Cerca de la activación de los rollos S,  $\delta=4.26\times 10^{-4}$  y  $Ra=3958$ . d) Rollos S  $\delta=4.05\times 10^{-4}$  y  $Ra=4990$ . e) Rollos H con dominios localizados de rollos S,  $\delta=3.76\times 10^{-4}$  y  $Ra=4962$ . f) Rollos S conteniendo granos limitados cubriendo un patrón débil de rollos y celdas H,  $\delta=3.64\times 10^{-4}$  y  $Ra=5424$ . Rogers et al. [14]

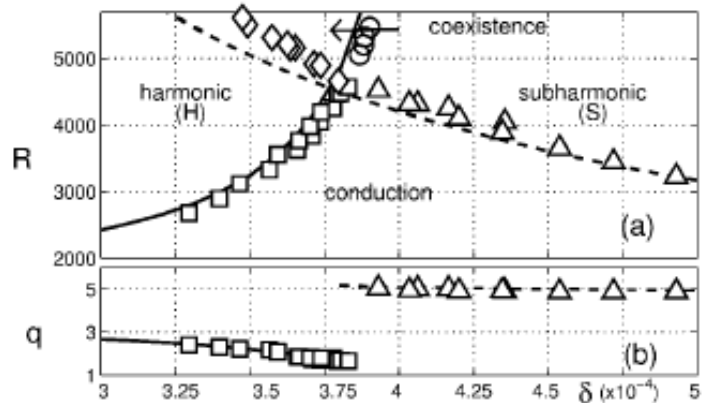


Figura 1.20. Diagrama de fase y comparación con teoría de estabilidad lineal con los experimentos para  $\omega=98$ . Rogers et al. [14]

Rogers et al. reportan que para una amplitud  $\delta$  o frecuencia de oscilación  $\omega$  pequeñas, el fluido presenta un movimiento modulado a  $\omega$  (movimiento armónico, H) y una estructura espacial inducida de forma geométrica reminiscente de la convección de Rayleigh-Bénard, Figura 1.19. Para valores suficientemente grandes de  $\delta$  o  $\omega$ , se obtienen flujos con una modulación  $\omega/2$  (sub armónico S), patrón característico de las ondas de Faraday inducidas por efectos dispersivos. Así mismo encontraron y caracterizaron una región donde las distintas escalas espaciales y temporales de los patrones de H y S interactúan para formar estados más complejos. Figura 1.19 e y f, incluyendo dominios localizados de un patrón embebido en otro; no se encontró la formación de patrones simétricos, incluso en el estado puro.

En la Figura 1.20a Se muestra el diagrama de fase muestra , el cual contiene las regiones de conducción , convección con modulaciones  $H(\omega)$  y  $S(\omega/2)$ , así como regiones donde coexisten patrones H-S. De igual forma se muestran las curvas de estabilidad marginal calculados con la teoría de estabilidad lineal, para

el estado de conducción sujeto a perturbaciones H (línea sólida) y S (línea punteada), las cuales concuerdan con los valores medidos del número de Rayleigh y número de onda ( $q$ ), Figura 1.20.b, para la activación de la convección H y S. Se compara la transición medida para la coexistencia de los estados puros H y S, con las predicciones de estabilidad marginal para la conducción.

#### **1.4 Objetivo de la tesis.**

La tesis tiene por objetivo el estudio de la evolución de los patrones convectivos generados en la cavidad de dos maneras diferentes: a) mediante un cambio brusco en el ángulo de inclinación y b) con una oscilación periódica con respecto al eje de giro de la cavidad. Como se puede observar en la revisión bibliográfica presentada con anterioridad, este es un campo poco explorado, encontrándose solo una publicación enfocada al estudio de la convección de Rayleigh-Bénard en una cavidad circular. Hasta donde se sabe, esta es la primera vez que se abordan este tipo de experimentos para cavidades cuadradas, calentadas por debajo y enfriadas por arriba.

## CAPÍTULO 2

### Definición del problema y desarrollo experimental.

#### 2.1 Definición general del problema.

La Figura 2.1 muestra la configuración del modelo experimental, que consiste en una cavidad con una relación de forma  $H/L = 1$  y  $H/W = 4$ , donde H, L y W son la altura, el largo y ancho de la cavidad, respectivamente. La cavidad se calienta por la pared inferior y se enfría por la pared superior, ambas paredes se consideran isotérmicas. La tesis tiene por objetivo el estudio de la evolución de los patrones convectivos en la cavidad generados de dos maneras diferentes: a) mediante un cambio súbito en el ángulo de inclinación y b) con una oscilación periódica con respecto al eje de giro de la cavidad. En el primer caso se considera el efecto de la magnitud del cambio en el ángulo de inclinación (amplitud de giro) y de la forma en que este cambio se da (relación de giro), y en el segundo caso se estudia la influencia de la amplitud, periodo y forma de la oscilación. En ambos casos se toma en cuenta el efecto del número de Rayleigh.

Se considera  $\theta=0^\circ$  cuando la cavidad se encuentra horizontal, es decir, la pared caliente debajo de la pared fría. Tomando como origen  $\theta=0^\circ$ , cuando la cavidad gira en sentido contrario a las manecillas del reloj se consideran ángulos negativos, es decir  $-\theta$ . Se consideran ángulos positivos,  $+\theta$ , cuando la cavidad gira en dirección de las manecillas del reloj. El eje de giro se encuentra en el centro de la cavidad.

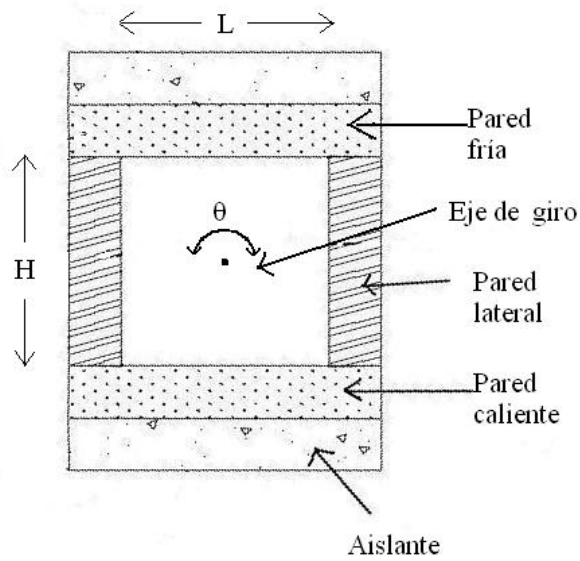


Figura 2.1. Esquema del sistema experimental.

En el estudio experimental se contempla una parte cualitativa y otra cuantitativa. En la primera solo se considera el caso de la cavidad oscilando continuamente, para los números de Rayleigh de  $3 \times 10^4$  y  $1 \times 10^5$ , una amplitud de oscilación de  $\pm 15^\circ$  y periodos de oscilación de 30, 60 y 120 minutos. Se utiliza una relación de giro cuadrada.

El estudio cuantitativo se divide a su vez en dos partes: la primera contempla el estado transitorio en los patrones convectivos generados por el cambio súbito en su ángulo de inclinación, para los números de Rayleigh de  $3 \times 10^4$  y  $1 \times 10^5$ , amplitudes de giro de  $15^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $75^\circ$ , con una duración de 10 segundos. Se utilizan dos relaciones de giro: senoidal y cuadrada. La segunda parte se dedica al efecto de la oscilación en los patrones convectivos, para el caso particular en que se hace oscilar la cavidad de  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ , con un número de Rayleigh de  $1 \times 10^5$ , un periodo de oscilación de 60 minutos y una relación de giro cuadrada.



## 2.2 Desarrollo experimental.

En el desarrollo de los experimentos se utilizó una fuente de alimentación para calentar la pared inferior de la cavidad, la cual proporciona la energía a la resistencia eléctrica, mientras que para controlar la temperatura de la pared superior se utilizó un baño térmico, el cual hace fluir agua dentro de la pared a una temperatura constante de 20°C, en contra flujo para garantizar una distribución de temperatura uniforme. Las paredes laterales fueron maquinadas en acrílico, se les dio un acabado transparente para facilitar la iluminación dentro de la cavidad; ambas tienen una conductividad térmica finita.

La cavidad está sujeta a una estructura de aluminio en forma de jaula, la cual se gira mediante de un servo motor. La cavidad se fija a una de las placas de la jaula, haciendo coincidir el eje de giro de la estructura con el centro de la cavidad,  $(H/2$  y  $L/2)$ ; en el extremo opuesto de la estructura se monta una cámara de video. El generador de plano láser se fija a la misma placa donde se monta la cavidad. La máxima amplitud alcanzada por la estructura es de 360° (+/- 180°) debido a restricciones mecánicas como la alimentación de energía a la resistencia y del flujo de agua proveniente del baño térmico. La Figura 2.2 muestra un esquema de los elementos antes mencionados.

Se utiliza una cámara de alta definición, Panasonic HDC-SD1, para grabar los eventos. Para iluminar de forma uniforme el plano medio de la cavidad,  $W/2$ , se utiliza un plano láser.

El equipo utilizado para la realización de los experimentos, puede dividirse en tres partes: modelo experimental, sistema giratorio y sistema de control de movimiento.

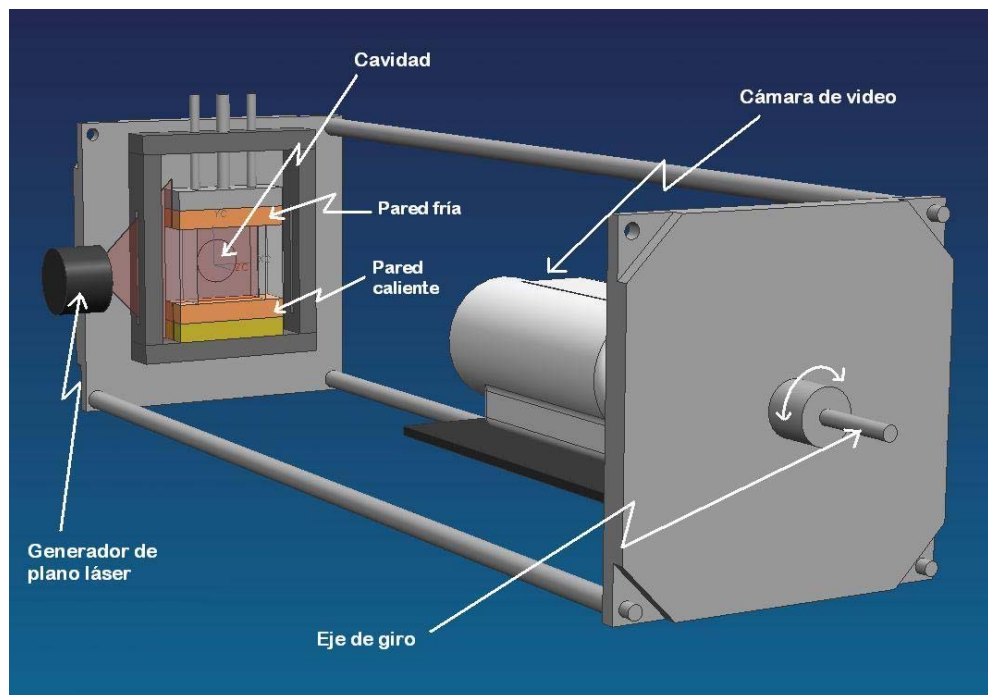


Figura 2.2. Dispositivos utilizados en los experimentos.

### 2.2.1 Modelo experimental.

El modelo experimental utilizado es una cavidad cuadrada de 4cm de alto  $\times$  4cm de ancho  $\times$  1cm de espesor. La pared caliente consiste en un bloque de cobre, en el que se maquinó un canal en donde se aloja la resistencia que calienta dicha pared por efecto Joule; para tener una distribución uniforme de temperaturas, este canal se maquina en zig-zag. De igual forma la pared fría es un bloque de cobre, en el cual se maquinaron dos barrenos por los cuales circula el agua proveniente de un baño térmico en contra flujo, para asegurar una temperatura uniforme de 20°C. Las dimensiones de ambas paredes son: 6 cm de largo  $\times$  1.9 cm de ancho  $\times$  1 cm de espesor. Las paredes laterales son bloques maquinados en acrílico, las cuales se pulieron hasta darles un acabado transparente, para facilitar la iluminación dentro de la cavidad. Sus dimensiones son: 4 cm de alto  $\times$  1.9 cm de ancho  $\times$  1 cm de espesor. Figura 2.3.

Esta cavidad se diseña de tal forma que los bloques de las paredes laterales se puedan cambiar por otros de diferente material o dimensiones, para modificar las propiedades de la pared o la razón de forma de la cavidad, respectivamente.

### **2.2.2 Sistema giratorio.**

El sistema giratorio está compuesto por dos estructuras maquinadas en aluminio y acero, sobre las cuales se monta la cavidad. La primera de estas consiste en una estructura giratoria en forma de jaula, la cual está conformada por dos placas cuadradas de aluminio de 15cm de lado y cuatro varillas redondas de acero de 50cm de longitud y 3/8 de pulgada de diámetro, dentro de la cual se montan la cavidad y la cámara de video. La cavidad se fija a una de las placas de aluminio por medio de cuatro tornillos de tal forma que su centro coincida con el eje de giro de la jaula, mientras que en la placa del extremo opuesto se coloca una placa de acero en forma de L, en la cual se monta la cámara de video; en dicha placa se maquinaron dos ranuras que sirven para alinear el eje de rotación de la cavidad con el de la cámara de video. Figura 2.4.

La estructura giratoria esta empotrada en sus extremos a la segunda estructura o base de soporte por medio de rodamientos. Esta fue maquinada completamente en aluminio y permite el acoplamiento del servo-motor con la estructura giratoria. Para corregir cualquier desnivel de la mesa donde se vayan a realizar los experimentos, se instaló un tronillo en cada una de las esquinas de las estructura de soporte. Figura 2.5.

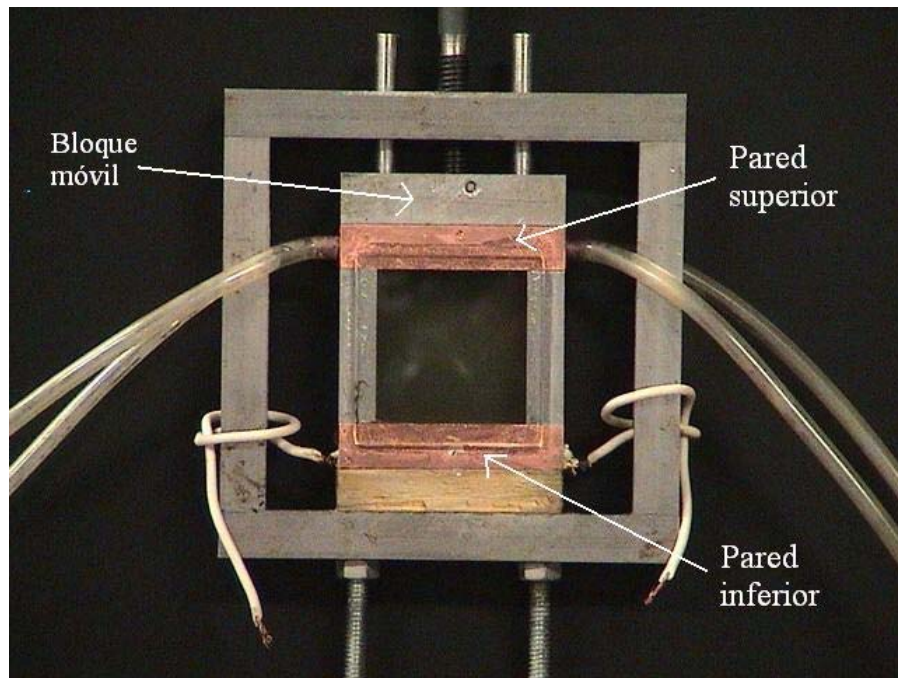


Figura 2.3. Modelo experimental.

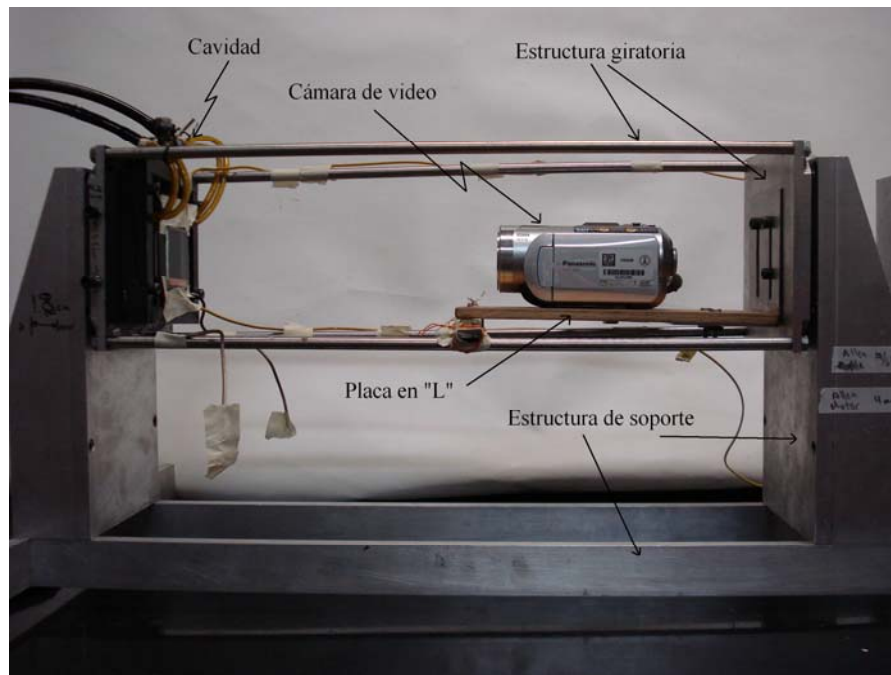


Figura 2.4. Sistema giratorio.

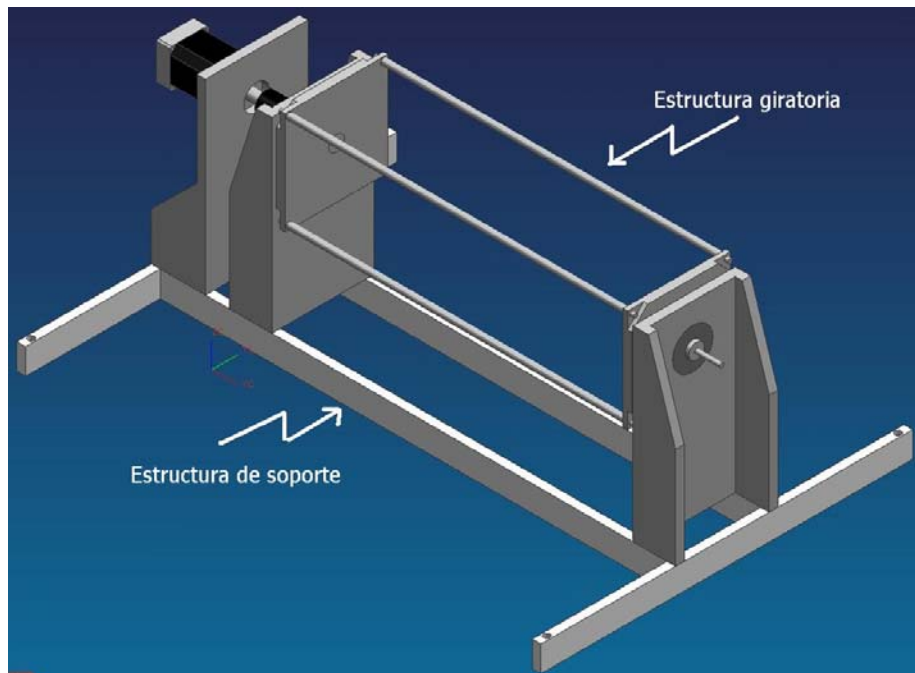


Figura 2.5. Estructura de soporte.

### 2.2.3 Sistema de control de movimiento.

El sistema de control de movimiento es el encargado de controlar el movimiento de la estructura en la que se encuentra montada la cavidad, pudiéndose modificar tanto la amplitud como frecuencia de oscilación con una precisión de  $.00225^\circ$  y  $0.01\text{seg}$ , respectivamente, logrando abarcar amplitudes de oscilación de hasta  $360^\circ$  ( $\pm 180^\circ$ ) y una frecuencia de oscilación máxima de  $5\text{osc/seg}$ . Se pueden realizar los experimentos a frecuencias y amplitudes de oscilación mayores, pero se presentan complicaciones en las conexiones para la alimentación de energía eléctrica de la resistencia, del suministro de agua a la pared superior y las conexiones de la cámara de video. A su vez el programa permite monitorear en tiempo real todas las variables involucradas. Las conexiones del sistema de control se pueden ver en la Figura 2.6.

El sistema de control de movimiento se puede subdividir a su vez en:

Etapa de potencia, compuesta por: driver BE15A8 de la marca AMC, fuente de alimentación no regulada PS16L80 de la marca AMC. Figura 2.7. Se utilizó un servomotor brushless serie E-3622 de la marca RELIENCE ELECTRIC, el cual cuenta con una cabeza reductora 23EP040 de la marca CARSON, con una relación 40:1. Para la realimentación del sistema se incorporó un encoder DA15-1000-5VLD de la marca SERVO SYSTEMS. Como protección tanto para el motor como para los instrumentos montados en la estructura se decidió utilizar un cople de la marca ROCOM CORP, el cual falla cuando se excede un torque de 75 lb/in.

Etapa de control, compuesta por: una tarjeta de control de movimiento PXI-7342 y la interface universal de movimiento UMI-7772 de National Instruments. La tarjeta de control de movimiento PXI-7342 es un controlador de gama media que puede manejar hasta dos motores al mismo tiempo, esta se encuentra instalada en un chasis PXI-1011 de la marca National Instruments, el cual es una computadora diseñada específicamente como sistema de medición y control, que posee un controlador PXI-8173 y módulos para la conexión de periféricos, que para nuestro caso es la tarjeta de control de movimiento y en caso de ser necesario se cuenta con dos tarjetas para lectura de termopar SCXI-1112, con ocho entradas cada una. El UMI-772 es un accesorio independiente que funciona como interface de conexión entre la tarjeta de control de movimiento y el driver del motor. Facilita el cableado y la conexión de las señales de control y realimentación, ya que las conexiones se realizan por medio de conectores DB. Simplifica la integración del driver, amplificador y encoder con el controlador de National Instruments. Figura 2.8.

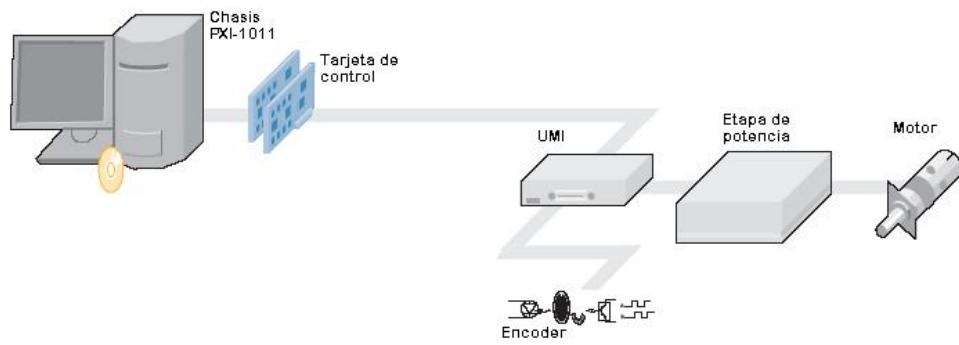


Figura 2.6. Conexiones del sistema de control de movimiento.

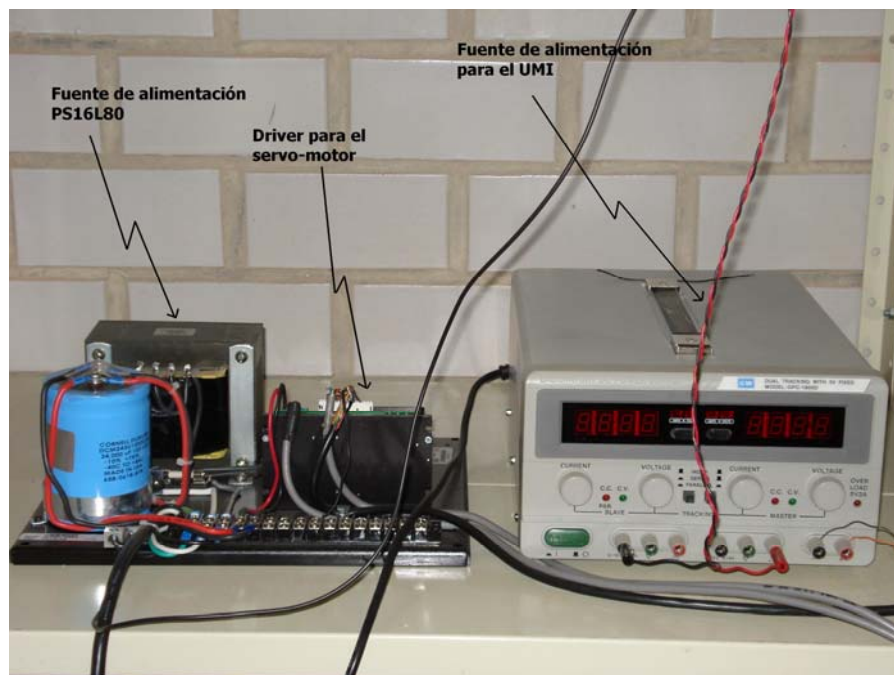


Figura 2.7. Etapa de potencia.

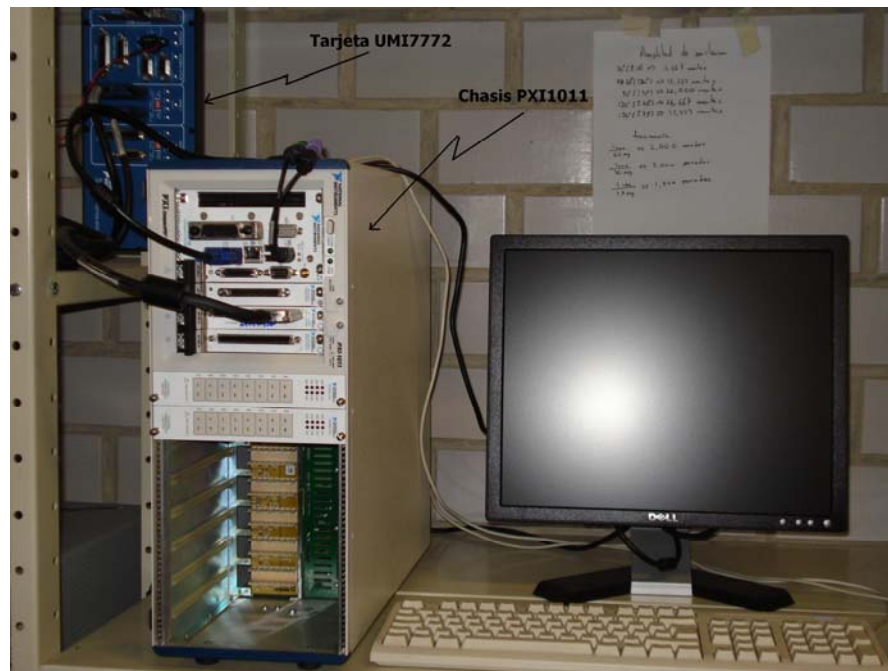


Figura 2.8. Etapa de control

Se utiliza LabVIEW como lenguaje de programación, que pertenece a la familia de lenguajes de programación G (graphics). Para propósitos del estudio experimental se realizaron dos programas de control de movimiento: el primero genera una relación de giro senoidal, mientras que el segundo genera una relación de giro cuadrada. Ambos patrones se generan automáticamente cuando se ingresan la amplitud y periodo de oscilación, en grados y segundos respectivamente. En ambos programas se pueden modificar tanto la frecuencia como la amplitud de oscilación en tiempo real, sin necesidad de reiniciar el programa. En dichos programas como protección se coloca una subrutina que detiene el motor en caso de emergencia. Como protección adicional se programaron límites de avance y retroceso, los cuales no dejan oscilar al motor



mas allá de  $320^\circ$  ( $\theta = \pm 160^\circ$ ). El código del programa se presenta en el apéndice A.

### 2.3 Preparación de los experimentos.

La cavidad usada en este estudio experimental es la misma utilizada por Chávez et al. [15]. Se cambiaron las paredes laterales de cobre por unas maquinadas en acrílico, las cuales fueron pulidas hasta obtener un acabado transparente, para iluminar el plano medio de la cavidad, para la visualización y obtención del campo de velocidades. Figura 2.3. Se utilizan partículas de poliamida de  $20\mu\text{m}$  de diámetro, debido a que la poliamida posee una densidad similar a la de la glicerina. Para observar los patrones de flujo en la pared frontal de la cavidad se utilizó un cristal de 3mm de espesor, en tanto que, para tener mejor contraste en las visualizaciones, para la pared posterior se decidió usar una película de acetato pintada de color negro.

El ensamblado de la cavidad se realiza en un marco de acero de 12cm de lado. Se comienza fijando un bloque de madera (aislante) y el bloque que contiene la resistencia (pared caliente), a la parte inferior del marco, teniendo cuidado que ambos bloques se encuentren colocados en la parte central del marco. Posteriormente se coloca el bloque superior (pared fría) a un bloque móvil de 6cm de largo  $\times$  1.9cm de ancho y 1cm de espesor, dicho bloque está ensamblado a un tornillo que se encuentra sostenido a la parte superior del marco y que le permite un desplazamiento vertical. Finalmente se colocan las paredes laterales, auxiliándose de un bloque de acrílico, en forma de pirámide escalonada, que tiene las dimensiones de la cavidad. Las paredes laterales quedan fijas a presión entre las paredes caliente y fría cuando se baja el bloque móvil. Una vez ensamblada se aplica barniz transparente en las esquinas internas de la cavidad para evitar fugas de fluido de trabajo. Figura 2.3.

En la esquina superior derecha se hace un pequeño agujero, con un alfiler, por el cual se inyecta la glicerina sembrada con partículas de poliamida; esta operación se realiza con una jeringa con aguja de plástico (vena forte). El vaciado de la glicerina tiene que ser lentamente, para que no se forme burbujas de aire en el preparado o en las esquinas de la cavidad. Es preferible mantener inclinada la cavidad, para que esta se llene de forma uniforme y evitar que en la pared posterior se formen venas de aire. Una vez que la cavidad está completamente llena, se deja que salga el exceso de glicerina, para finalmente limpiar el área alrededor del agujero y cerrarlo con cinta adhesiva transparente.

Una vez llena la cavidad con el preparado de glicerina y partículas de poliamida, esta se fija a una de las caras de la estructura giratoria con cuatro tornillos, mientras que en el lado opuesto de dicha estructura se coloca la cámara de video en la placa metálica en forma de L. Se insertan termopares tipo K en los barrenos hechos en las paredes caliente y fría, los cuales fueron previamente llenados con una pasta de alta conductividad para garantizar una lectura correcta de la temperatura, los termopares se fijaron a la jaula con cinta adhesiva para evitar vibraciones, lo que provocaría errores en las lecturas. Los termopares se pueden conectar a un termómetro digital de la marca FLUKE o a la tarjeta NI PXI-1112, teniéndose una mejor respuesta y resolución en esta última, además que se puede ver gráficamente el comportamiento de la temperatura con el tiempo en las paredes caliente y fría.

Finalmente se conectaron las mangueras provenientes del baño térmico a la pared fría, asegurándose que el agua circule en contra flujo a través de los canales internos para tener un mejor enfriamiento de la superficie. La fuente de alimentación se conectó a las terminales de la resistencia alojada en la pared caliente, y la alimentación eléctrica de la cámara de video y la salida de video hacia la tarjeta de adquisición de video.

## **2.4 Desarrollo de los experimentos.**

Debido a demoras en la adquisición del equipo indispensable para la realización de los experimentos, el “Sistema para la visualización de flujos” de la marca OZ OPTICS, y a la falta del software de PIV de la compañía DANTEC DYNAMICS, el estudio experimental se dividió en dos partes: la primera fue un estudio cualitativo, mientras que la segunda fue un estudio cuantitativo. En el estudio cualitativo se utilizó una varilla de vidrio para generar el plano de iluminación y se sólo realizaron visualizaciones de los patrones convectivos dentro de la cavidad. En este estudio sólo se considera el caso de la cavidad oscilando a periodos grandes. En el estudio cuantitativo se utilizó el “Sistema de visualización de flujos” y el software PIV de la compañía DANTEC DYNAMICS para obtener los campos de velocidad. A su vez el estudio cuantitativo, se divide en dos partes: la primera se enfoca al estudio del estado transitorio de los patrones convectivos dentro de la cavidad, cuando esta experimenta un cambio súbito en su inclinación, de  $-\theta$  a  $+\theta$ . La segunda parte se centra en el estudio del comportamiento de los patrones de flujo dentro de la cavidad cuando esta se encuentra oscilando, de  $-\theta$  a  $+\theta$  continuamente.

### **2.4.1 Estudio cualitativo.**

Antes de comenzar cualquier experimento, se revisa cuidadosamente la cavidad y las conexiones eléctricas, del baño térmico y de la tarjeta de adquisición de video, con el fin de evitar cualquier incidente. Hecho lo anterior, se pone en funcionamiento el baño térmico para establecer la temperatura de la pared fría

( $T_f$ ). Estabilizada  $T_f$ , se enciende la fuente de alimentación para elevar la temperatura de las pared caliente ( $T_c$ ) hasta alcanzar el número de Rayleigh deseado.

Una vez que el sistema se encuentra en el orden del número de Rayleigh deseado se enciende el sistema de control de movimiento y en el programa se fijan la amplitud y la frecuencia de oscilación deseados para generar una relación de oscilación cuadrada, partiendo siempre de una posición horizontal; es decir, pared caliente abajo y pared fría arriba (HOME).

Dependiendo del periodo de oscilación, se deja que la cavidad oscile de 10 a 24 horas antes de realizar la grabación del evento. Transcurrido dicho tiempo, se ilumina en el plano medio de la cavidad con una hoja láser generado con la varilla de vidrio. Por limitaciones en el almacenamiento de video en la computadora, se graba una sola oscilación de la cavidad.

Una vez finalizada la grabación del experimento, se apaga la fuente que proporciona la energía a la resistencia alojada en la pared inferior. Para apagar el sistema de control de movimiento, se comienza por detener el programa que genera la relación de giro cuadrada y mandando la cavidad a HOME. Para evitar cualquier accidente se deshabilita el motor por medio del software MAX que se encarga de controlar todas las tarjetas conectadas en el chasis PXI-1011 de National Instruments, que en nuestro caso deshabilita la tarjeta de control de movimiento NI PXI-7342. Finalmente se desconecta la fuente de alimentación de la etapa de potencia. El baño térmico se deja funcionando hasta que la temperatura dentro de la cavidad sea uniforme ( $T_c$  sea igual a  $T_f$ ), para garantizar que se parte del reposo, es decir, que la velocidad del fluido dentro de la cavidad es cero. El tiempo para alcanzar  $T_f$  varía dependiendo del número de Rayleigh manejado en el experimento recién finalizado.

### 2.4.2 Estudio cuantitativo.

De igual forma que en el estudio cualitativo, se revisan todas las conexiones del equipo. Hecho lo anterior se enciende el sistema de control de movimiento y con la ayuda del software MAX (Measurement & Automation Explorer), instalado en el equipo de National Instruments, se posiciona a la cavidad al ángulo de inclinación para dicho experimento. Establecida la posición inicial de la cavidad, se enciende el baño térmico y se espera a que se establezca la temperatura de la pared fría ( $T_f$ ). Estabilizada  $T_f$  se pone en funcionamiento la fuente de alimentación para elevar la temperatura de la pared caliente ( $T_c$ ) hasta que se establezca la diferencia de temperaturas correspondiente al número de Rayleigh fijado para el experimento.

Establecido el número de Rayleigh, se deja que el sistema trabaje por aproximadamente una hora, para garantizar que se encuentra en el estado permanente, corrigiendo las pequeñas variaciones de temperatura que se puedan presentar. Una vez que el sistema se encuentra en el orden del número de Rayleigh deseado, se introducen los valores de la amplitud y el periodo de oscilación deseados en el programa que genera el perfil de velocidad senoidal o cuadrado, según sea el caso.

Como se mencionó previamente, el estudio cuantitativo se dividió en dos partes, el desarrollo experimental de ambas es el mismo hasta el párrafo anterior, pero de aquí en adelante, cada una tiene un procedimiento y programa de control de movimiento propio.

La primera parte, se enfoca al estudio del estado transitorio de los patrones convectivos dentro de la cavidad, cuando esta cambia súbitamente de ángulo de inclinación. Una vez establecido el número de Rayleigh se enciende la cámara de

video y el “Sistema de visualización de flujos” de la marca OZ OPTICS, para iluminar el plano medio de la cavidad. Con el propósito de estudiar el comportamiento del flujo convectivo cuando la cavidad se encuentra en  $-0^\circ$ , la grabación del evento comienza 30 segundos antes de ejecutar el programa que mueve a la cavidad de su posición original ( $-0^\circ$ ) a su destino ( $+0^\circ$ ), en el tiempo y la relación de giro previamente seleccionados. Una vez que la cavidad llega a su destino, el programa mantiene fija a la cavidad en  $+0^\circ$ , se deja que el evento transcurra de 30min a 45min, antes de detener la grabación. Entre mayor sea el ángulo de inclinación, menor es el tiempo de grabación.

La segunda parte se centra en el estudio del comportamiento de los patrones de flujo dentro de la cavidad, cuando esta se encuentra oscilando. Esta última parte se desarrolla para un número de Rayleigh de  $1 \times 10^5$ , una relación de giro cuadrada, un periodo y amplitud de oscilación de una hora y  $45^\circ$ , respectivamente. Establecido el número de Rayleigh, se enciende la cámara de video y el “Sistema de visualización de flujos” de la marca OZ OPTICS, para iluminar el plano medio de la cavidad. Con el propósito de estudiar el comportamiento del flujo convectivo dentro de la cavidad cuando esta se encuentra en  $-45^\circ$ , la grabación del evento comienza 30 segundos antes de ejecutar el programa que mantiene oscilando a la cavidad. Se graban tres oscilaciones completas.

Finalizada la grabación del experimento, se detiene el programa que mantiene oscilando la cavidad, con el software MAX se manda a la cavidad a la nueva posición  $-0^\circ$ , para el siguiente experimento y se apaga el equipo siguiendo el mismo procedimiento descrito en el estudio cualitativo. Finalmente se apaga el sistema de iluminación de la cavidad. De igual forma, se deja encendido el baño térmico para que la temperatura dentro de la cavidad se establezca en  $T_f$  para garantizar que se parte del reposo en el siguiente experimento.

En todos los experimentos realizados la pared caliente siempre se encuentra debajo de la pared fría. Todo el equipo utilizado fue calibrado previamente para obtener los diferentes números de Rayleigh, a partir de una diferencia de temperaturas ( $\Delta T$ ). Ver apéndice B.

## **2.5 Obtención de resultados.**

### **2.5.1 Generalidades sobre el método PIV.**

En la actualidad existen sistemas PIV (velocimetría por imágenes de partículas) que permiten obtener campos de velocidad en tiempo real en dos dimensiones y con un arreglo estereoscópico de cámaras CCD se pueden obtener campos de velocidad tridimensionales. En equipos más sofisticados se puede obtener un mapeo en volumen del campo de velocidades. Esto se logra montando el equipo de PIV en un sistema de posicionamiento, el cual se desplaza en uno, dos o hasta tres ejes coordenados. Finalmente con ayuda de software se acoplan los campos de velocidad, logrando así el mapeo en volumen de los campos de velocidad.

Debido a las características del flujo a estudiar y al equipo con que se cuenta en el laboratorio, se decide utilizar una versión simplificada del método PIV, el cual nos permite obtener el campo de velocidades a partir de pares de imágenes, las cuales pueden ser obtenidas a partir de un video o tomadas directamente de la región de estudio. Los vectores de velocidad se obtienen a partir del desplazamiento de las partículas con las que fue sembrado el fluido,  $\Delta X$ , y conociendo el tiempo entre imágenes,  $\Delta t$ , se calcula la velocidad  $V = \Delta X / \Delta t$ . En el análisis se pueden utilizar diferentes tipos de correlación para obtener el desplazamiento de las partículas.



Figura 2.9. Sistema de iluminación para el método PIV.

### 2.5.2 Sistema PIV utilizado en los experimentos.

Sistema de iluminación, que consta de un láser de la marca Spectra-Physics con una potencia de 35mW y una longitud de onda de 632.8nm, y el “Sistema para la visualización de flujos” de la marca OZ OPTICS, el cual consta de un cople de láser a fibra óptica, que se conecta a la salida del láser. En este cople se instala el receptáculo FC para la fibra óptica, dentro del cual se encuentra el juego de lentes de enfoque, una fibra óptica mono-modo de 4 metros de longitud con forro blindado y conectores súper FC/PC en ambos extremos; un generador de plano para fibra óptica, con un ángulo de apertura de  $45^\circ$  y receptáculo FC. Este generador de plano se instala en la estructura en la que se encuentra montada la cavidad, por medio de una placa de acrílico, Figuras 2.4 y 2.9.

Sistema de captura: Se utilizó una cámara de alta definición Panasonic HDC-SD1, la cual utiliza como medio de almacenamiento memorias SDHC de hasta 4BG de capacidad, que no posee dispositivos móviles para la grabación, lo que la hace una buena opción dado que el sistema al oscilar genera fuerzas que podrían afectar a dichos dispositivos. Esta cámara tiene una autonomía de grabación en



alta definición de noventa minutos como máximo. Para poder observar el comportamiento del flujo en tiempo real, se utilizan las salidas de audio y video A/V de dicha cámara, la cual se conecta a la tarjeta para captura de video Pinnacle Studio 700 y esta a su vez a una computadora que con la ayuda del software Pinnacle Studio se muestra en monitor. Esto ayuda a observar las condiciones de iluminación dentro de la cavidad y modificarlas en caso de ser necesario. Por otro lado este software facilita el almacenamiento de la señal de video en la computadora para su posterior estudio, por lo que ya no es necesario el desmontar la cámara del dispositivo experimental, evitando así perturbar el flujo dentro de la cavidad.

### **2.5.3 Procedimiento para obtener los resultados.**

Una vez grabado el video, se procede a obtener los pares de imágenes que van a ser procesados por el software de PIV FlowManager de la compañía DANTEC Dynamics. Para garantizar que el tiempo entre imágenes sea el adecuado, se debe de asegurar que el desplazamiento de una partícula entre las dos imágenes se encuentra dentro de un área de interrogación de 3 a 16 píxeles. Las imágenes se obtienen con el programa Pinnacle Studio 10.5, en formato TIF y un tamaño de 853 X 480 píxeles, el número de pares de imágenes varía dependiendo de la duración de cada experimento.

Con los pares de imágenes, se procede a obtener los campos de velocidad con la ayuda del software FlowManager, al cual se introducen diversos parámetros como son: tamaño de las partículas utilizadas, tamaño de la malla, el tipo de cámara utilizada y el tipo de correlación, entre otras. Se programó al software para que estimara los campos de velocidad con un tiempo de 0.1 segundos entre

imágenes. Se aplican mascarar para eliminar las zonas que no son de interés y disminuir el tiempo de procesamiento de cada par de imágenes. Se prueban varios tipos de mallado, correlaciones y filtros, hasta alcanzar una buena validación. El área de interés fue dividida en una malla uniforme de  $50 \times 27$  sub secciones llamadas áreas de interrogación. Se aplica una correlación cruzada entre las dos imágenes, se puede utilizar la correlación adaptativa, pero requiere más tiempo de procesamiento sin presentarse mejoras significativas. Una vez que se alcanza una buena validación, se aplican las mismas características al conjunto de imágenes correspondiente al evento.

Este software puede graficar los campos de velocidad, líneas de corriente, superficies de iso-velocidad y la traza, pero las herramientas para graficar son limitadas, por lo que se optó por exportar los datos en un archivo con extensión .DAT. Este archivo contiene las posiciones  $(x, y)$  y las componentes de la velocidad  $(u, v)$  en (m) y (m/s), respectivamente. Por otro lado, los archivos obtenidos contienen a una malla más grande de la que originalmente se había generado al aplicar la correlación cruzada, los puntos agregados por el software son ceros los cuales hay que eliminar. Se había comentado que el tiempo entre imágenes, con el que fue programado el software, es de 0.1 segundos, por lo que hay que reescalar las componentes de la velocidad.

Para eliminar los ceros generados, reescalar las componentes de la velocidad y calcular el módulo de la velocidad se utiliza un programa hecho en Visual Fortran, el cual emplea las dimensiones originales de la cavidad y el tiempo entre imágenes para calcular las velocidades reales, a su vez en este programa se generaron sub rutinas que filtran los datos para eliminar el ruido (componentes de velocidad cuyo valor se mucho mayor al del flujo) y calculan la función de corriente. Los datos son arrojados en un archivo con extensión .PLT y otro con extensión .DAT. El archivo con extensión .PLT se utiliza para obtener las gráficas de función de corriente, los campos de vectores, de iso-velocidad y la traza del flujo

dentro de la cavidad, con el programa TECPLOT. Mientras que el archivo con extensión .DAT se utiliza para obtener perfiles de velocidad en la dirección  $x$  e  $y$  en cada evento utilizando el software ORIGIN. Con ayuda de estos perfiles se puede observar la evolución de los patrones convectivos dentro de la cavidad, conforme esta va oscilando y de esta manera hacer una mejor comparación entre cada evento.

## CAPÍTULO 3

### Resultados.

Como ya se mencionó, esta tesis tiene por objeto el estudio de la convección natural dentro de una cavidad cuando esta se encuentra oscilando o presenta un cambio súbito en su ángulo de inclinación. Los resultados se presentan en términos del número de Rayleigh, del número de Reynolds oscilatorio  $Re_o$ , periodo y amplitud de oscilación y relación de giro, para una cavidad con una relación de forma  $H/L$  de 1 y  $H/W$  de 4.

También se señaló que el estudio se dividió en dos partes: en la primera, el estudio cualitativo, se presentan esquemas de los patrones convectivos dentro de la cavidad a diferentes periodos de oscilación y números de Rayleigh. Para la segunda parte, estudio cuantitativo, los resultados se presentan de forma gráfica: superficies de iso-velocidad, líneas de corriente y perfiles de velocidad en la dirección  $x$  e  $y$ . En la esquina superior izquierda de todas las imágenes se presenta el tiempo o ángulo de inclinación al que pertenece. Los perfiles de velocidad en la dirección  $x$  fueron tomados en el plano vertical  $x/L = 0.5$ , mientras que para la dirección  $y$  se tomo el plano horizontal  $y/L = 0.5$ , a diferentes tiempos.

Para el estudio cualitativo se ordenan los datos para observar el efecto del número de Rayleigh y el periodo de oscilación, mientras que en el estudio cuantitativo, los resultados se ordenan para que se pueda analizar el efecto de la relación de giro, del número de Rayleigh y de la amplitud de giro en el proceso evolutivo del patrón convectivo dentro de la cavidad.

### 3.1 Estudio cualitativo.

#### 3.1.1 Efecto del número de Rayleigh, cuando la cavidad se encuentra oscilando.

Todos los experimentos se realizan para una amplitud de oscilación de  $30^\circ$ , es decir  $\pm 15^\circ$ . Los esquemas de los patrones de flujo obtenidos muestran una gran dependencia del número de Rayleigh. Para un periodo de oscilación de 30 minutos, un número de Rayleigh de  $3 \times 10^4$  y  $Re_o = 3.658 \times 10^{-3}$ , Figura 3.1, cuando la cavidad se encuentra en posición horizontal,  $\theta = 0^\circ$ , se presenta una celda convectiva principal alargada de la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha, que gira en dirección de las manecillas del reloj y dos celdas convectivas secundarias en la esquina superior izquierda e inferior derecha, ambas giran en sentido contrario a las manecillas del reloj. Conforme la cavidad se desplaza a  $\theta = +15^\circ$ , el tamaño de las celdas convectivas secundarias disminuye hasta que desaparecen en  $\theta = +15^\circ$ , a su vez la celda convectiva principal se ensancha hacia las esquinas superior izquierda e inferior derecha volviéndose más simétrica. Del trayecto de  $\theta = +15^\circ$  a  $\theta = 0^\circ$ , la celda convectiva no cambia significativamente. De  $\theta = 0^\circ$  a  $\theta = -15^\circ$ , nuevamente aparecen las celdas convectivas secundarias, las cuales van creciendo hasta tener un tamaño considerable, la celda convectiva secundaria superior es más grande que la inferior. Mientras la cavidad gira de  $\theta = -15^\circ$  a  $\theta = 0^\circ$ , el tamaño de las celdas convectivas vuelve a disminuir, presentándose una estructura similar a la inicial en  $\theta = 0^\circ$ .

Para  $Ra = 1 \times 10^5$ , un  $Re_o = 5.514 \times 10^{-3}$  y un periodo de oscilación de 30 minutos, Figura 3.2, se parte nuevamente de  $\theta = 0^\circ$ , se presenta una celda convectiva principal, que gira en sentido contrario de las manecillas del reloj, y una celda convectiva secundaria de tamaño considerable en la esquina superior derecha, que gira en sentido de las manecillas del reloj. Conforme la cavidad se desplaza a  $\theta = +15^\circ$ , la celda convectiva secundaria crece llegando a tener el mismo tamaño que la celda convectiva principal en  $\theta = +15^\circ$ , ambas celdas convectivas tienen forma triangular y el límite entre ambas es una diagonal que corre de la esquina

inferior izquierda a la esquina superior derecha. En el recorrido de  $\theta=+15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , se invierten los papeles; es decir, la celda convectiva secundaria se convierte en la celda convectiva principal y la celda convectiva principal se convierte en la secundaria, ubicándose ésta última en la esquina superior izquierda. Del trayecto de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=-15^\circ$ , ambas celdas convectivas presentan el mismo tamaño y en  $\theta=-15^\circ$  se presentan dos celdas convectivas simétricas. Conforme la cavidad se desplaza de  $\theta=-15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , la celda convectiva que se encuentra en el lado izquierdo de la cavidad crece hasta que en  $\theta=0^\circ$  se tiene nuevamente la configuración inicial.

Para un periodo de oscilación de 60 minutos,  $Ra=3 \times 10^4$  y  $Re_o=1.828 \times 10^{-3}$ , Figura 3.3, se parte de  $\theta=0^\circ$ , en donde se presenta una celda convectiva principal que gira en el sentido de las manecillas del reloj, la cual se encuentra alargada en la diagonal que corre de la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha, y dos celdas convectivas secundarias ubicadas en la esquina superior izquierda y en la esquina inferior derecha, que giran en sentido contrario a las manecillas del reloj. Conforme desplazamos la cavidad a  $\theta=+15^\circ$ , las celdas convectivas secundarias desaparecen y la principal se vuelve más simétrica. Del trayecto de  $\theta=+15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , no se presentan cambios significativos, hasta en  $\theta=0^\circ$ , donde nuevamente vuelven a aparecer las celdas convectivas secundarias. Mientras la cavidad se desplaza de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=-15^\circ$ , las celdas convectivas secundarias aumentan de tamaño, las superior es ligeramente más grande que la inferior. De  $\theta=-15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$  las celdas convectivas disminuyen de tamaño, llegándose nuevamente a la estructura original en  $\theta=0^\circ$ .

Con un  $Ra=1 \times 10^5$ , Figura 3.4, un  $Re_o=2.756 \times 10^{-3}$  y un periodo de oscilación de 60 minutos la celda convectiva presenta el siguiente desarrollo. Cuando la cavidad se encuentra en  $\theta=0^\circ$ , se presenta una celda convectiva principal que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj y dos celdas secundarias muy pequeñas, ubicadas en la esquina superior derecha y esquina inferior izquierda, con forme la cavidad gira hacia  $\theta=+15^\circ$ , el patrón convectivo se vuelve cada vez más complejo, presentándose hasta cuatro celdas convectivas dentro de la cavidad, las cuales presentan diferentes tamaños y sentidos de giro. En  $\theta=+15^\circ$

se tiene una celda convectiva principal que gira en sentido de las manecillas del reloj y dos celdas convectivas secundarias, ubicadas en las esquinas superior izquierda e inferior derecha. El tamaño de la celda convectiva secundaria superior es significativamente mayor a la inferior. Del trayecto de  $\theta=+15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , el tamaño de las celdas convectivas secundarias disminuye drásticamente hasta casi desaparecer. De  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=-15^\circ$ , la celda convectiva secundaria ubicada en la esquina superior derecha, incrementa su tamaño, al grado de convertirse en la celda convectiva principal. Cuando la cavidad esta en  $\theta=-15^\circ$ , se presenta una celda convectiva principal que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj y una celda convectiva secundaria de tamaño considerable, ubicada en la esquina superior derecha, con sentido de giro igual al de las manecillas del reloj. Conforme la cavidad gira de  $\theta=-15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , la celda convectiva secundaria disminuye de tamaño y la principal llega a ocupar toda la cavidad, cuando la cavidad llega a  $\theta=0^\circ$ , presentándose así una estructura similar a la inicial.

Para un periodo de oscilación de 120 minutos, un  $Ra=3 \times 10^4$  y un  $Re_o=0.914 \times 10^{-3}$ , Figura 3.5, para  $\theta=0^\circ$  se presenta inicialmente dentro de la cavidad una celda convectiva principal que gira en sentido contrario de las manecillas del reloj y dos celdas convectivas secundarias, ubicadas en la esquina superior derecha e inferior izquierda. Conforme la cavidad se desplaza de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=+15^\circ$ , las celdas convectivas secundarias aumentan de tamaño y para  $\theta=+15^\circ$ , la celda convectiva secundaria de la esquina superior derecha esta apunto de desplazar a la celda convectiva principal, e incluso le gana en tamaño. Del trayecto de  $\theta=+15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , el tamaño de la celda convectiva secundaria se incrementa y se convierte en la celda convectiva principal, cuando la cavidad llega a  $\theta=0^\circ$ , aparecen nuevamente dos celdas convectivas secundarias, ubicadas en la esquina superior izquierda y la inferior derecha. Cuando la cavidad se desplaza de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=-15^\circ$ , la celda convectiva secundaria que se encuentra en la esquina superior crece y se desplaza sobre la pared lateral y posteriormente a la pared caliente, mientras que la que se encuentra en la esquina inferior tiende a desaparecer. Cuando la cavidad se encuentra en  $\theta=-15^\circ$ , la celda convectiva

secundaria superior ha superado en tamaño a la celda convectiva principal y desplazándola a la esquina superior derecha. Cuando la celda se desplaza al ángulo de inclinación inicial  $\theta=0^\circ$ , la celda convectiva secundaria superior desplaza a la principal y se convierte en la celda convectiva principal, invirtiéndose nuevamente el sentido de giro del flujo dentro de la cavidad. Para  $\theta=0^\circ$ , que es el ángulo de inclinación inicial, nuevamente vuelven a aparecer las celdas convectivas secundarias en la esquina superior derecha e inferior izquierda, llegando así al flujo convectivo inicial.

Para el mismo periodo de oscilación, pero con un  $Ra=1\times 10^5$  y un  $Re_o=1.378\times 10^{-3}$ , Figura 3.6, se parte de  $\theta=0^\circ$ , en donde se presenta una celda convectiva principal que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj y una celda convectiva secundaria en la esquina superior derecha. Con forme la cavidad se mueve hacia  $\theta=+15^\circ$ , la celda convectiva secundaria aumenta de tamaño y cuando la cavidad llega a  $\theta=+15^\circ$ , la celda convectiva secundaria crece tanto que se vuelve la principal y la principal se convierte en la secundaria, esta última se ubica en la esquina superior izquierda y tiene un tamaño muy pequeño. En el trayecto de  $\theta=+15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , se mantiene el sentido de giro de la celda convectiva, llegando a desaparecer por un periodo de tiempo la celda convectiva secundaria pero cuando la cavidad esta en  $\theta=0^\circ$ , esta vuelve a aparecer en la esquina superior izquierda. De  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=-15^\circ$ , la celda convectiva secundaria, que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj aumenta de tamaño y la celda convectiva principal disminuye de tamaño, invirtiéndose nuevamente el sentido de giro del flujo convectivo. Del trayecto de  $\theta=-15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$  el flujo convectivo dentro de la cavidad se mantiene, teniendo se el flujo el flujo convectivo inicial.

El número de Rayleigh tiene un efecto significativo sobre los patrones convectivos, ya que para un  $Ra=3\times 10^4$  la celda convectiva principal se presenta un sentido de giro en el sentido de las manecillas del reloj el cual no cambia nunca, excepto para un periodo de oscilación de 120 minutos. Mientras que para un  $Ra=1\times 10^5$ , se presenta una celda convectiva principal con un sentido de giro contrario a las manecillas del reloj y una celda convectiva secundaria ubicada en la esquina superior derecha. Con forme la cavidad oscila ambas celdas



convectivas compiten entre sí, invirtiéndose el sentido de giro del flujo principal dentro de la cavidad en el trayecto de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=+15^\circ$  y de  $\theta=+15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ . En el recorrido de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=-15^\circ$  y de  $\theta=-15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , nuevamente el sentido de giro se invierte llegando al patrón de flujo inicial, para todos los periodos de oscilación

### **3.1.2 Efecto del periodo de oscilación.**

Se considera al número de Rayleigh constante, mientras que el periodo de oscilación varía. Para  $Ra=3 \times 10^4$  el periodo de oscilación juega un papel muy importante en la evolución del patrón de flujo que se forma dentro de la cavidad. Para un periodo de oscilación de 30 minutos, Figura 3.1, se presenta una celda convectiva principal, que gira en el sentido de las manecillas del reloj, y dos secundarias, con un sentido de giro contrario a las manecillas del reloj, localizadas en la esquina superior izquierda e inferior derecha, conforme la cavidad oscila el tamaño de estas últimas aumenta, llegando a tener un tamaño considerable, sin que se llegue a invertir el sentido de giro flujo dentro de la cavidad.

Cuando se incrementa el periodo de oscilación a 60 minutos, Figura 3.3, la evolución del patrón de flujo dentro de la cavidad es básicamente el mismo, el tamaño de las celdas convectivas secundarias llega a ser ligeramente mayor que para un periodo de 30 minutos.

Para un periodo de oscilación de 120 minutos, Figura 3.5, el efecto es más importante ya que el patrón de flujo dentro de la cavidad cambia completamente, ya que las celdas convectivas secundarias tienen el tiempo suficiente para aumentar de tamaño. Para  $\theta=0^\circ$  se presenta una celda convectiva principal que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj y dos celdas convectivas secundarias, localizadas en la esquina superior derecha e inferior izquierda, con un sentido de giro inverso. Cuando la cavidad se desplaza de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=+15^\circ$  ida y vuelta (de  $0^\circ$  a  $+15^\circ$  y de  $+15^\circ$  a  $0^\circ$ ), la celda convectiva secundaria que se

encuentra en la esquina superior derecha crece a tal grado que se convierte en la celda convectiva principal y cuando regresa a  $\theta=0^\circ$  el patrón convectivo es similar al inicial, pero como si lo viésemos reflejado en un espejo. Para el trayecto de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=-15^\circ$  ida y vuelta (de  $0^\circ$  a  $+15^\circ$  y de  $+15^\circ$  a  $0^\circ$ ), la celda convectiva secundaria ubicada en la esquina superior izquierda aumenta de tamaño paulatinamente de tamaño hasta convertirse en la celda convectiva principal y cuando la cavidad llega nuevamente a  $\theta=0^\circ$ , dentro de la cavidad se presenta nuevamente el patrón convectivo inicial, es decir una celda convectiva principal con sentido de giro contrario a las manecillas del reloj y dos celdas convectivas secundarias en las esquinas superior derecha e inferior izquierda, ambas con sentido de giro igual al de las manecillas del reloj,

Para  $Ra=1 \times 10^5$ , nuevamente el periodo de oscilación juega un papel muy importante en la evolución del patrón convectivo dentro de la cavidad. Para tiempos de oscilación cortos, de 30 minutos, Figura 3.2, se presenta una estructura convectiva con una celda convectiva principal y una celda convectiva secundaria localizada en la esquina superior derecha. La celda convectiva principal tiene un sentido de giro contrario al de las manecillas del reloj, mientras que la celda convectiva secundaria presenta un sentido de giro inverso. Conforme la cavidad oscila de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=+15^\circ$ , la celda convectiva secundaria crece hasta tener el mismo tamaño de la celda convectiva principal, ambas tienen forma triangular y la interfaz entre ambas es la diagonal que corre de la esquina inferior izquierda a la superior derecha. Cuando la cavidad gira de  $\theta=+15^\circ$  a  $\theta=0^\circ$ , la celda convectiva secundaria desplaza paulatinamente a la principal, y cuando la cavidad llega a  $\theta=0^\circ$  la celda convectiva ha desplazado completamente a la principal, invirtiéndose así los papeles, es decir la celda convectiva principal se convierte en la secundaria y viceversa, es como si viésemos el patrón convectivo original reflejado en un espejo. En el trayecto de  $\theta=0^\circ$  a  $\theta=-15^\circ$ , basándonos en el patrón de flujo anterior, de nuevo las celdas convectivas principal y secundaria compiten y cuando la cavidad llega a  $\theta=-15^\circ$ , ambas celdas convectivas son simétricas respecto al plano medio vertical de la cavidad. De

$\theta = -15^\circ$  a  $\theta = 0^\circ$ , nuevamente la celda convectiva secundaria crece y desplaza a la principal llegando nuevamente al patrón de flujo inicial.

Para los periodos de oscilación de 60 minutos y 120 minutos y  $Ra = 1 \times 10^5$ , Figuras 3.4 y 3.6 respectivamente, el periodo de oscilación es lo suficientemente grande para que se invierta el sentido de giro del flujo dentro de la cavidad. Para un periodo de oscilación de 60 min y  $Ra = 1 \times 10^5$ , Figura 3.4, cuando la cavidad se encuentra en  $\theta = 0^\circ$  el patrón convectivo consta de una celda convectiva principal y dos celdas convectivas secundarias ubicadas en las esquinas superior derecha e inferior izquierda. En el trayecto de  $\theta = 0^\circ$  a  $\theta = +15^\circ$  ida y vuelta (de  $0^\circ$  a  $+15^\circ$  y de  $+15^\circ$  a  $0^\circ$ ), las celdas convectivas secundarias comienza a crecer y cuando la cavidad regresa nuevamente a  $\theta = 0^\circ$ , se presenta una celda convectiva principal que gira en el sentido de las manecillas del reloj y dos celdas convectivas secundarias en las esquinas superior izquierda e inferior derecha ambas con sentido de giro inverso. Para el trayecto de  $\theta = 0^\circ$  a  $\theta = -15^\circ$  ida y vuelta, la celda convectiva secundaria aumenta de tamaño y cuando la cavidad llega a  $\theta = 0^\circ$  se presenta el patrón convectivo original.

Para un periodo de oscilación de 120 minutos, Figura 3.6, cuando la cavidad oscila de  $\theta = 0^\circ$  a  $\theta = +15^\circ$ , la celda convectiva secundaria ha desplazado por completo a la celda convectiva principal, la cual ocupa un pequeño espacio en la esquina superior izquierda. En el trayecto de  $\theta = +15^\circ$  a  $\theta = 0^\circ$ , la celda convectiva se desarrolla completamente ocupando por completo la cavidad mientras que la celda convectiva principal desaparece, cuando la cavidad llega a  $\theta = 0^\circ$ , nuevamente aparece la celda convectiva principal, la cual aumenta de tamaño con forma la cavidad se desplaza de  $\theta = 0^\circ$  a  $\theta = -15^\circ$ , cuando la cavidad se encuentra en  $\theta = -15^\circ$ , la celda convectiva principal ha desplazado completamente a la celda convectiva secundaria, que tiene un una tamaño diminuto , y se encuentra en la esquina superior derecha. La celda convectiva completa su desarrollo cuando la cavidad se mueve de  $\theta = -15^\circ$  a  $\theta = 0^\circ$ , llegando a la estructura convectiva inicial.

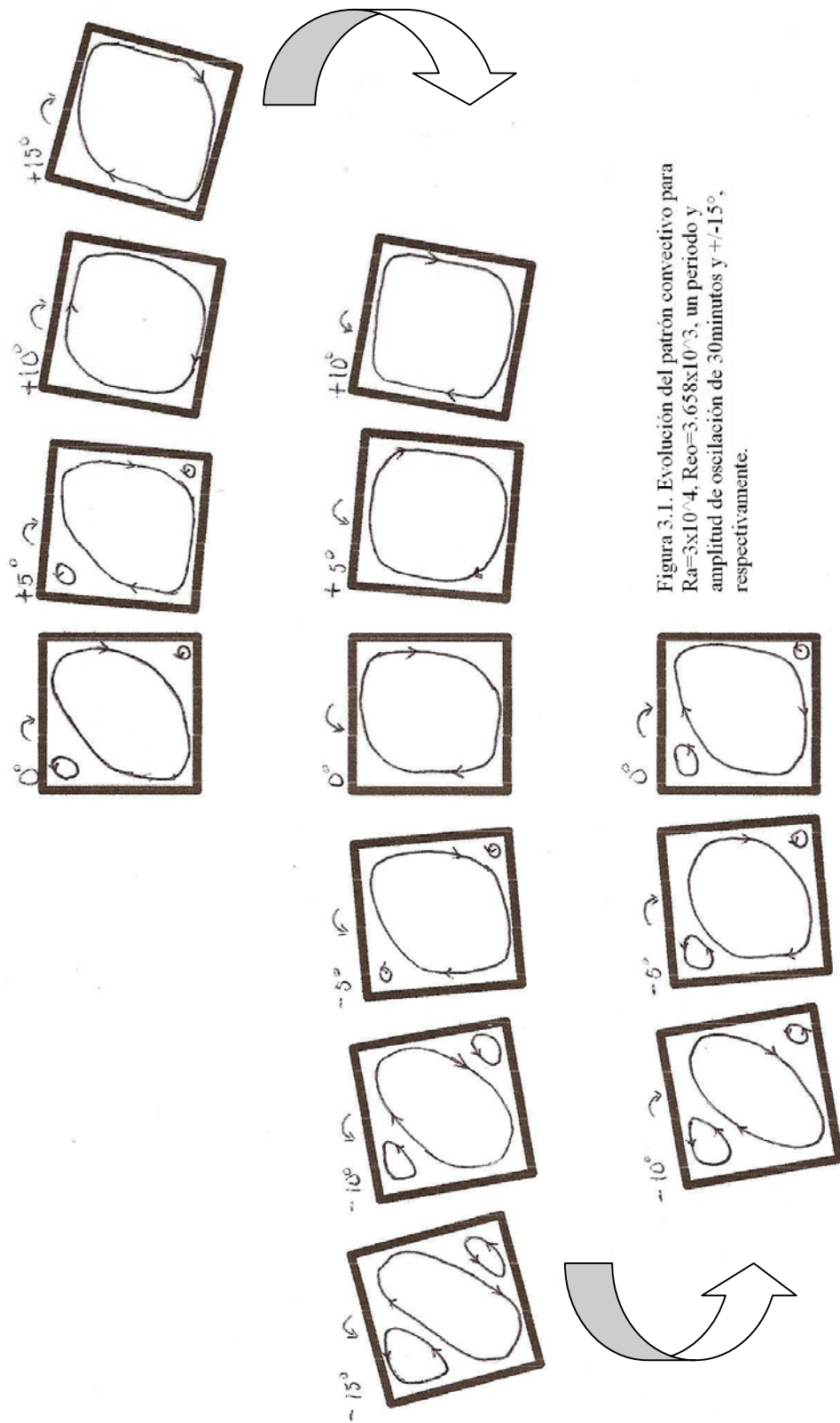


Figura 3.1. Evolución del patrón convectivo para  $Ra=3 \times 10^4$ ,  $Reo=3.658 \times 10^3$ , un periodo y amplitud de oscilación de 30 minutos y  $\pm 15^\circ$ , respectivamente.

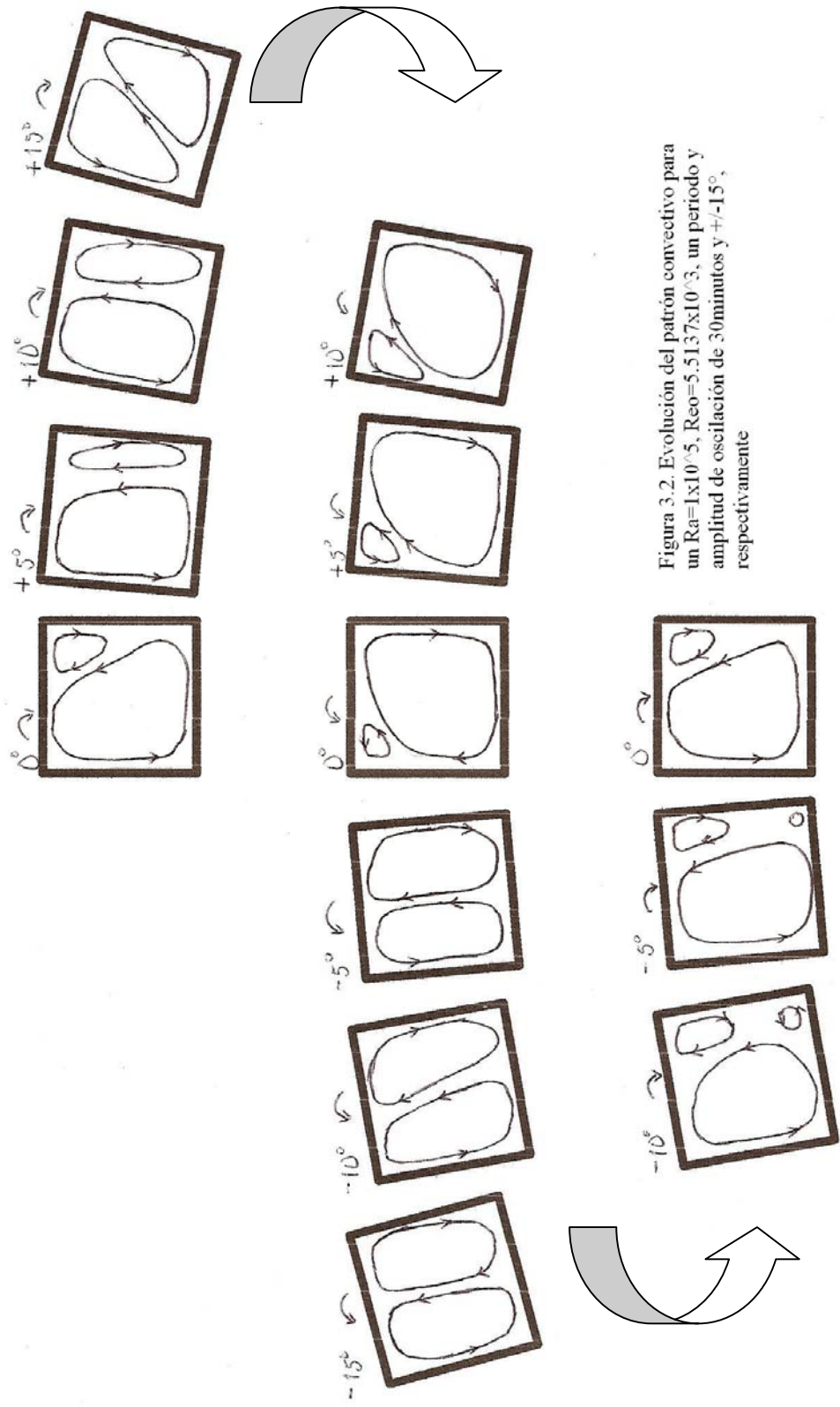


Figura 3.2. Evolución del patrón convectivo para un  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=5.513 \times 10^3$ , un periodo y amplitud de oscilación de 30 minutos y  $\pm 15^\circ$ , respectivamente

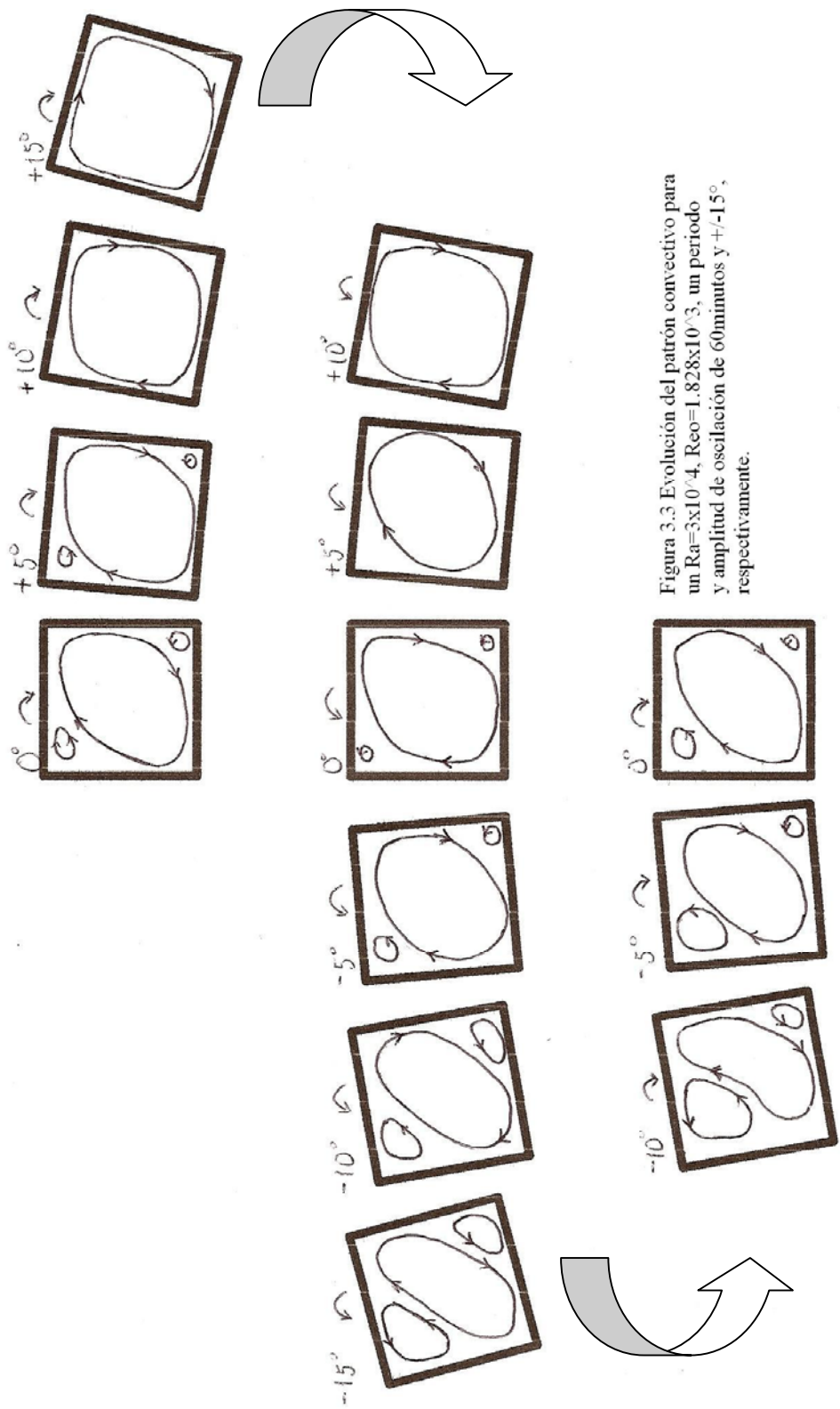


Figura 3.3 Evolución del patrón convectivo para un  $Ra=3 \times 10^4$ ,  $Reo=1.828 \times 10^3$ , un periodo y amplitud de oscilación de 60 minutos y  $\pm 15^\circ$ , respectivamente.

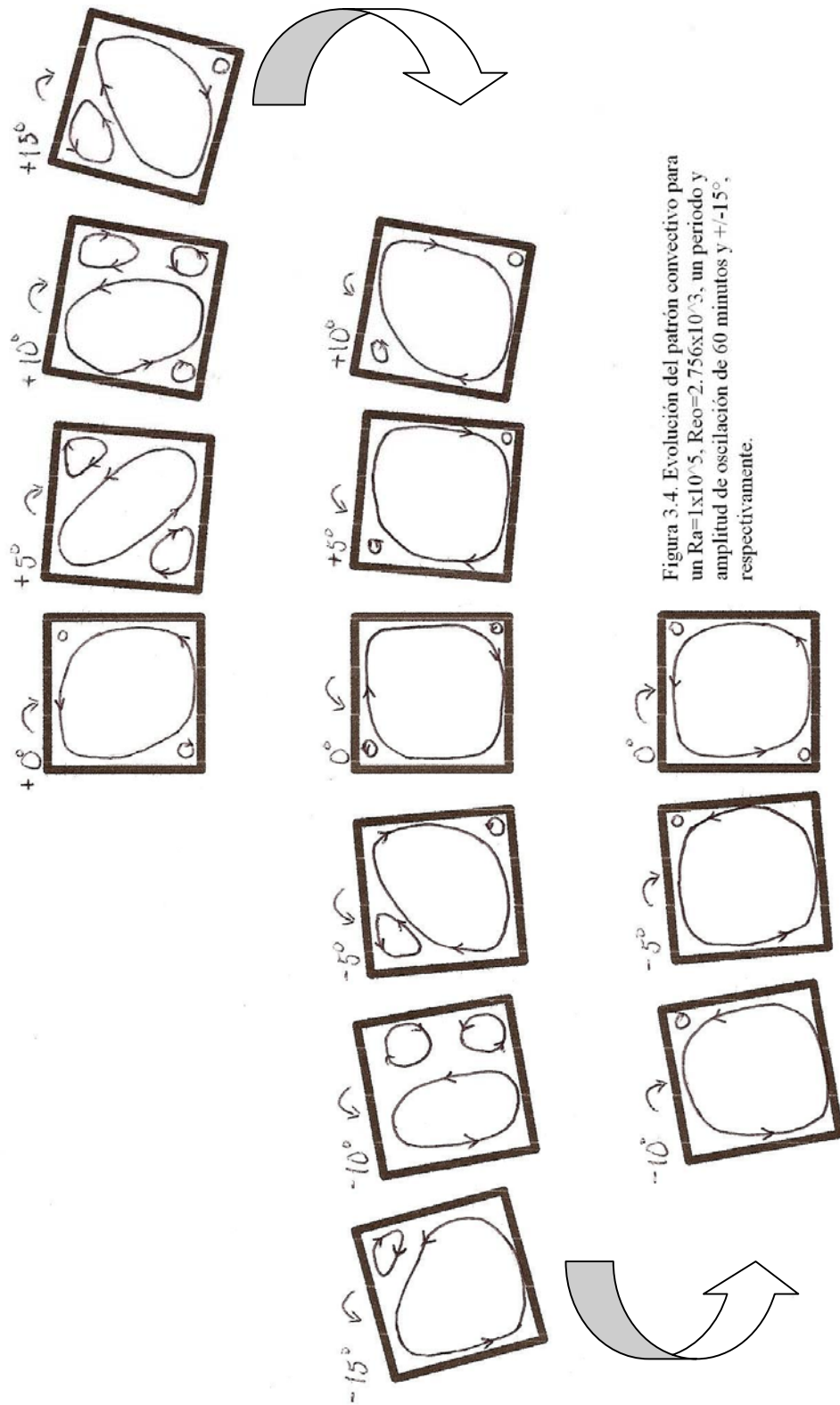


Figura 3.4. Evolución del patrón convectivo para un  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=2.756 \times 10^{0.3}$ , un periodo y amplitud de oscilación de 60 minutos y  $\pm 15^\circ$ , respectivamente.

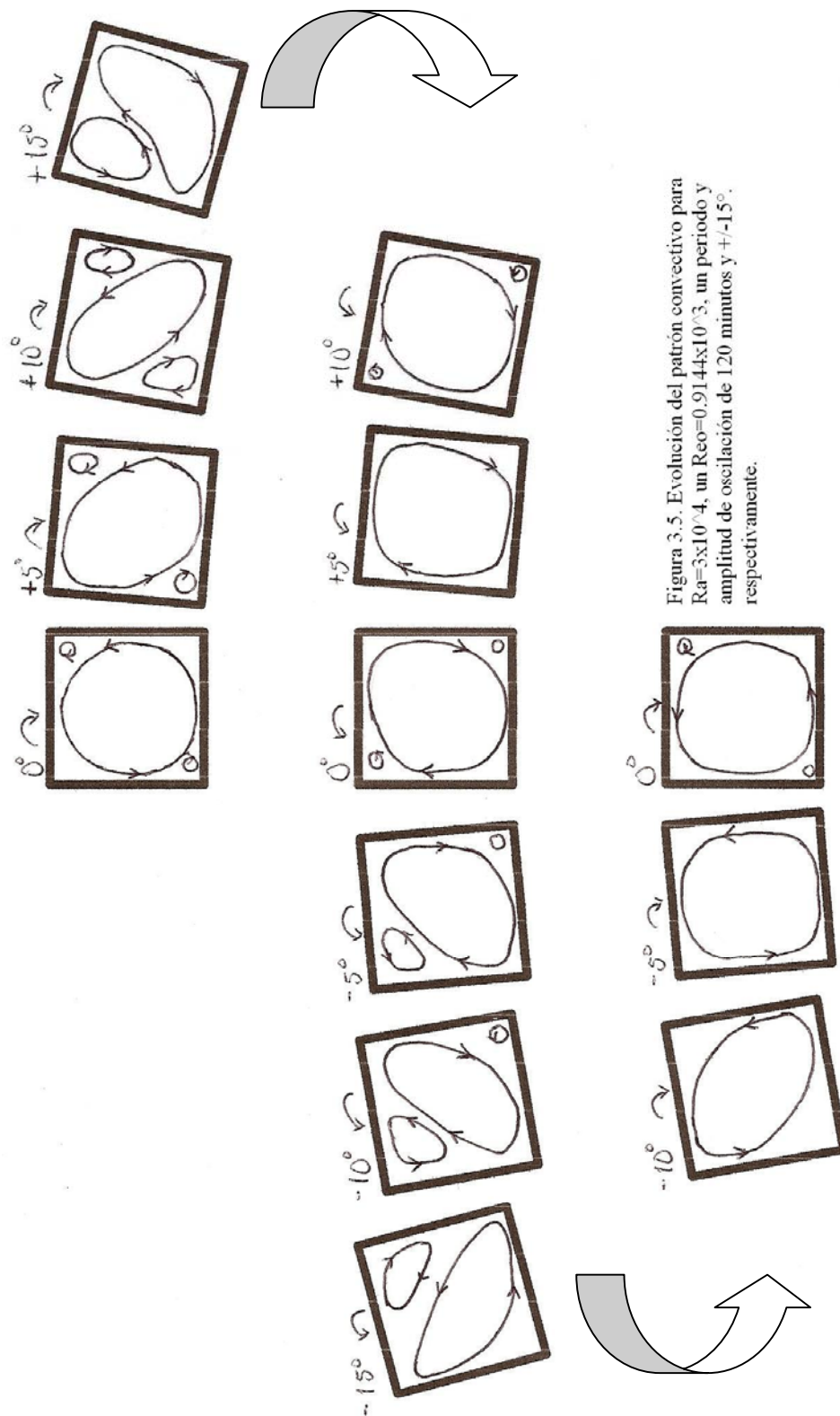


Figura 3.5. Evolución del patrón convectivo para  $Ra=3 \times 10^4$ , un  $Reo=0.914 \times 10^3$ , un periodo y amplitud de oscilación de 120 minutos y  $\pm 15^\circ$  respectivamente.



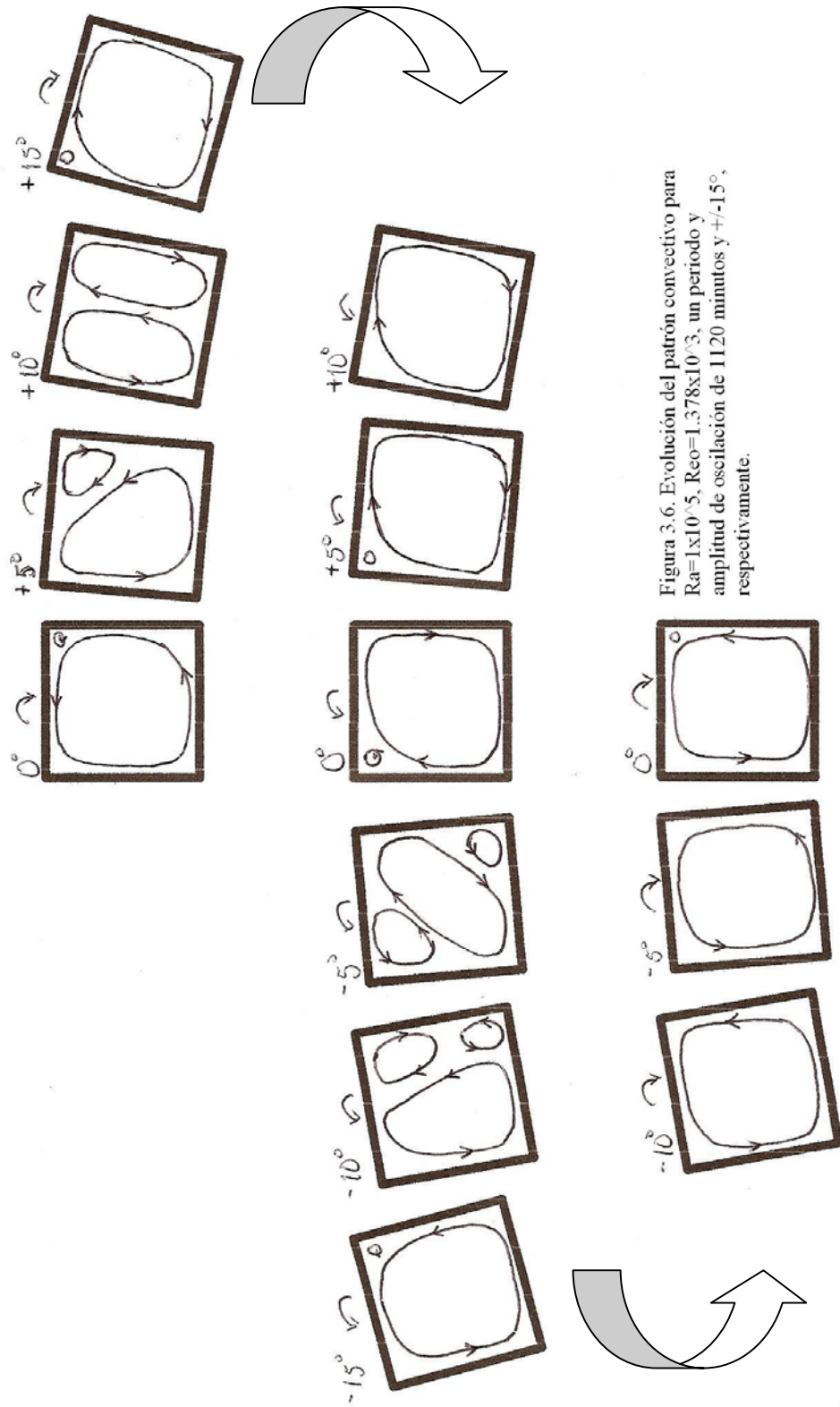


Figura 3.6. Evolución del patrón convectivo para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=1.378 \times 10^3$ , un periodo y amplitud de oscilación de 1120 minutos y  $\pm 15^\circ$ , respectivamente.

### 3.2 Estudio cuantitativo.

Para el estudio del estado transitorio de los patrones convectivos cuando la cavidad experimenta un cambio súbito en ángulo de inclinación, los resultados se presentan en una secuencia de imágenes. La primera imagen corresponde a 15 segundos antes de que la cavidad comience a girar. La segunda imagen,  $t=0$  segundos, corresponde al momento exacto en el que la cavidad empieza a girar de  $-0$  a  $+0$ , es decir todavía se encuentra en  $-0$ , y la tercera imagen corresponde al momento en que la cavidad llega a  $+0$ . A partir de la cuarta imagen, el tiempo entre las imágenes varía dependiendo del tiempo total que tarda el flujo convectivo en alcanzar nuevamente el estado permanente. El tiempo al que corresponde cada imagen se especifica en la esquina superior izquierda. Para los campos de iso-velocidad la escala de colores es la misma para todas las imágenes en el mismo evento, pero cambia de un evento a otro. La cavidad cambia de  $-0$  a  $+0$  en 10 segundos para todos los experimentos.

Para el estudio del efecto de la oscilación sobre los patrones convectivos, la secuencia de imágenes es de la siguiente forma. La primera imagen corresponde a 15 segundos antes de que la cavidad comience a oscilar, es decir que la cavidad se encuentra en  $-45^\circ$ . La segunda imagen corresponde al momento exacto el que la cavidad comienza a oscilar, aún se encuentra en  $-45^\circ$ , la tercer imagen corresponde a un ángulo de inclinación de  $-40^\circ$ , las siguientes imágenes se toman con un incremento de  $10^\circ$  en el ángulo de inclinación hasta llegar a  $+45$ , las imágenes correspondientes a la oscilación de  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$  se marcan con la letra “h”, que especifica que el sentido de giro es igual al de las manecillas del reloj u horario. Cuando la cavidad oscila de  $+45^\circ$  a  $-45^\circ$  las imágenes se toman para los mismos ángulos de inclinación, pero en este caso se les distingue con la letra “a”, para especificar que el sentido de giro es contrario a las manecillas del reloj o antihorario. Para un mejor entendimiento del proceso evolutivo se incluyen las imágenes pertenecientes a  $+25^\circ$  “h” y  $-25^\circ$  “a”. En la esquina superior de derecha de cada imagen se especifica si la imagen pertenece a la primera, segunda o tercera oscilación.

El patrón convectivo es más fácil de visualizar con las líneas de corriente, motivo por el cual son las más utilizadas en la presente tesis, todas las líneas de corriente tienen asignado un número que corresponde a un valor en la escala ubicada en el lado derecho de cada imagen. Cada imagen presenta su propia escala. El sentido de giro del patrón convectivo puede ser obtenido de la siguiente manera: si nos desplazamos de la pared caliente hacia el centro de la cavidad y el número asignado a las líneas de corriente crece, el sentido de giro es contrario al de las manecillas del reloj, en caso contrario el sentido de giro es en el sentido de las manecillas del reloj.

### **3.2.1 Estudio del estado transitorio del patrón convectivo cuando la cavidad experimenta un cambio súbito en su ángulo de inclinación.**

En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestra la evolución del patrón convectivo, en campos de iso-velocidad y líneas de corriente para un  $Ra = 1 \times 10^5$ , una amplitud de giro  $\theta = \pm 15^\circ$  y una relación de giro cuadrada. Cuando la cavidad se encuentra en  $\theta = -15^\circ$ , se presenta una estructura con una sola celda convectiva ligeramente inclinada sobre la diagonal que corre de la esquina inferior derecha a la superior izquierda, y cuyo eje de rotación se encuentra en el centro de la cavidad,  $x/L=0.5$  y  $y/L=0.5$ . El patrón convectivo gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. Una vez que la cavidad ha llegado a  $\theta = +15^\circ$ , se sigue conservando la celda convectiva y aparecen dos celdas convectivas secundarias en la esquina superior derecha e inferior izquierda, ambas con una dirección de giro igual al de las manecillas del reloj. Con el transcurso del tiempo estas celdas secundarias aumentan de tamaño, hasta que finalmente en el minuto nueve dividen a la celda convectiva principal, formándose así cuatro celdas convectivas.

Las celdas convectivas secundarias continúan aumentando de tamaño, la celda convectiva secundaria que se encuentra en la esquina superior derecha comienza a alargarse hacia la pared caliente y la celda convectiva secundaria que se encuentra en la esquina inferior izquierda se desplaza hacia la pared fría, tal como se muestra en la imagen 3.8e, para un tiempo de 10 minutos, desplazando de este

modo a las dos celdas convectivas producto de la división de la celda convectiva principal, las dos celdas convectivas secundarias comienzan a inclinarse paralelas a la diagonal que se forma de la esquina inferior izquierda a la superior derecha. Al mismo tiempo, la celda convectiva secundaria que se encuentra del lado derecho de la cavidad cae hacia la pared caliente y la celda convectiva que se encuentra en el lado izquierdo se desplaza hacia la pared fría, comenzando así la fusión de ambas celdas convectivas. La imagen 3.8e, perteneciente al minuto once muestra las secuelas de la fusión de las celdas convectivas. Las celdas convectivas que nacieron de la división de la celda convectiva principal desaparecen. Al minuto doce las celdas convectivas secundarias ya se han fusionado formando una sola celda convectiva. El sentido de giro de la celda convectiva es igual al de las manecillas del reloj y el eje de giro ubicado en  $x/L=0.5$  y  $y/L=0.6$ , la región central de la nueva celda convectiva aún presenta rastros de la fusión.

Una vez fusionadas las celdas convectivas secundarias, el centro de la celda convectiva tiene una forma elipsoidal cuyo eje mayor es paralelo a la diagonal que corre de la esquina inferior derecha a la superior izquierda. Con el transcurso del tiempo el centro de la celda convectiva gira en el mismo sentido que el flujo convectivo, igual al de las manecillas del reloj, lo que provoca un aumento en la velocidad del patrón convectivo, hasta quedar paralela a la diagonal que corre de la esquina inferior izquierda a la superior derecha. Este aumento de la velocidad es mayor para bajos números de Rayleigh. Al mismo tiempo el eje de giro de la nueva celda convectiva se desplaza lentamente al centro de la cavidad.

También aparece una celda convectiva secundaria en la esquina superior izquierda, con sentido de giro contrario al de las manecillas del reloj. Para un tiempo de dieciocho minutos el patrón convectivo ha llegado al estado permanente. La celda convectiva principal se encuentra alargada hacia la diagonal que corre de la esquina inferior izquierda a la superior derecha. En todos los experimentos el patrón convectivo presenta el mismo proceso evolutivo. El tiempo en que se alcanza el estado permanente dependerá del número de Rayleigh y de la amplitud de giro, como se verá más adelante.

En las Figuras 3.7 podemos observar el comportamiento de la velocidad del flujo convectivo. Cuando la cavidad se encuentra en  $\theta=-15^\circ$ , el módulo de la velocidad llega a tener un valor máximo de  $2.12 \times 10^{-4} (m/s)$ . Cuando la cavidad se encuentra en  $\theta=+15^\circ$  y las celdas convectivas secundarias aumentan de tamaño, la velocidad en el patrón convectivo disminuye drásticamente a  $1.41 \times 10^{-4} (m/s)$ . Esta caída de velocidad se debe a los esfuerzos cortantes que se generan en la interfaz de la celda convectiva principal y las celdas convectivas secundarias. Una vez que el flujo convectivo dentro de la cavidad alcanza el estado permanente, este presenta una distribución de velocidad similar al que se tenía cuando la cavidad se encontraba en  $\theta=-15^\circ$ , pero en este caso los signos de las componentes de la velocidad  $u$  y  $v$  son opuestos, lo que muestra que el patrón convectivo es simétrico respecto al ángulo de inclinación de la cavidad. Lo anterior es corroborado en cada una de las gráficas mostradas en la Figura 3.9.

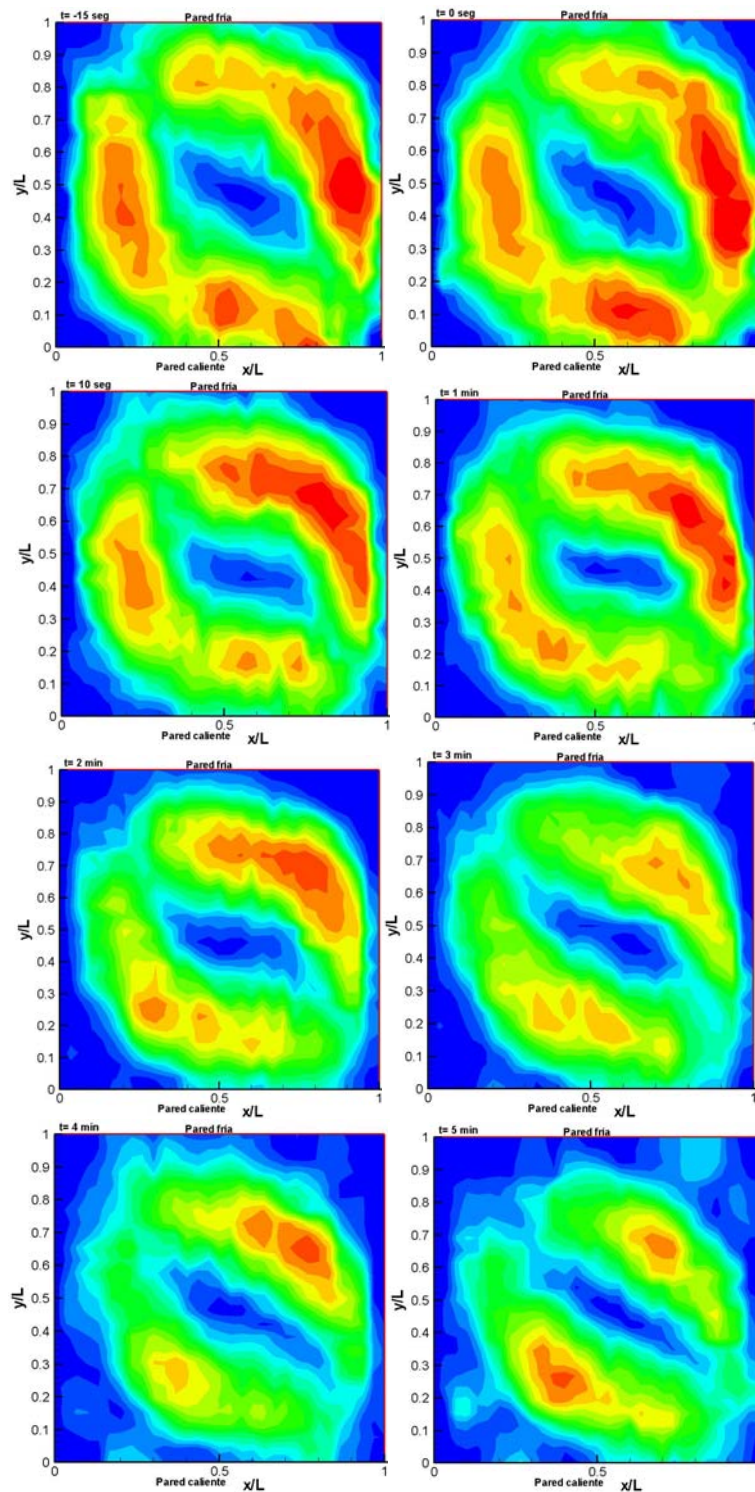


Figura 3.7a. Campos de iso - velocidad para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

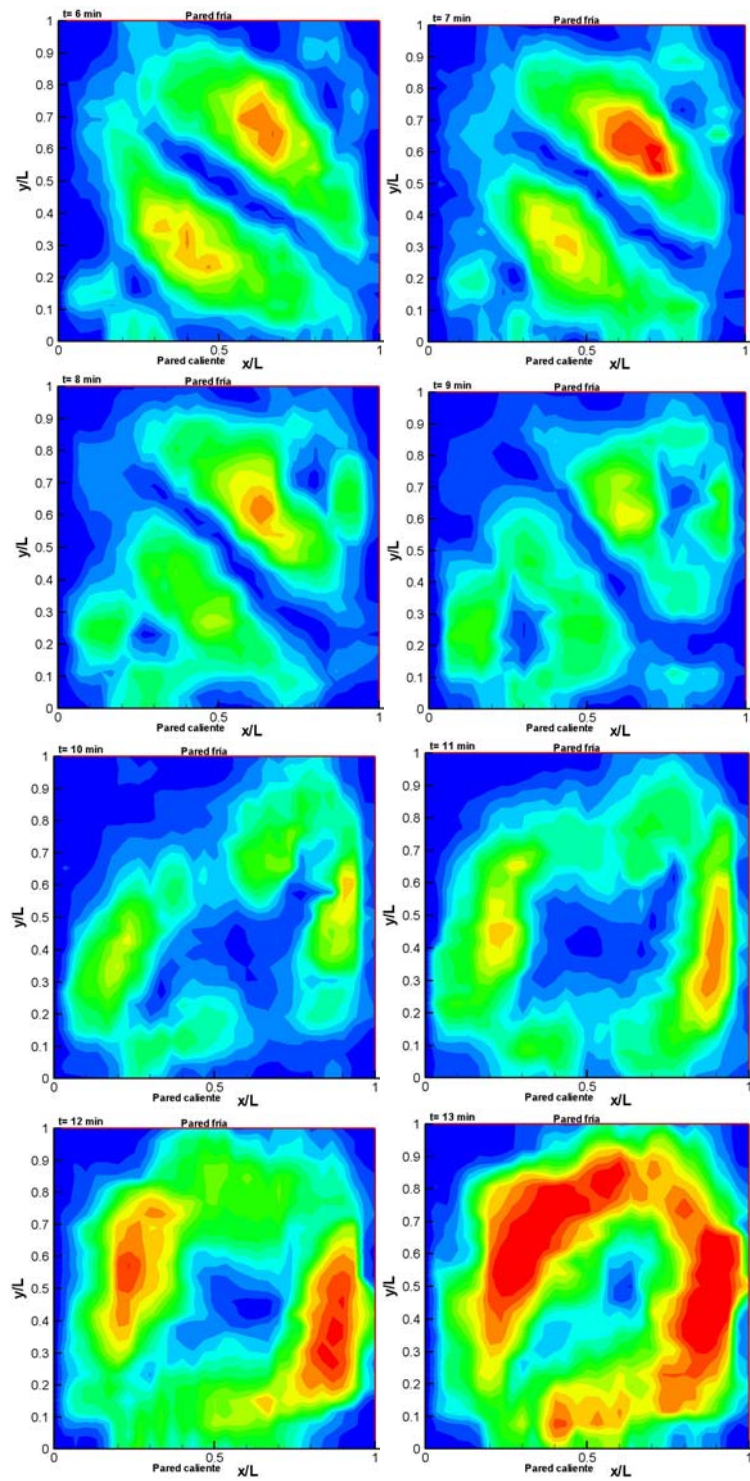


Figura 3.7b. Campos de iso - velocidad para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

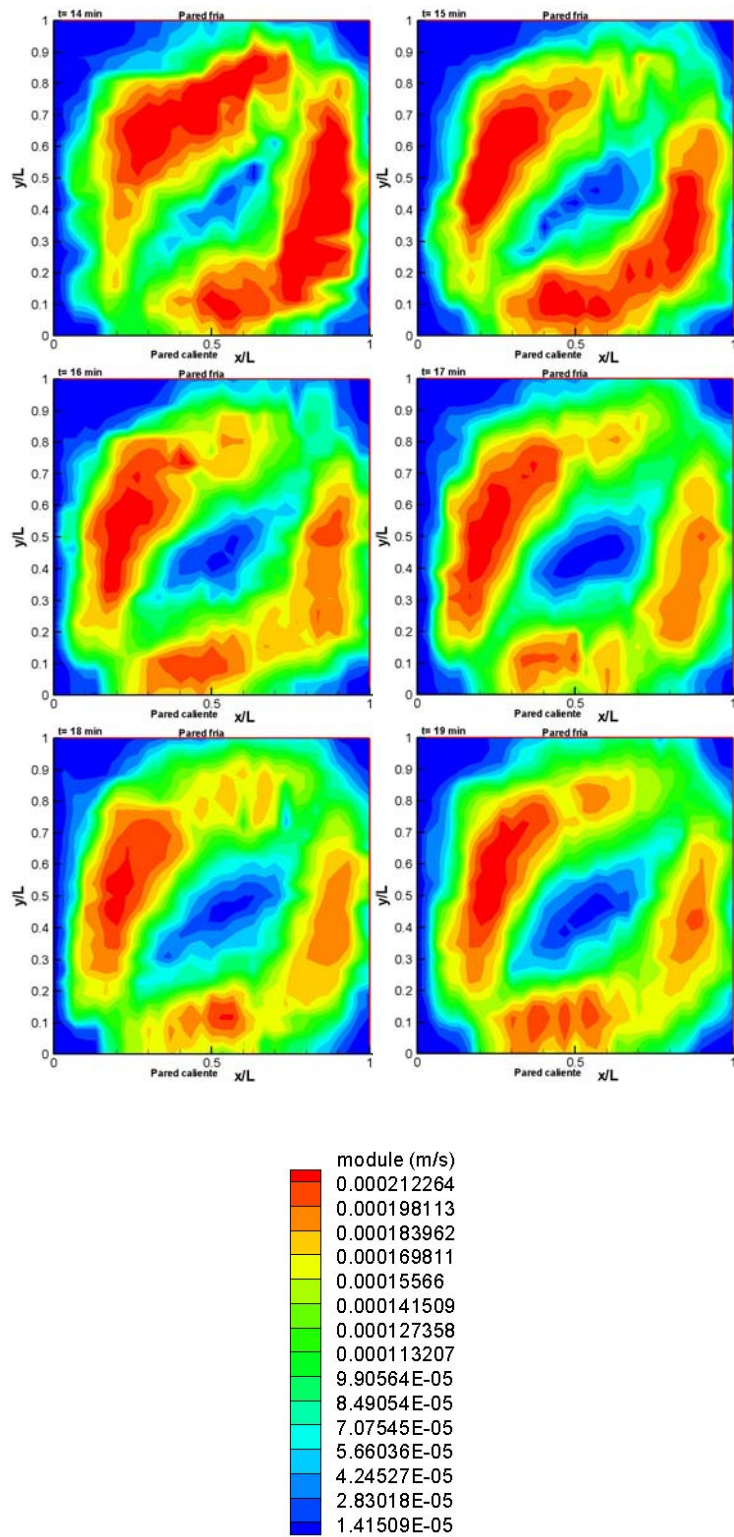


Figura 3.7c. Campos de iso - velocidad para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.



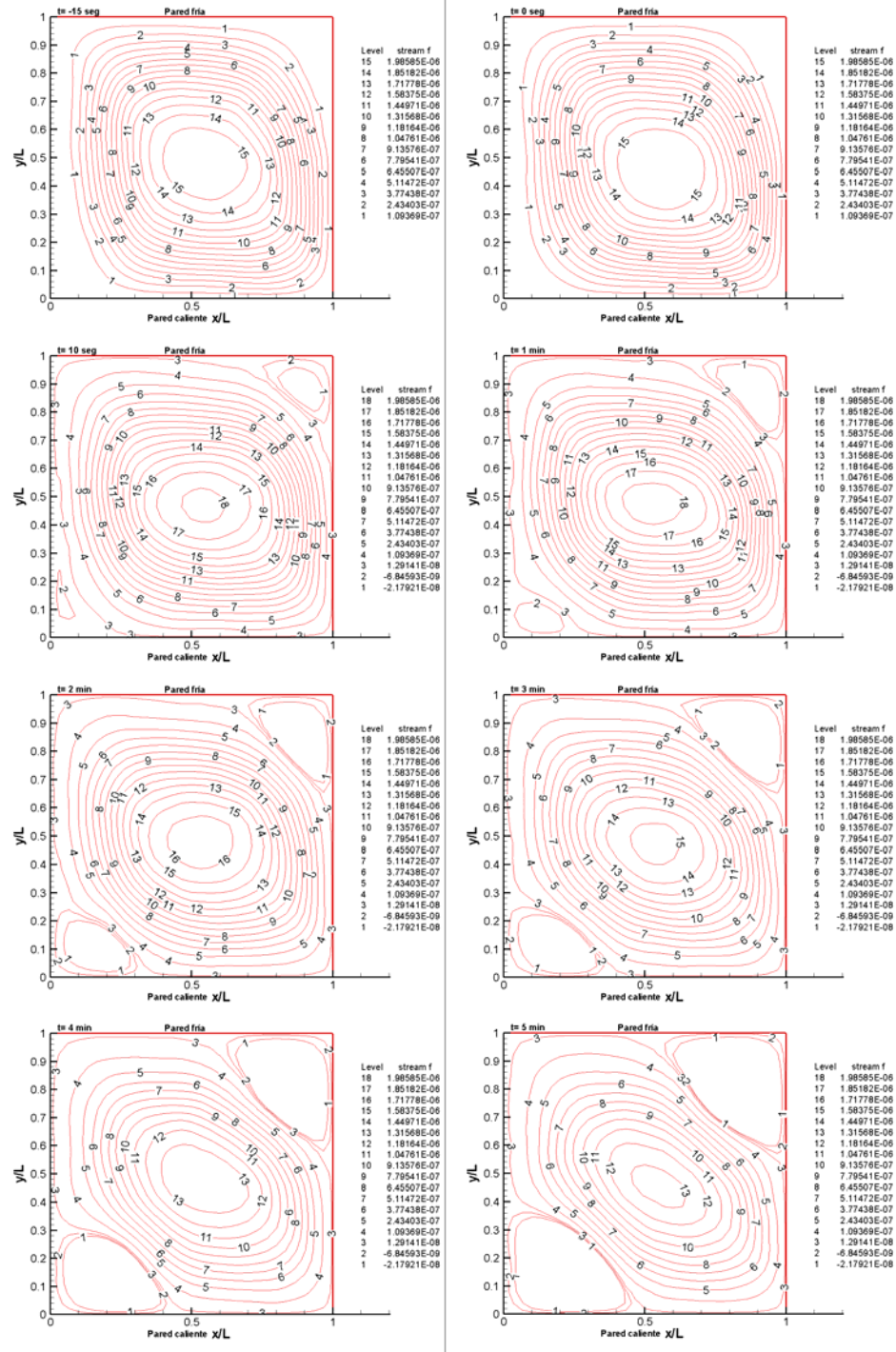


Figura 3.7d. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

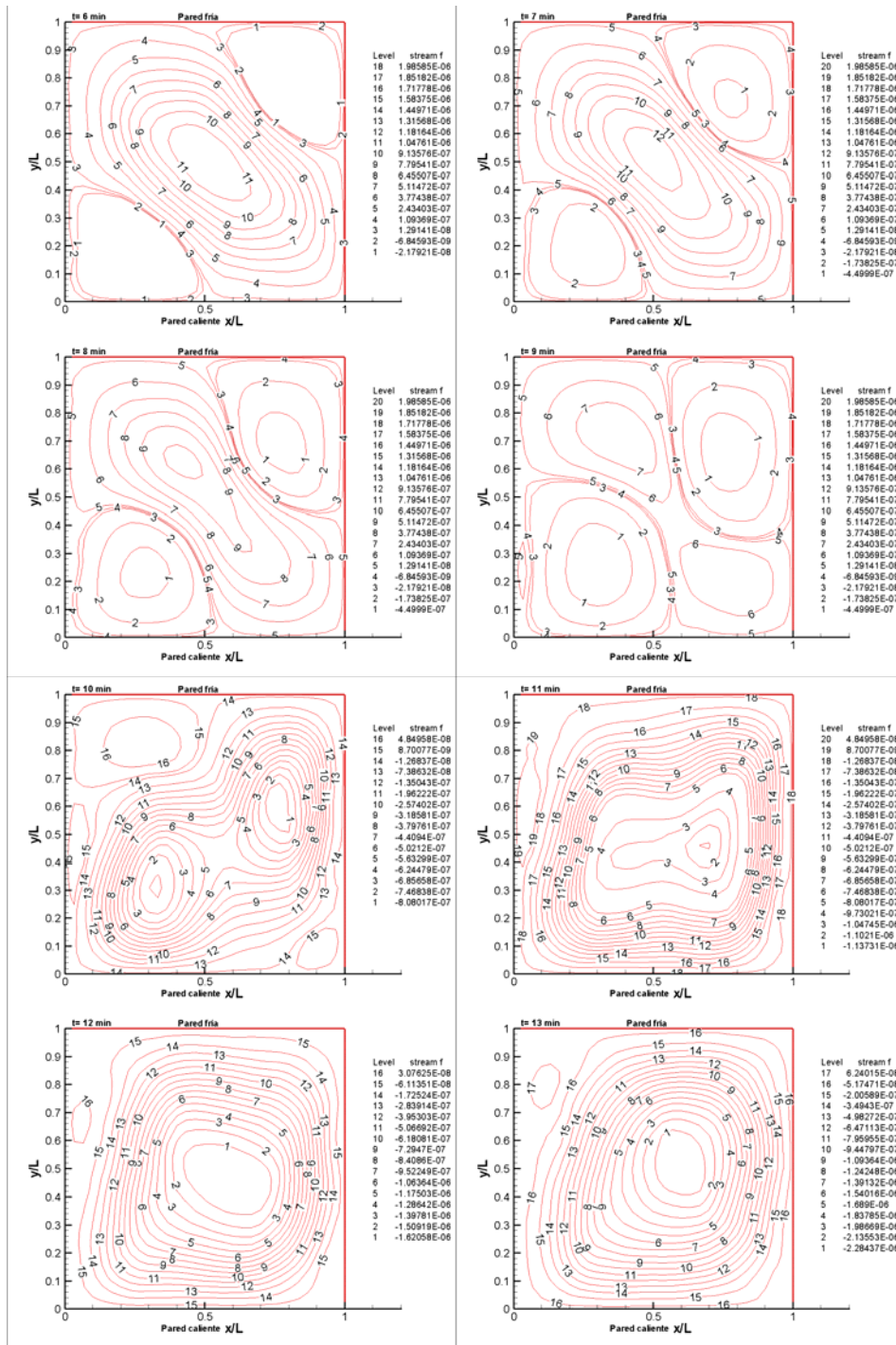


Figura 3.7e. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $+/- 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

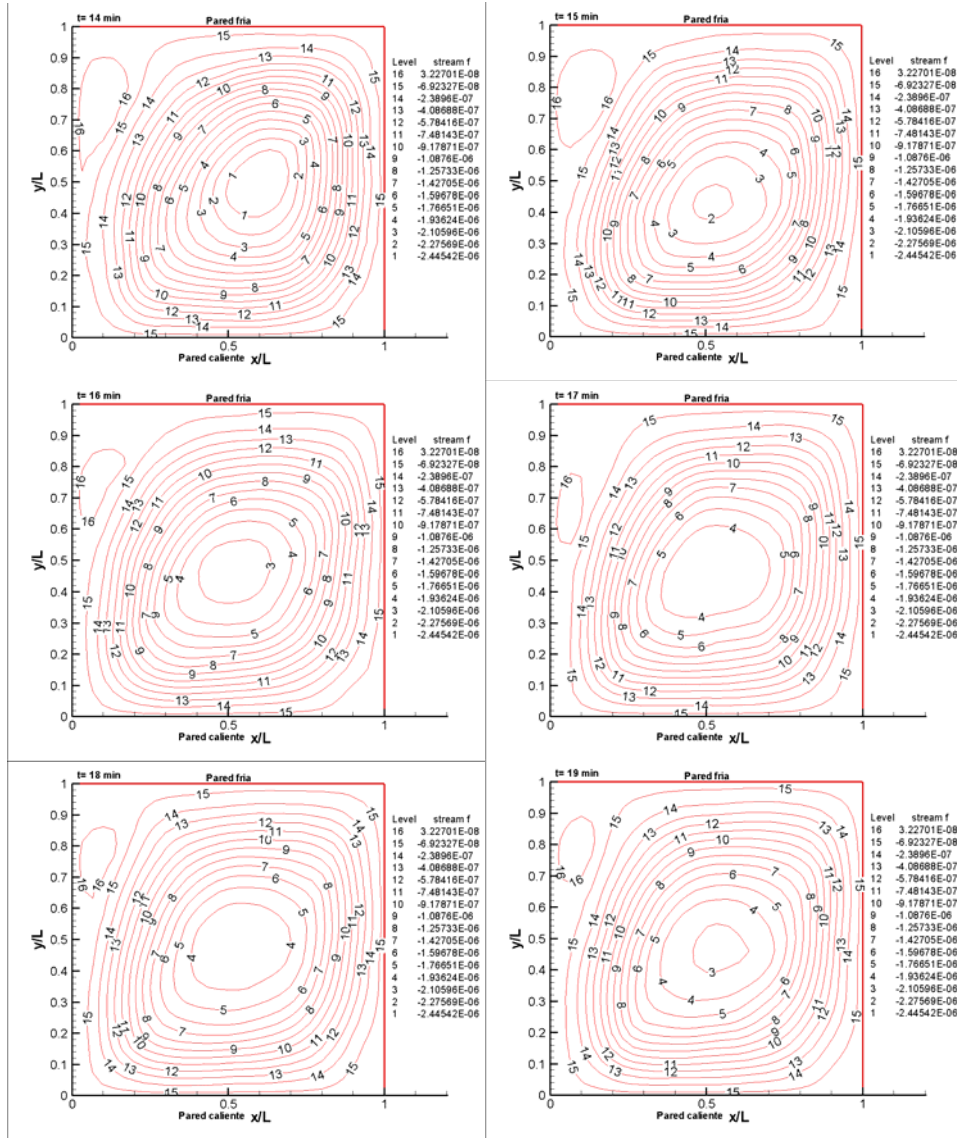


Figura 3.7f. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

### 3.2.1.1 Influencia de la relación de giro.

Para este caso tenemos un  $Ra = 1 \times 10^5$ , una amplitud de giro  $\theta = \pm 15^\circ$ . Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran la evolución del patrón convectivo, para una relación de giro cuadrado y senoidal, respectivamente. La evolución del patrón convectivo cuando se aplica una relación de giro cuadrado se explicó en el capítulo anterior. Cuando emplea una relación de giro senoidal, el patrón del flujo convectivo presenta la misma evolución que con la relación cuadrada, presentándose los mismos cambios a tiempos iguales. La distribución de la velocidad para ambas relaciones de giro es el mismo tal como lo muestran las Figuras 3.7.a-3.7.c y 3.8.a-3.8.c.

En las figuras 3.10 y 3.11, se comparan los perfiles de velocidad en la dirección  $x$  y  $y$ , para ambas relaciones de giro. Para un tiempo  $t=0$  min, la cavidad se encuentra en  $\theta = -15^\circ$ , los perfiles de velocidad para las componentes  $u$  y  $v$  prácticamente son los mismos. Cuando la cavidad se encuentra en  $\theta = +15^\circ$  y transcurrido 6 minutos, se presenta un ligero cambio en los perfiles de velocidad entre ambos perfiles para la componente  $u$ , este cambio no es tan pronunciado para la componente  $v$ . Para un tiempo de 12 minutos, nuevamente los perfiles de velocidad para  $x$  e  $y$  tienen una tendencia similar para ambas relaciones de giro. Cuando han transcurrido 18 minutos, el patrón de flujo ha alcanzado el estado permanente y los perfiles de velocidad para las componentes  $u$  y  $v$  presentan un comportamiento similar.

Lo mismo ocurre cuando se comparan otros eventos con número de Rayleigh y amplitud de giro iguales, y diferente relación de giro. Por todo lo anterior se concluye que la relación con la cual gira la cavidad no tiene un efecto importante en la evolución del patrón convectivo.

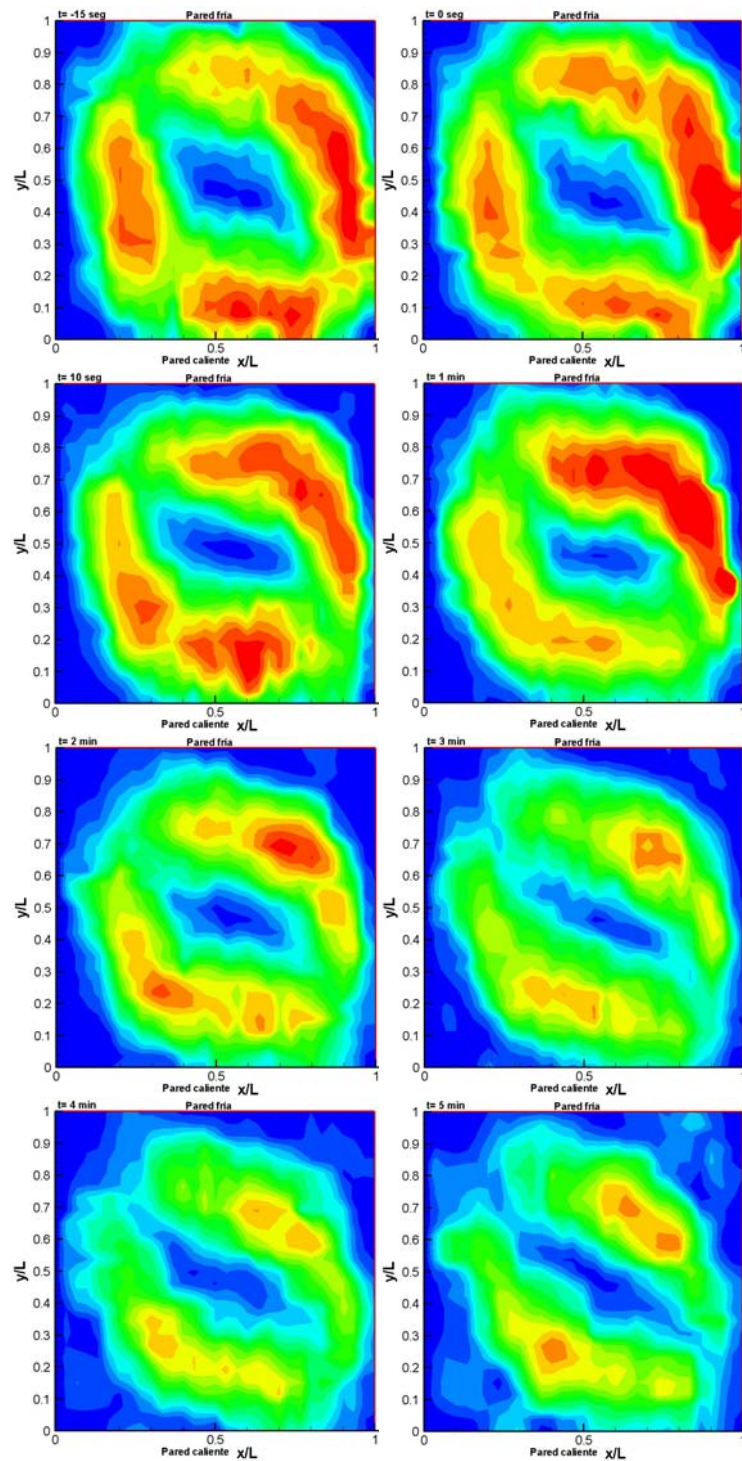


Figura 3.8a. Campos de iso - velocidad para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.

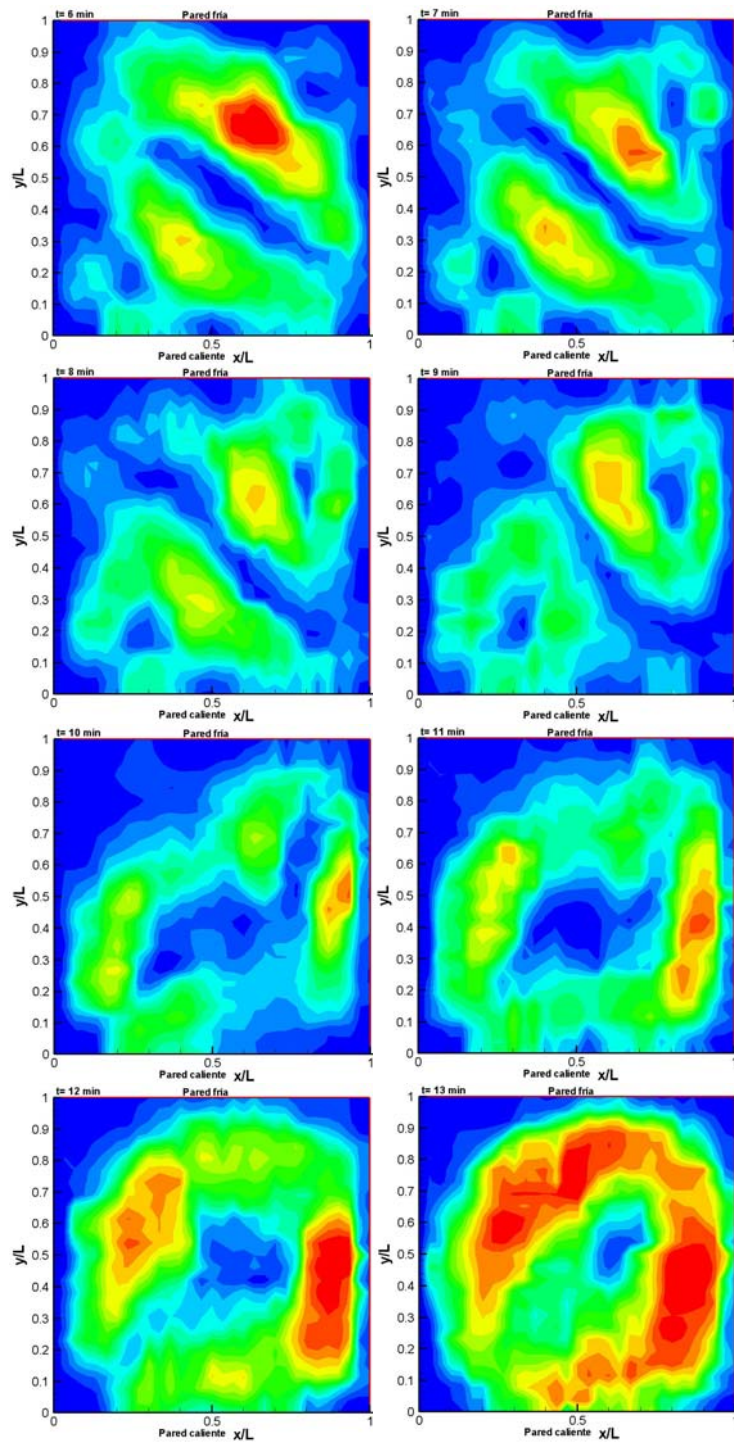


Figura 3.8b. Campos de iso - velocidad para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.

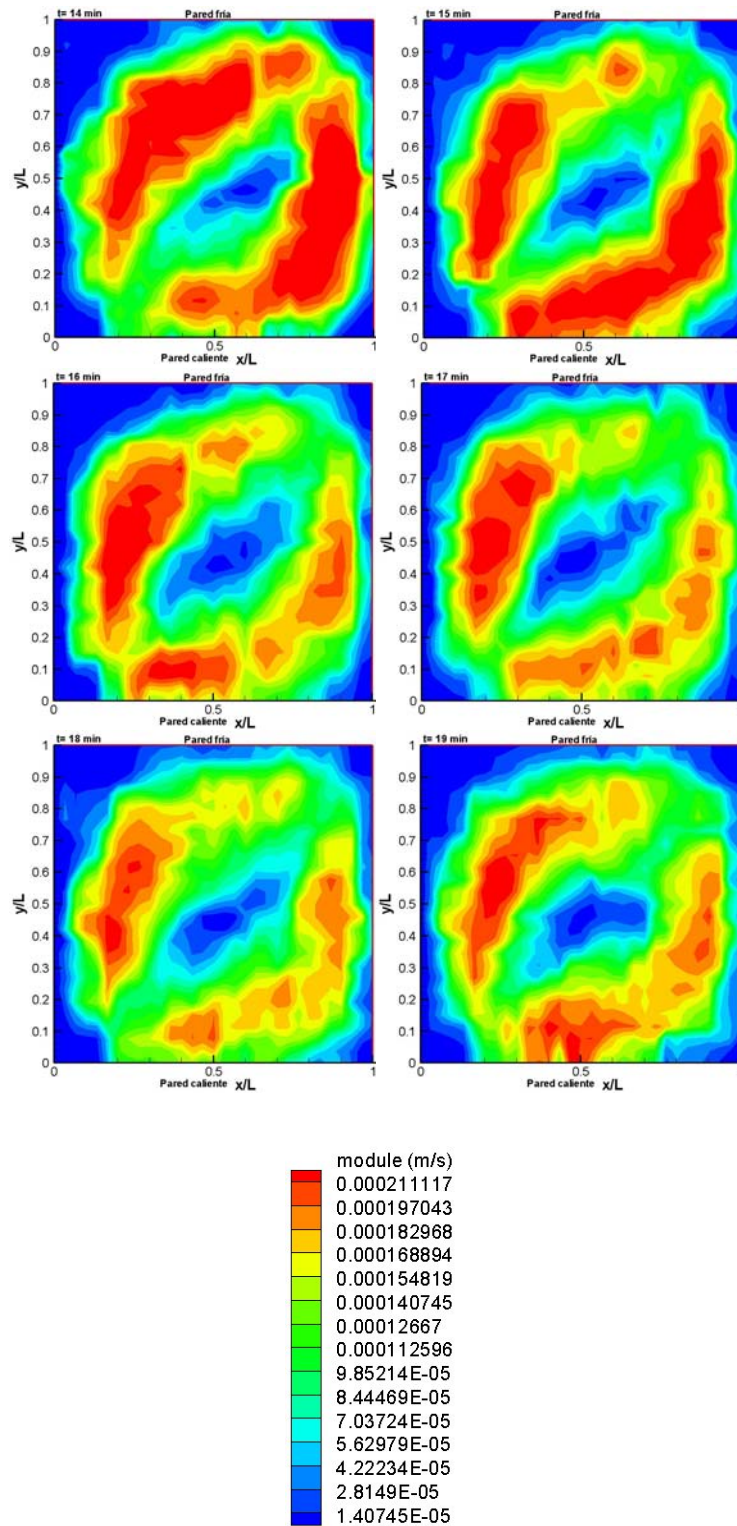


Figura 3.8c. Campos de iso - velocidad para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.

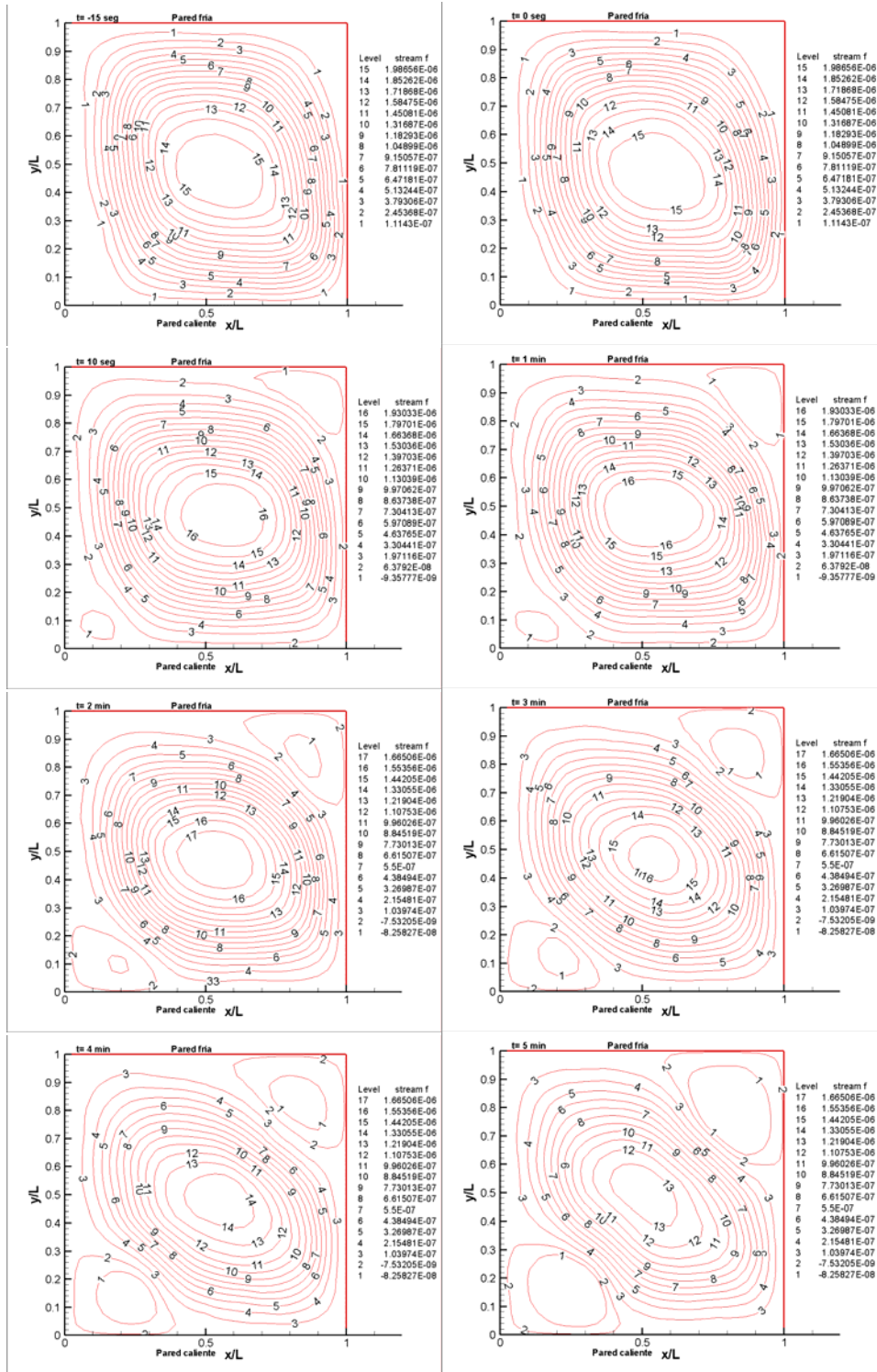


Figura 3.8d. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.



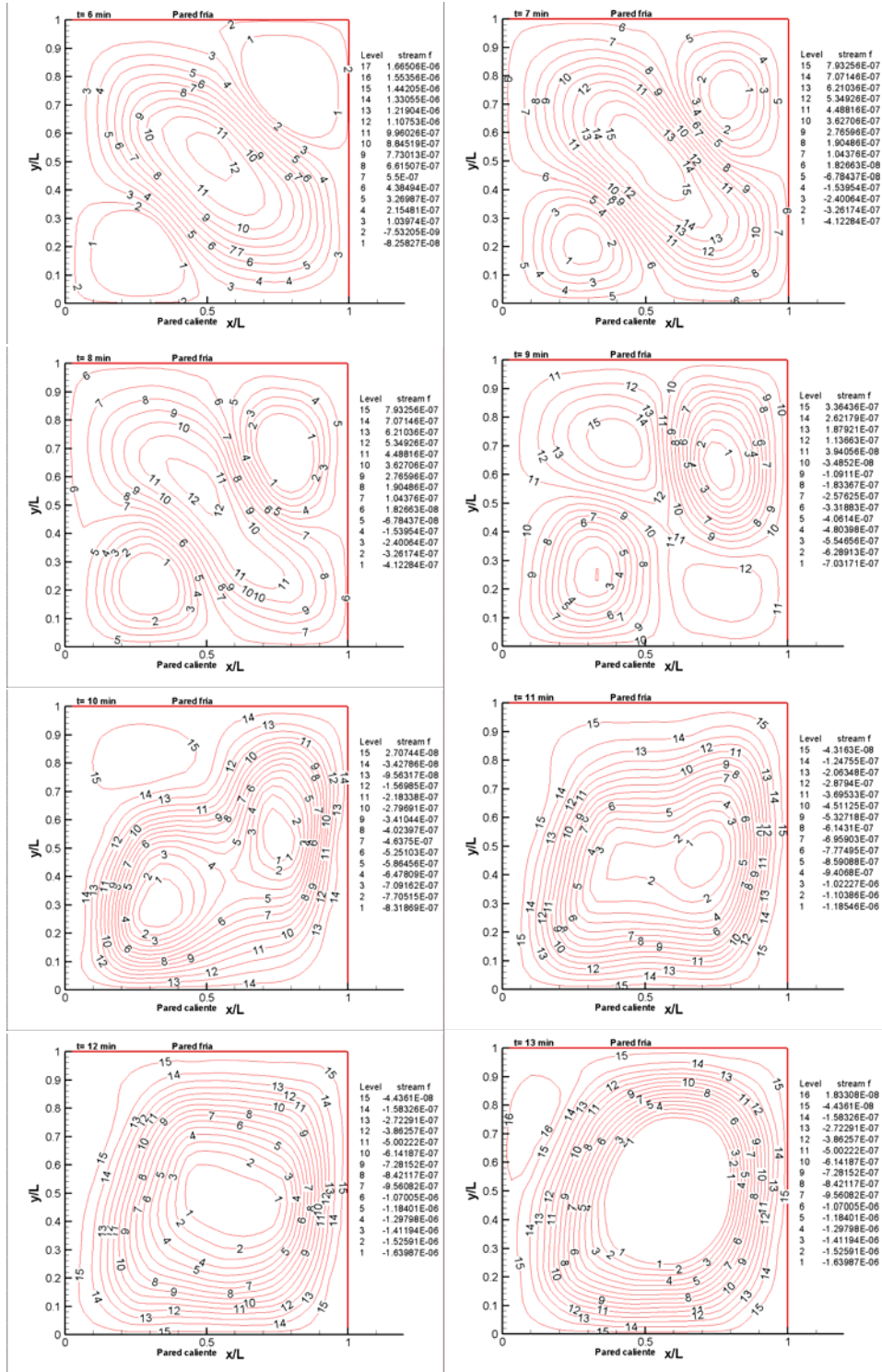


Figura 3.8e. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $+/- 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.

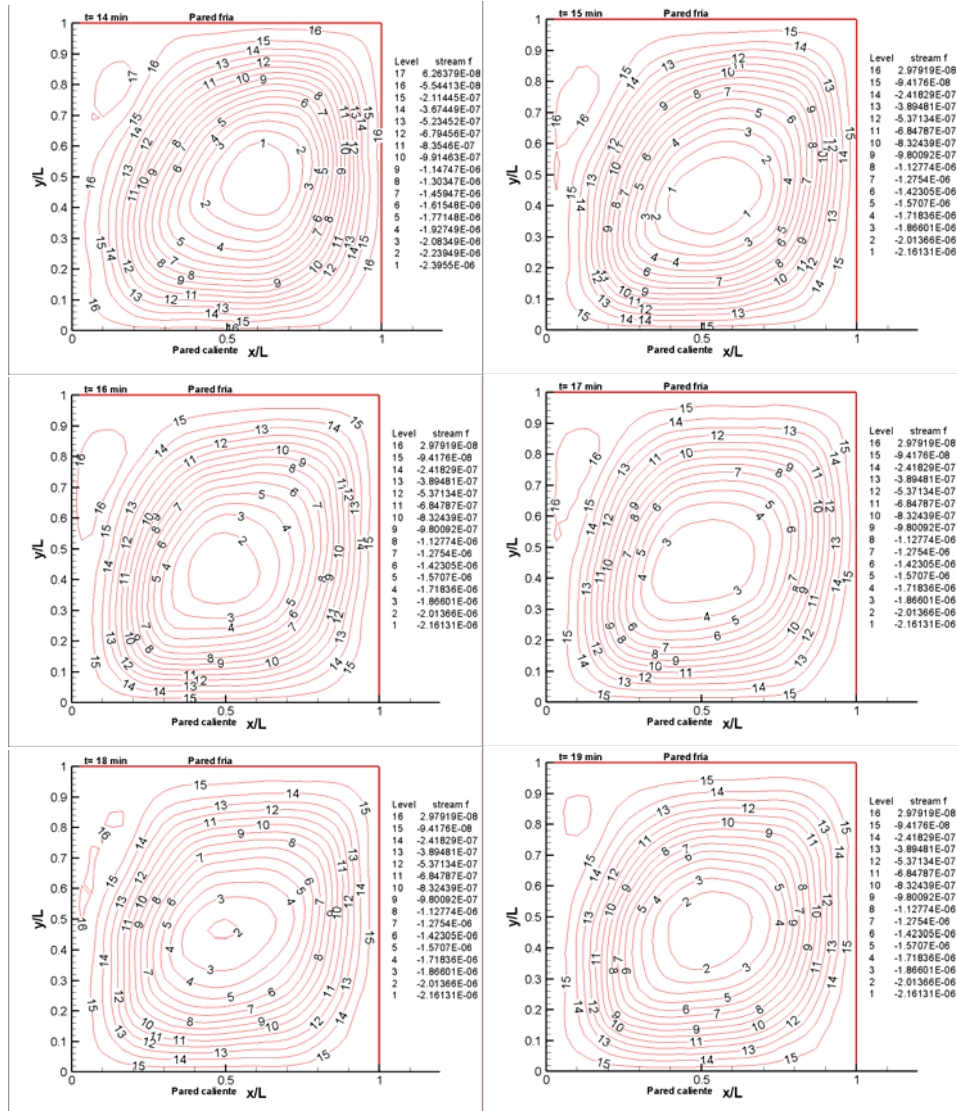


Figura 3.8f. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ , amplitud de oscilación  $+/- 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.

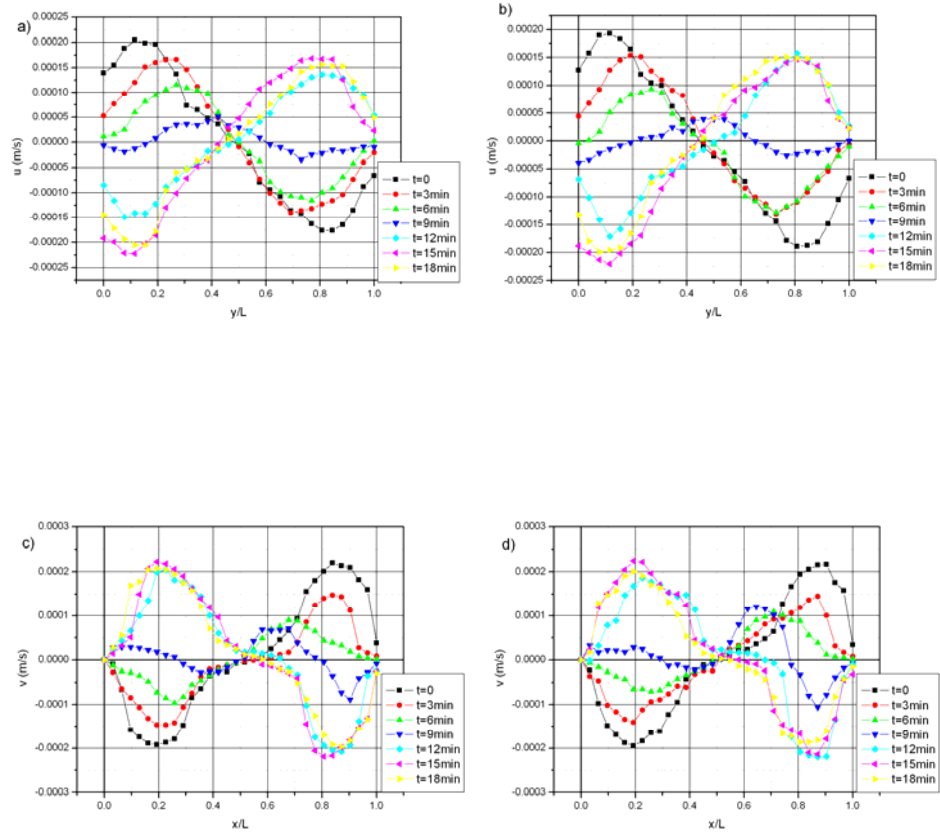


Figura 3.9. Evolución de los perfiles de velocidad en la dirección  $x$  e  $y$ , para  $y/L=0.5$  y  $x/L=0.5$ . Para un  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro  $\theta = \pm 15^\circ$ . a) y b) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$  para las relaciones de giro cuadrado y senoidal, respectivamente. c) y d) Perfiles de velocidad en la dirección  $y$  para las relaciones de giro cuadrado y senoidal, respectivamente.

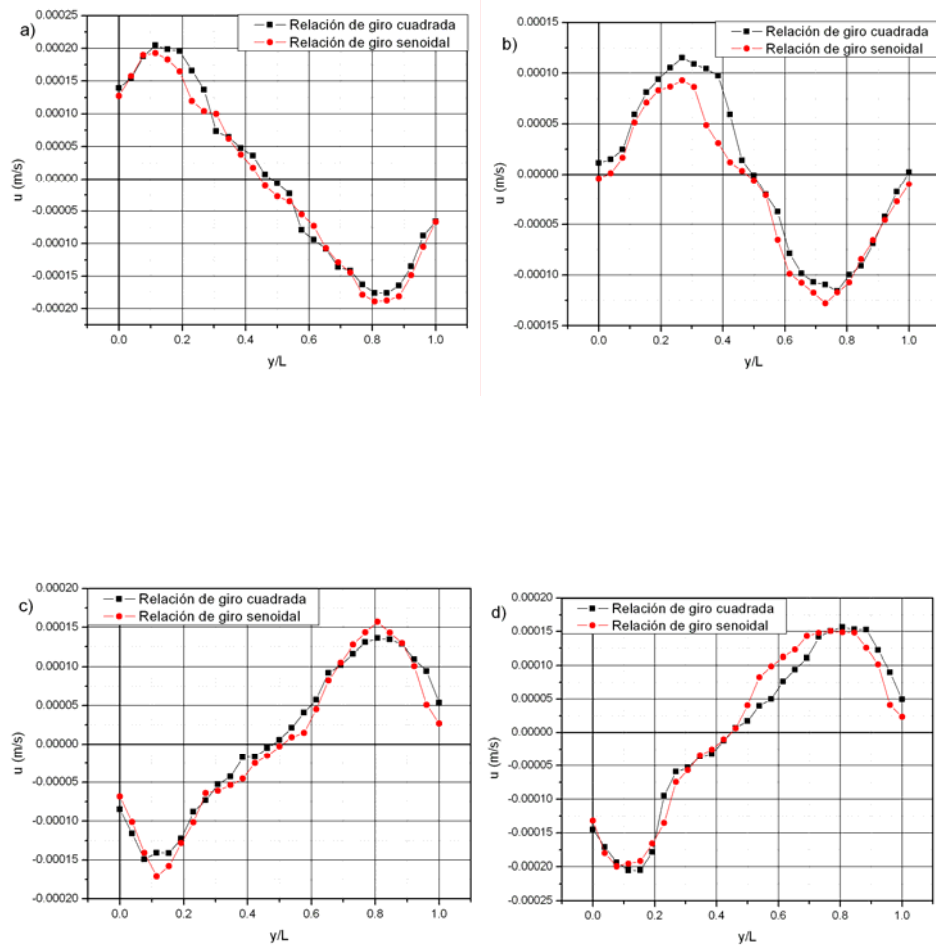


Figura 3.10. Comparación de los perfiles de velocidad en la dirección  $x$ , para  $x/L=0.5$ . a)  $t=0$  min. b)  $t=6$  min. c)  $t=12$  min. d)  $t=18$  min.

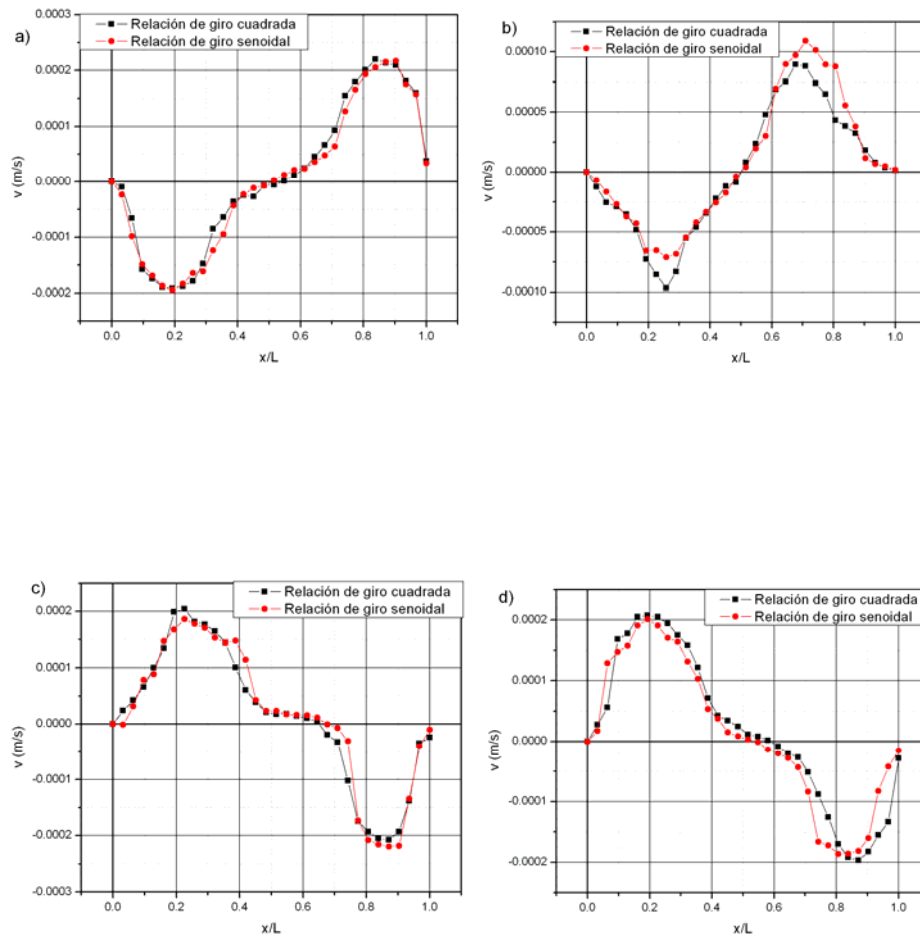


Figura 3.11. Comparación de los perfiles de velocidad en la dirección  $y$ , para  $y/L=0.5$ . a)  $t=0$  min. b)  $t=6$  min. c)  $t=12$  min. d)  $t=18$  min.

Dado que la evolución del flujo convectivo no se ve afectado por la relación con la cual gira la cavidad, se utilizarán los resultados obtenidos con ambas relaciones de giro según convenga. Para estudiar el efecto que tiene la amplitud de giro se utilizan los resultados obtenidos con una relación de giro senoidal, mientras que para efecto el número de Rayleigh se utilizan los resultados obtenidos para la relación de giro cuadrada.

### 3.2.1.2 Influencia de la amplitud de giro.

Para observar la influencia de la amplitud de giro se considera al número de Rayleigh constante en tanto que dicha magnitud se varía. Se utilizan los resultados experimentales obtenidos cuando la cavidad es sujeta a una relación de giro senoidal. Para un  $Ra = 3 \times 10^4$  la variación de la amplitud de desplazamiento afecta de manera muy importante a los tiempos en los cuales se efectúa la evolución del patrón convectivo. Para  $\theta = \pm 15^\circ$ , Figura 3.14, las celdas convectivas secundarias se fusionan al minuto 22, y se alcanza el estado permanente a los 35 minutos.

Cuando  $\theta = \pm 45^\circ$ , Figura 3.15, el tiempo al cual las celdas secundarias se fusionan es de 6 minutos y el tiempo para el estado permanente es de 12 minutos, mientras que para  $\theta = \pm 75^\circ$ , Figura 3.16, la fusión de las celdas es al minuto 2 y el flujo convectivo llega al estado permanente en el minuto 12. Después que las celdas convectivas secundarias se fusionan y establecido el nuevo patrón convectivo, hay un aumento importante en la velocidad del flujo para todas las amplitudes de giro utilizadas. Esto se puede observar en los perfiles de velocidad mostrados en la figura 3.12.

Cuando la cavidad se encuentra en  $-\theta$ , antes de que gire, la estructura convectiva presenta una celda convectiva, con eje de giro localizado en  $x/L=0.5$  y  $y/L=0.5$ . Conforme se aumenta el ángulo de inclinación, la región central de la celda se alarga hacia las paredes caliente y fría.

Para un  $Ra = 1 \times 10^5$  y  $\theta = \pm 15^\circ$ , Figura 3.9, el tiempo de fusión de las celdas convectivas secundarias es a los 12 minutos y el tiempo para llegar al estado permanente es de 18 minutos. Con  $\theta = \pm 45^\circ$ , Figura 3.17, se tienen tiempo de 5 y 10 minutos de fusión de las celdas convectivas secundarias y para el estado permanente, respectivamente. Mientras que para  $\theta = \pm 75^\circ$ , Figura 3.18, las celdas convectivas secundarias se fusionan entre los 4 y 5 minutos y el tiempo para que se alcance nuevamente el estado permanente es de tan solo 8 minutos.

El cambio más notorio es de  $\theta = \pm 15^\circ$  a  $\theta = \pm 45^\circ$ , donde el tiempo disminuye drásticamente, mientras que  $\theta = \pm 45^\circ$  a  $\theta = \pm 75^\circ$ , el cambio apenas es notorio. De igual forma existe un aumento de la velocidad en los patrones convectivos para todas las amplitudes de giro utilizadas, tal como se muestra en la Figura 3.13, siendo este aumento menor que para  $Ra = 3 \times 10^4$ . Para ambos números de Rayleigh, conforme transcurre el tiempo, la velocidad del flujo convectivo disminuye gradualmente hasta establecerse en el estado permanente.

Para  $Ra = 1 \times 10^5$  el patrón convectivo que se presenta dentro de la cavidad cuando se encuentra en  $\theta = -15^\circ$ , Figura 3.8, presenta una celda convectiva alargada hacia la diagonal que corre de la esquina inferior derecha a la superior izquierda y el centro de la celda convectiva presenta una forma ovalada, cuyo eje de giro se encuentra en  $y/L=0.5$  y  $x/L=0.5$ . Conforme la amplitud de giro aumenta se incrementa la deformación de la celda convectiva hacia las esquinas inferior derecha y superior izquierda y para  $\theta = -75^\circ$ , Figura 3.18, la celda convectiva se alarga hacia las paredes caliente y fría, el eje de giro se desplaza hacia  $y/L=0.6$  y  $x/L=0.5$ . Una vez alcanzado el estado permanente en  $\theta = 0$ , se presenta para  $\theta = \pm 15^\circ$ , Figuras 3.8f y 3.14c, y ambos números de Rayleigh una celda convectiva secundaria localizada en la esquina superior izquierda, mientras que para  $\pm 45^\circ$  y  $\pm 75^\circ$  solo se presenta una celda convectiva principal.

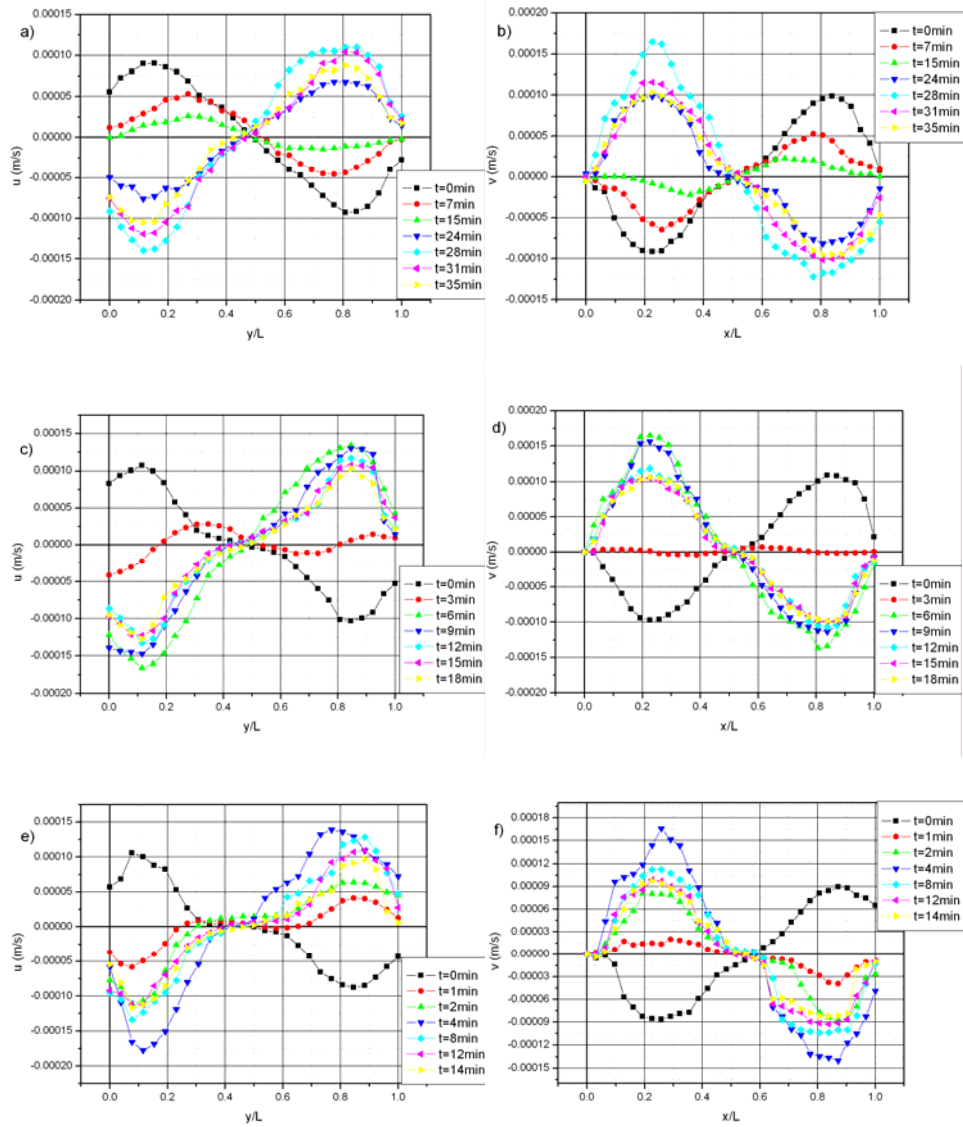


Figura 3.12. Efecto de la amplitud de giro para  $Ra = 3 \times 10^4$ . a),c) y d) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$  para  $\theta = +/-15^\circ, +/-45^\circ$  y  $+/-75^\circ$ , respectivamente. b), d) y f) Perfiles de velocidad en la dirección  $y$  para  $\theta = +/-15^\circ, +/-45^\circ$  y  $+/-75^\circ$ , respectivamente.



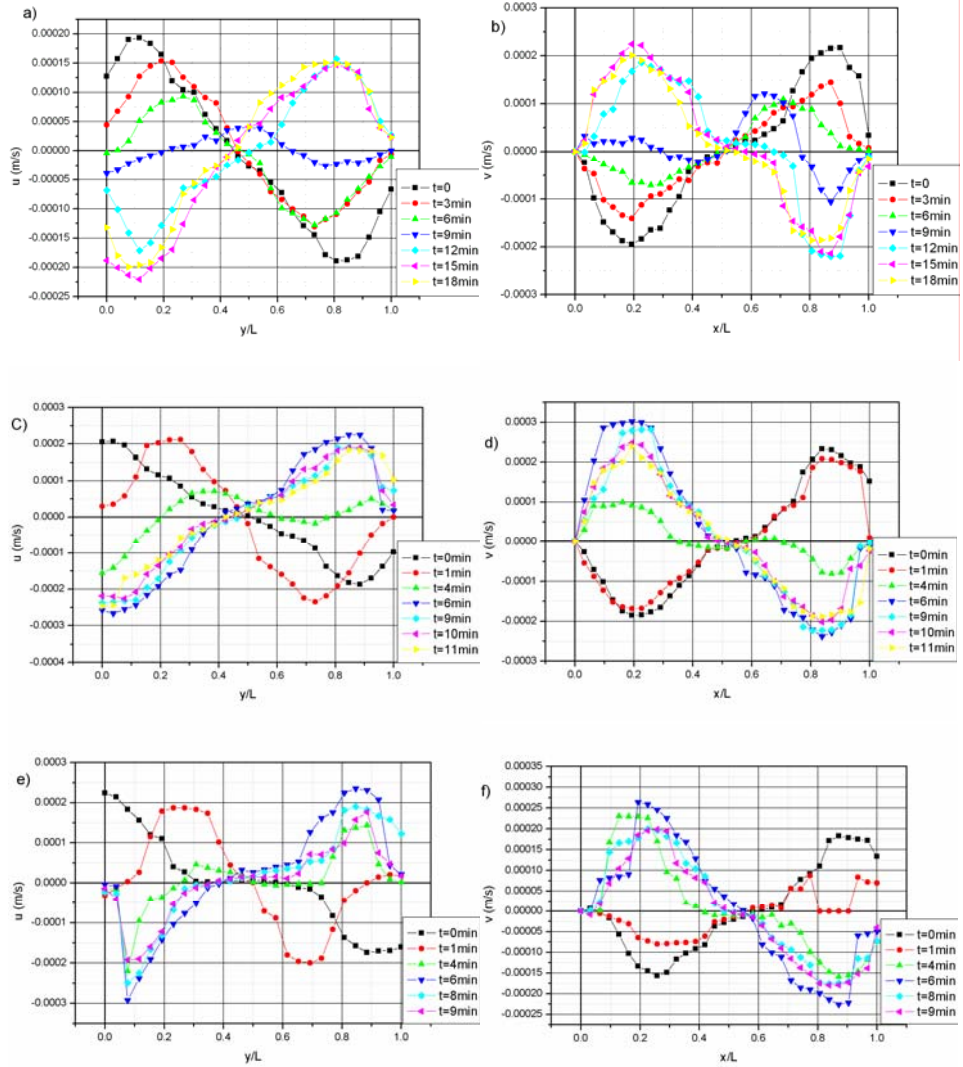


Figura 3.13. Efecto de la amplitud de oscilación para  $Ra = 1 \times 10^5$ . a),c) y d) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$  para  $\theta = +/-15^\circ, +/-45^\circ$  y  $+/-75^\circ$ , respectivamente. b), d) y f) Perfiles de velocidad en la dirección  $y$  para  $\theta = +/-15^\circ, +/-45^\circ$  y  $+/-75^\circ$ , respectivamente.

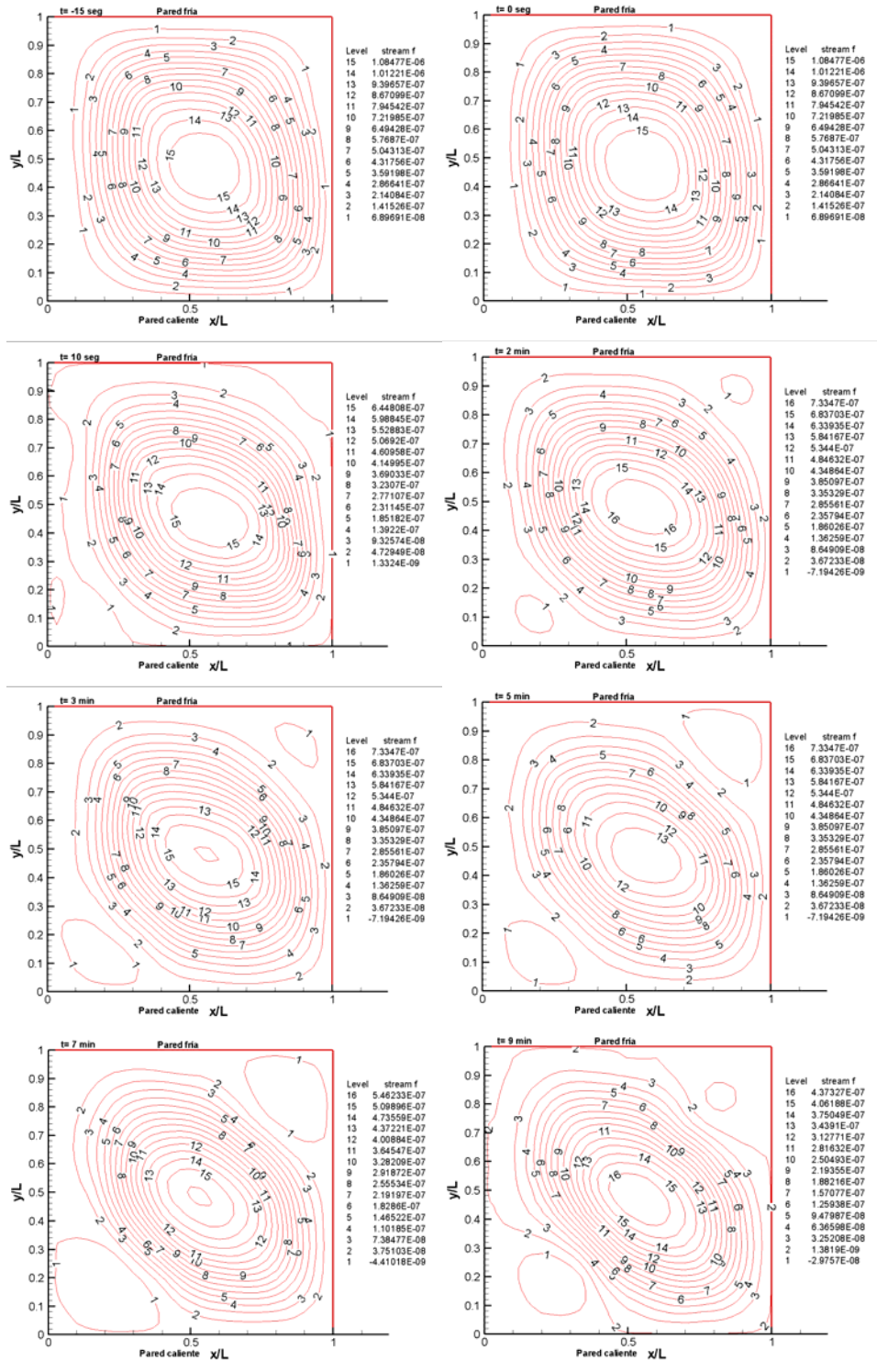


Figura 3.14a. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.

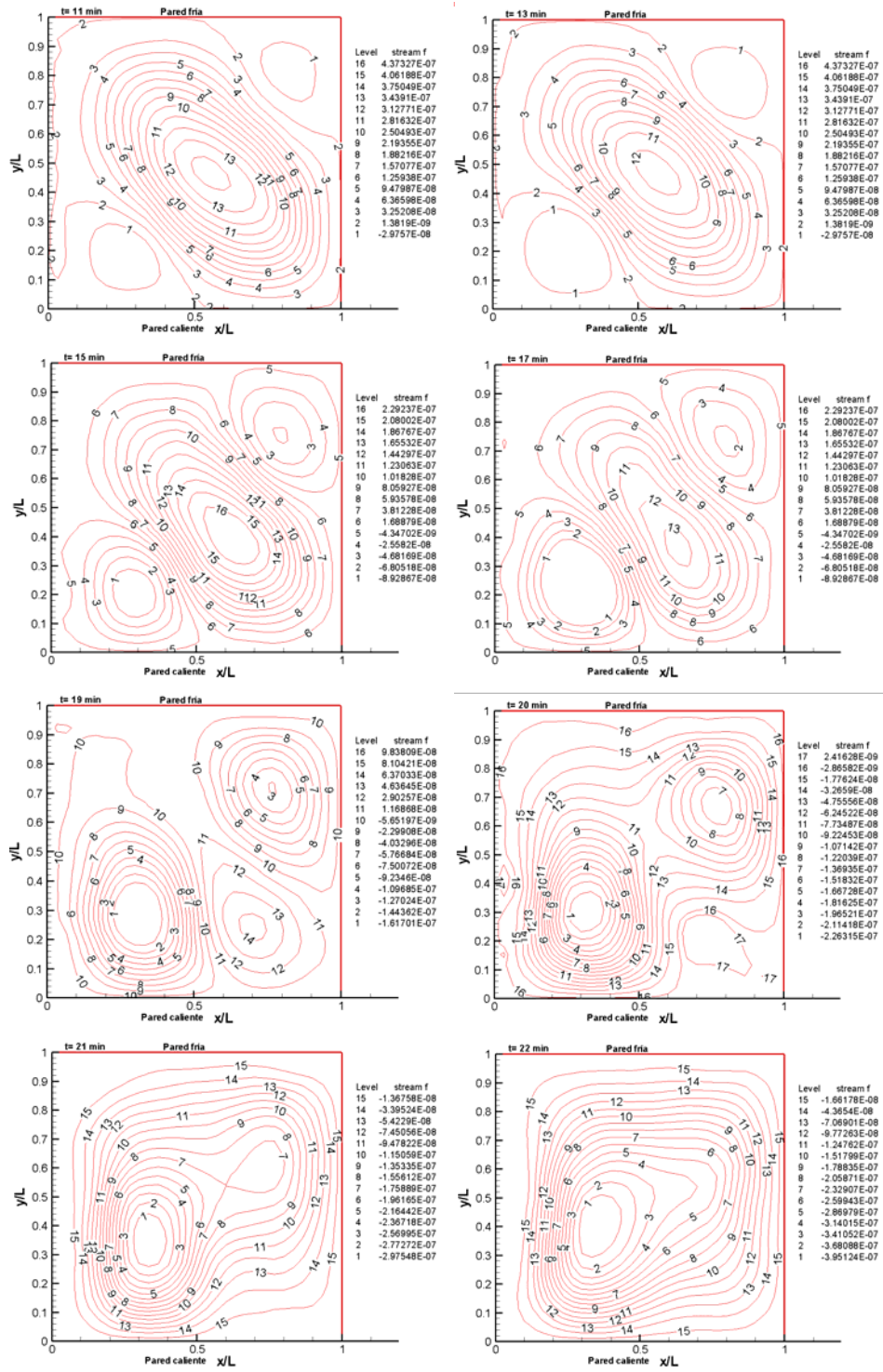


Figura 3.14b. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro  $= \pm 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.

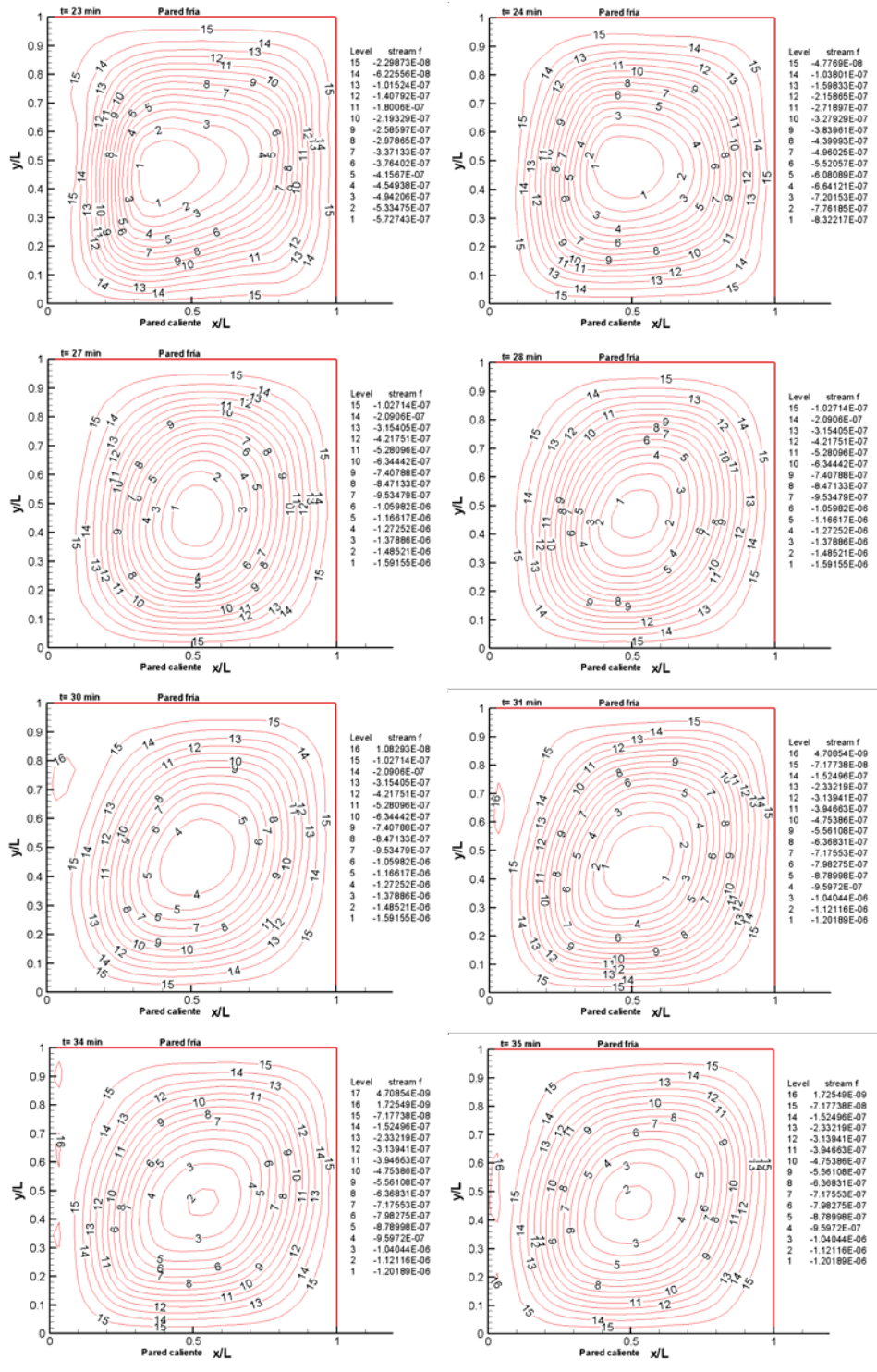


Figura 3.14c. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro senoidal.

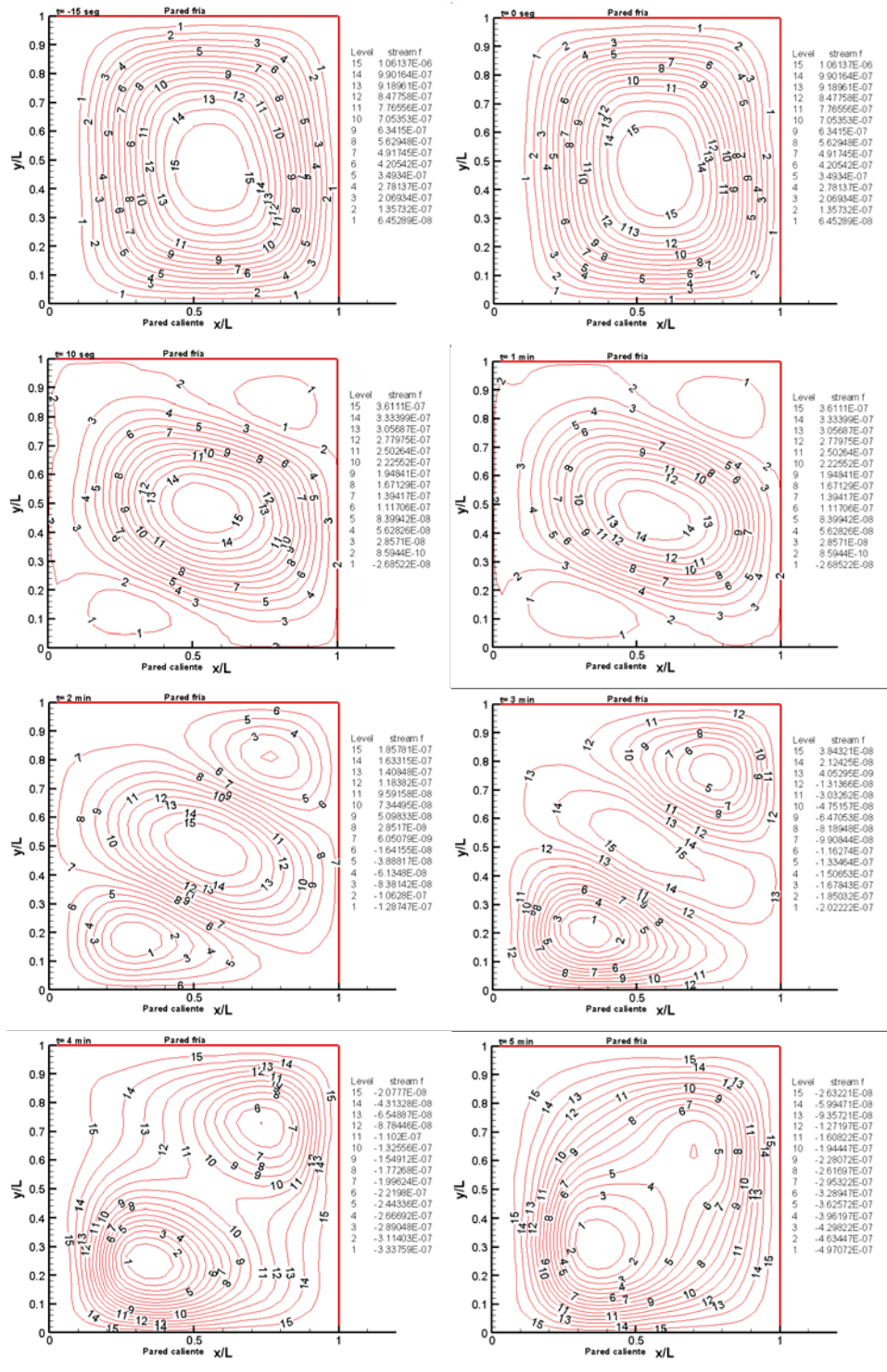


Figura 3.15a. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro  $= +/ - 45^\circ$ . Relación de giro senoidal.

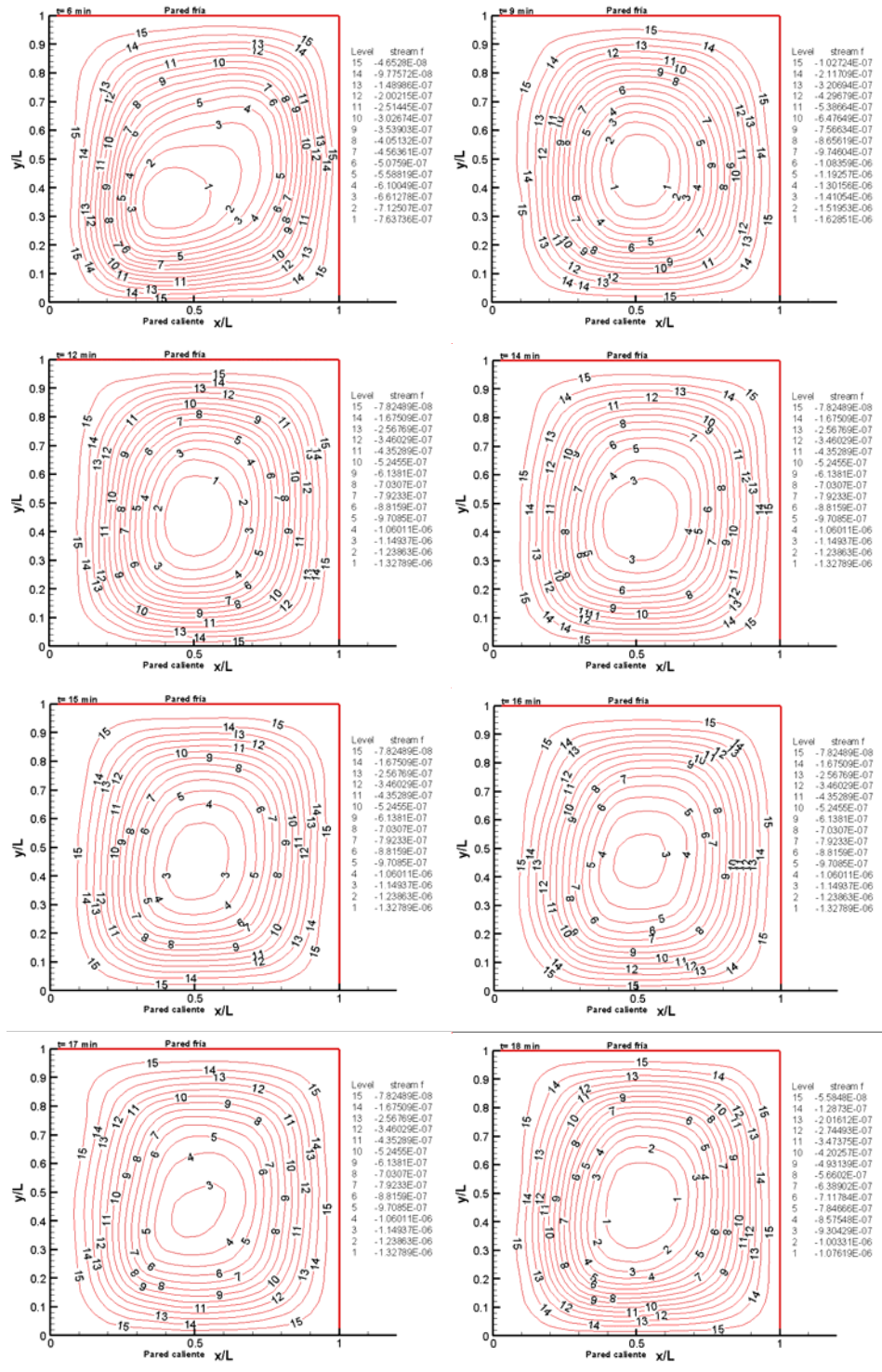


Figura 3.15b. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 45^\circ$ . Relación de giro senoidal.

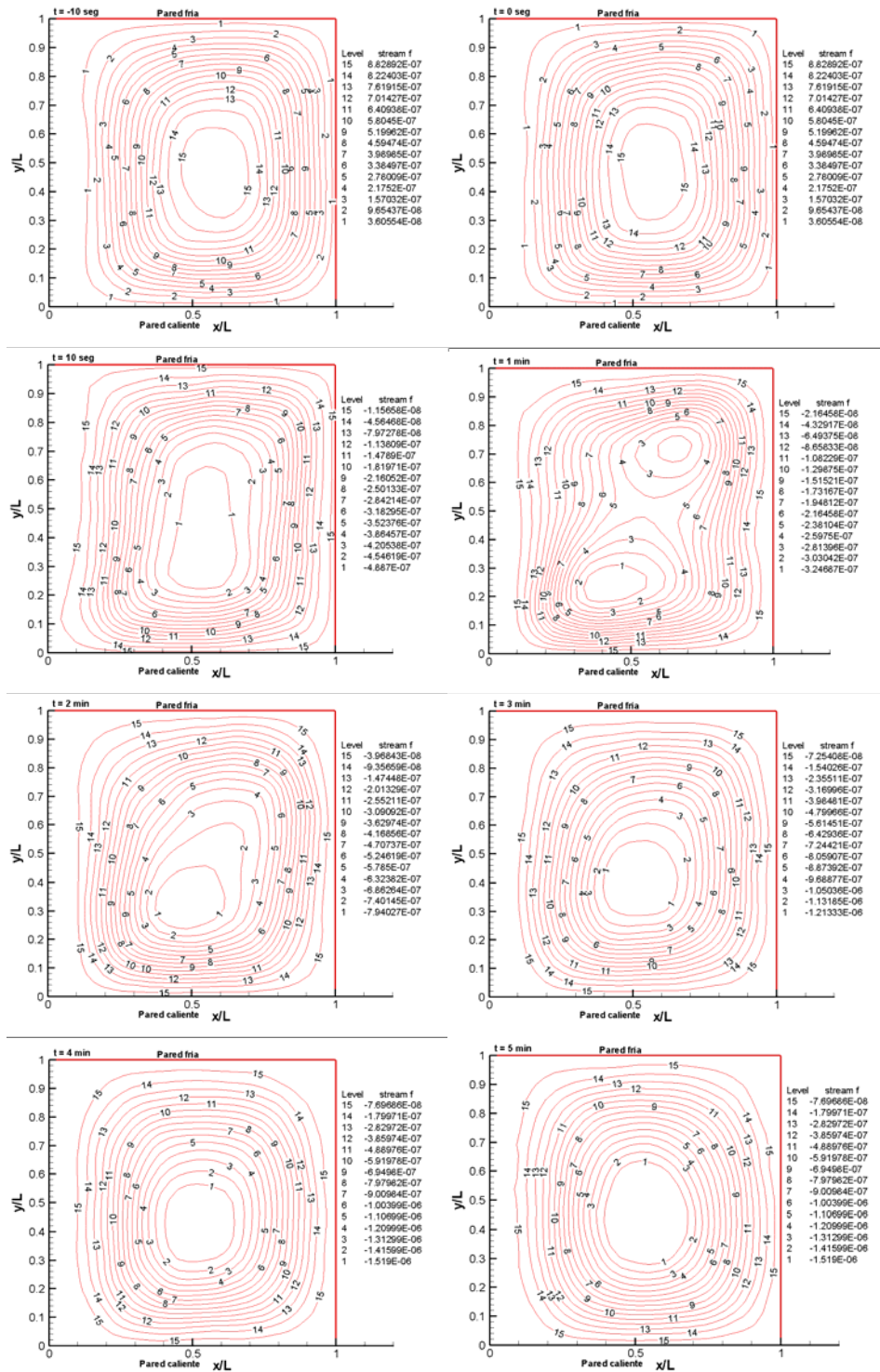


Figura 3.16a. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro  $= \pm 75^\circ$ .  
Relación de giro senoidal.

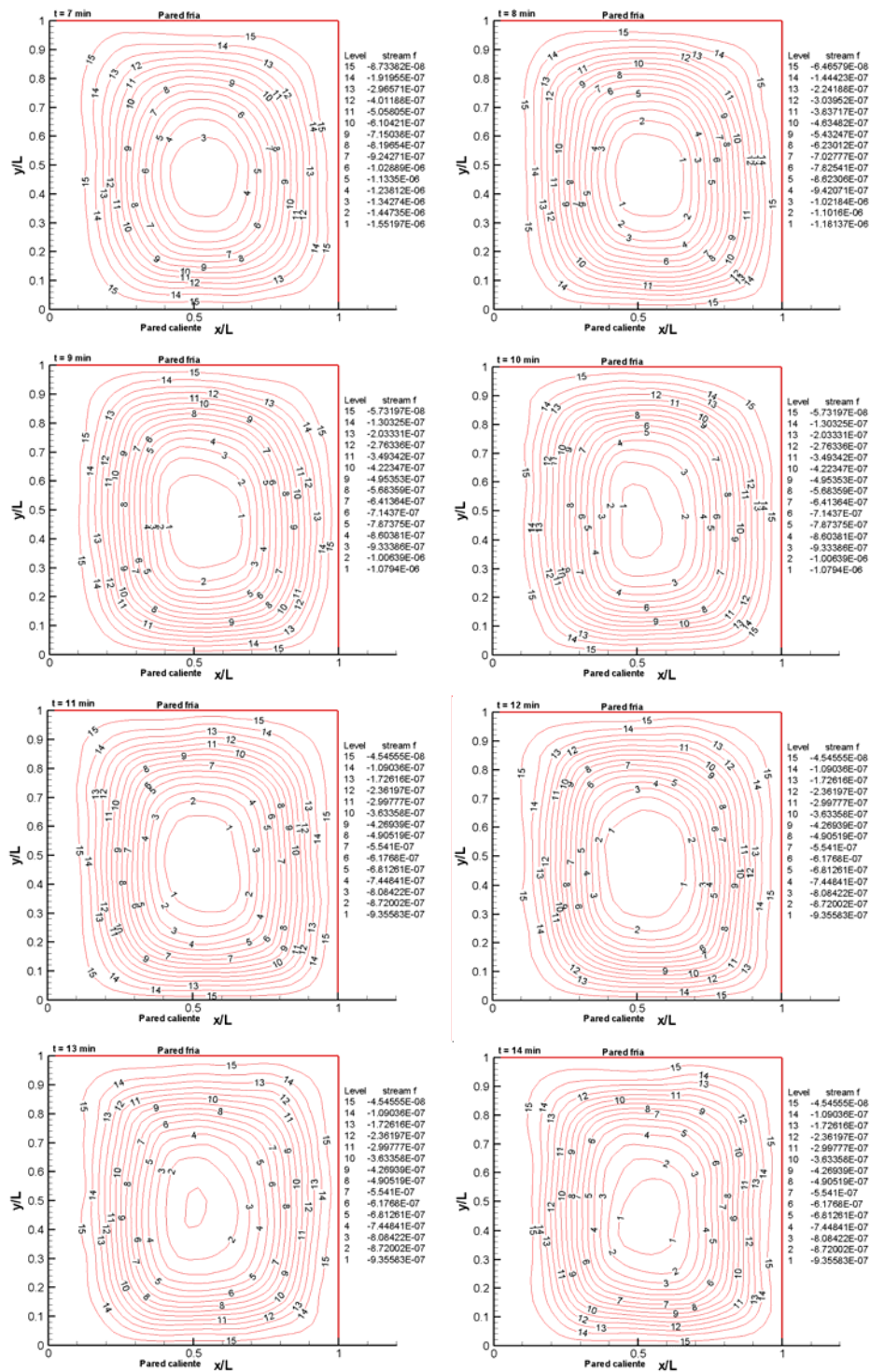


Figura 3.16b. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 75^\circ$ . Relación de giro senoidal.



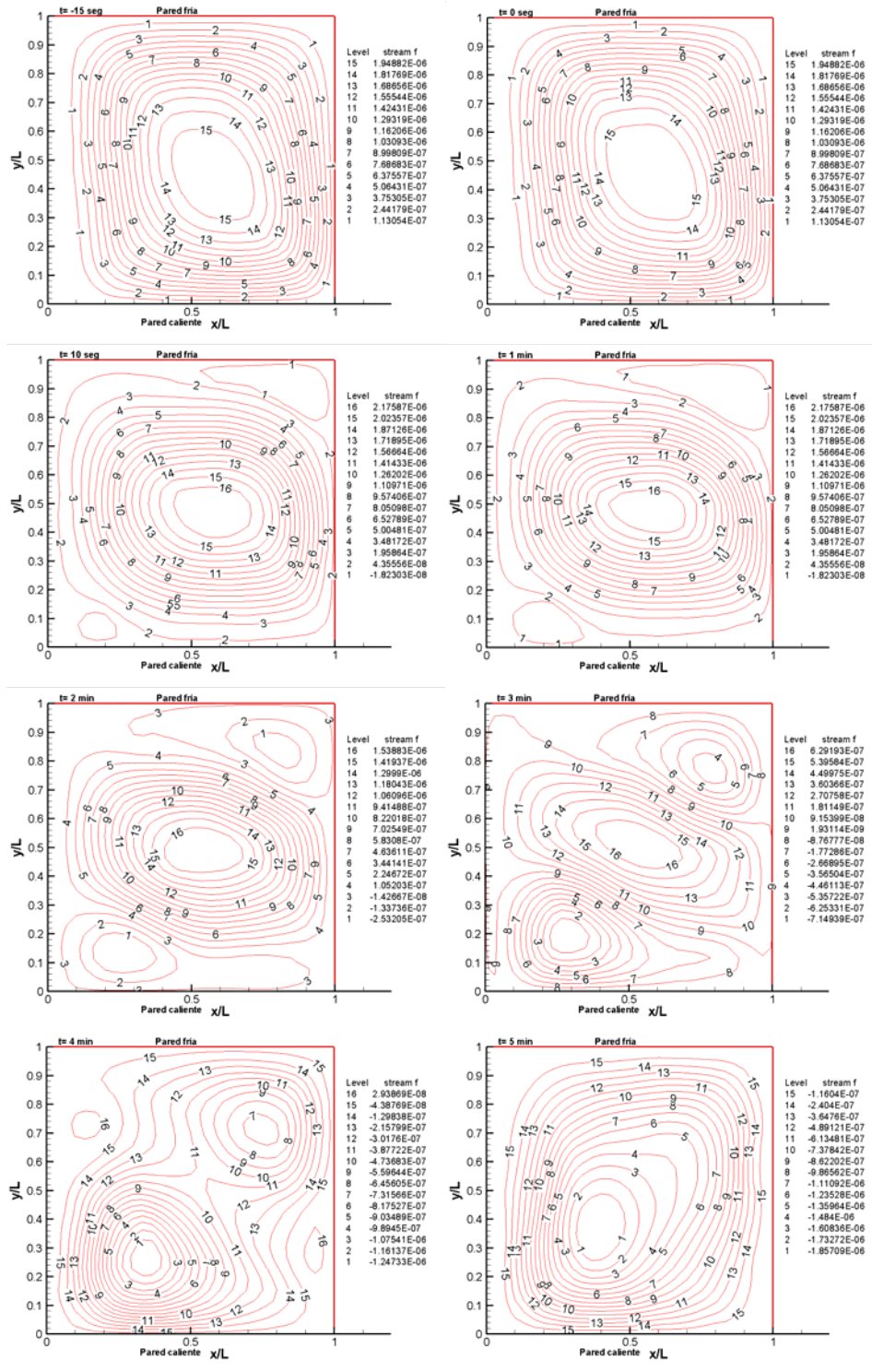


Figura 3.17a. Líneas de corriente para  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro  $= +/ - 45^\circ$ . Relación de giro senoidal.

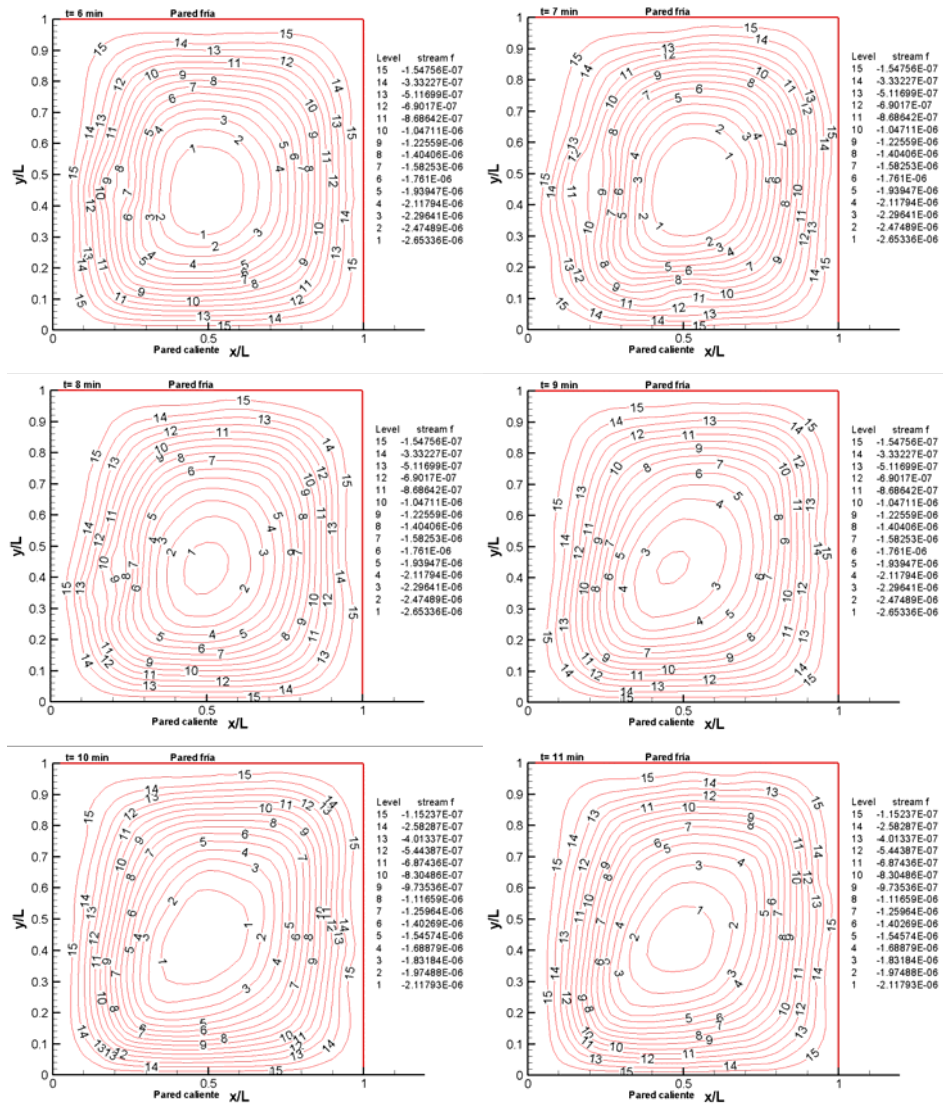


Figura 3.17b. Líneas de corriente para  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro =  $\pm 45^\circ$ . Relación de giro senoidal.

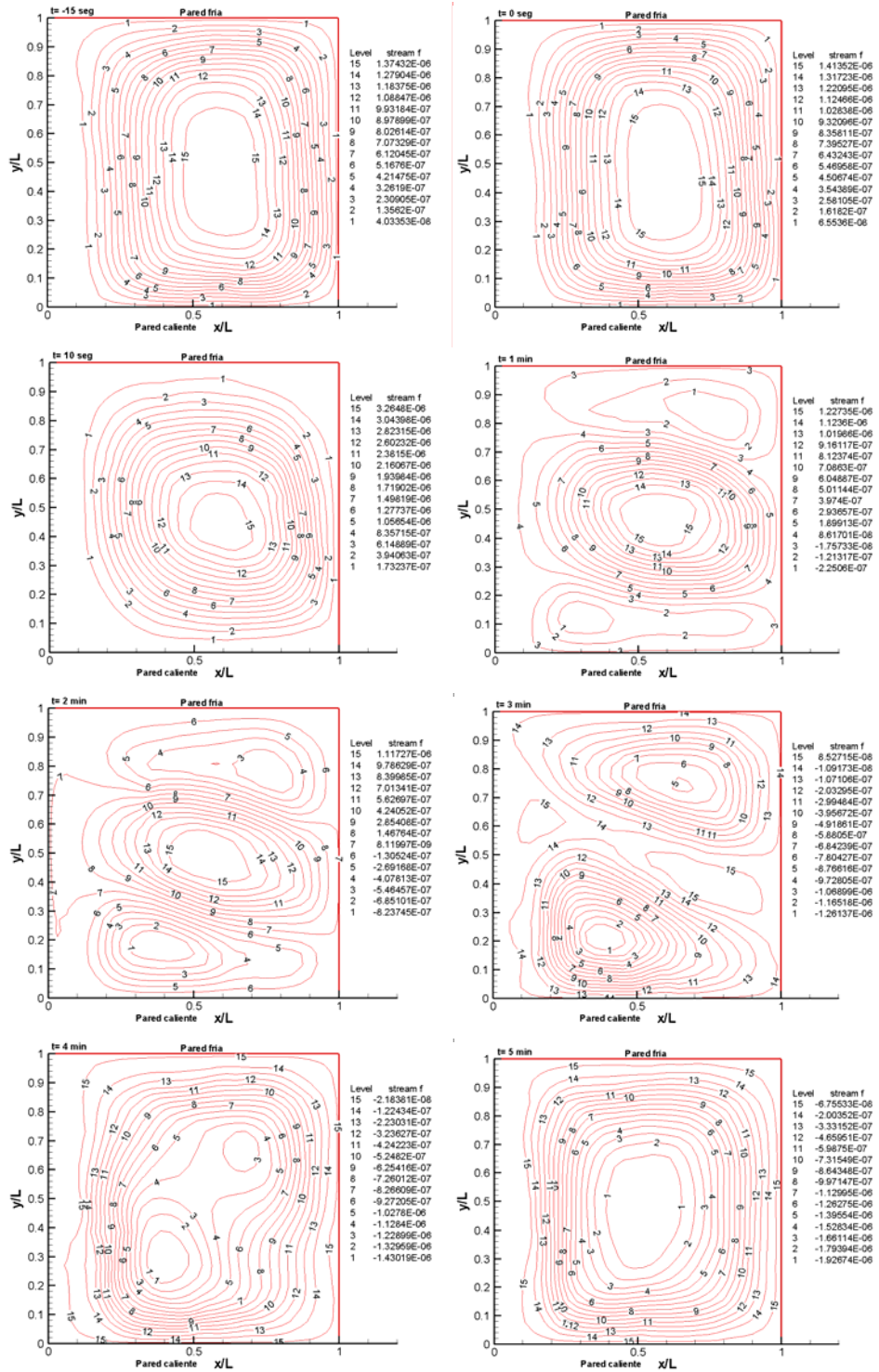


Figura 3.18a. Líneas de corriente para  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro =  $\pm 75^\circ$ .  
Relación de giro senoidal.

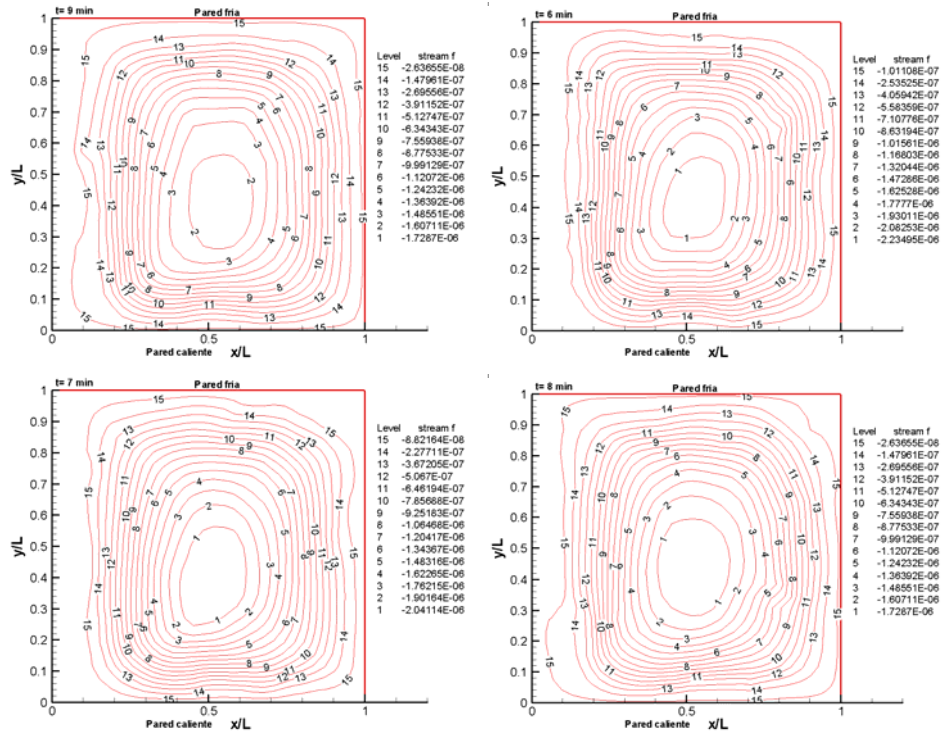


Figura 3.18b. Líneas de corriente para  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro =  $\pm 75^\circ$ .  
Relación de giro senoidal

### 3.2.1.3 Dependencia con el número de Rayleigh.

En esta ocasión se considera constante la amplitud de giro en tanto que el número de Rayleigh varía; se utilizan los resultados experimentales obtenidos para una relación de giro cuadrada. Con una amplitud de giro de  $\pm 15^\circ$ , en la Figura 3.8 se muestran los campos de iso-velocidad, líneas de corriente y campos de velocidad y para la Figura 3.22 solamente se presentan las líneas de corriente. Conforme se incrementa el valor del número de Rayleigh, disminuye el tiempo necesario para que el nuevo patrón convectivo alcance el estado permanente. Para un  $Ra = 3 \times 10^4$ , la fusión de las celdas convectivas secundarias ocurre al minuto 22 y llega al estado permanente a los 35 minutos.

Para un  $Ra = 1 \times 10^5$ , el tiempo de fusión de las celdas convectivas secundarias y para alcanzar el estado permanente es de 12 y 18 minutos, respectivamente. Para ambos números de Rayleigh, cuando la cavidad se encuentra en  $\theta = -15^\circ$ , se presenta una estructura con una sola celda convectiva alargada sobre la diagonal que corre de la esquina inferior derecha a la superior izquierda, para  $Ra = 1 \times 10^5$  la celda convectiva presenta mayor deformación que para  $Ra = 3 \times 10^4$ . En ambos casos la celda convectiva gira en sentido contrario a las manecillas del reloj y el eje de rotación se encuentra en el centro de la cavidad,  $y/L=0.5$  y  $x/L=0.5$ . Cuando la cavidad ha alcanzado el estado permanente en  $+15^\circ$ , se presenta una celda convectiva que gira en el sentido de las manecillas del reloj y cuyo centro se ubica en el centro de la cavidad,  $y/L=0.5$  y  $x/L=0.5$ . La Figura 3.19 muestra la evolución de los perfiles de velocidad en la dirección  $x$  e  $y$  para ambos números de Rayleigh.

Con una amplitud de giro de  $\pm 45^\circ$ , y un  $Ra = 3 \times 10^4$ , Figura 3.23, se tienen tiempos de 6 y 18 minutos para que se fusionen las celdas convectivas secundarias y se alcance el estado permanente, respectivamente. Mientras que para  $Ra = 1 \times 10^5$ , Figura 3.24, las celdas convectivas secundarias se fusionan transcurridos 5 minutos y en 10 minutos el flujo convectivo alcanza el estado permanente.

Para una amplitud de giro de  $\pm 75^\circ$  y un  $Ra = 3 \times 10^4$ , Figura 3.25, cuando la cavidad se encuentra en  $\theta = -75^\circ$ , se presenta una celda convectiva con sentido de giro contrario a las manecillas del reloj ligeramente alargada hacia las paredes caliente y fría de la cavidad, con el eje de rotación ubicado en  $y/L=0.5$  y  $x/L=0.5$ . Cuando la cavidad se encuentra en  $\theta = -75^\circ$  y el patrón de flujo convectivo ha alcanzado el estado permanente, 12 minutos, el patrón convectivo presenta una celda convectiva que gira en el sentido de las manecillas del reloj y cuyo eje de giro se encuentra en el centro de la cavidad. Lo mismo sucede cuando el  $Ra = 1 \times 10^5$ , pero en esta ocasión el tiempo de estabilización es de 8 minutos y la deformación de la celda convectiva hacia las paredes caliente y fría es más marcado.

Fue mencionado con anterioridad que una vez que el sentido de giro de la celda convectiva ha cambiado, lo que ocurre después de que se fusionan las celdas convectivas secundarias, se presenta un incremento de la velocidad, Figuras 3.22 a 3.26 y 3.8. Para un  $Ra = 3 \times 10^4$  la componente de la velocidad en la dirección  $x$  llega a un valor máximo de  $1.4 \times 10^{-4} m/s$ ,  $1.6 \times 10^{-4} m/s$  y  $1.75 \times 10^{-4} m/s$ , mientras que para el estado permanente en  $+\theta$  la componente de la velocidad en la dirección  $x$  presenta los valores de  $1.1 \times 10^{-4} m/s$ ,  $1.2 \times 10^{-4} m/s$  y  $1.2 \times 10^{-4} m/s$  para amplitudes de giro de  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  y  $\pm 75^\circ$ , respectivamente. Mientras que para  $Ra = 1 \times 10^5$  amplitudes de  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  y  $\pm 75^\circ$  el incremento de la velocidad para la componente en la dirección  $x$  es mucho menor que para  $Ra = 3 \times 10^4$ , teniéndose los valores de  $2.25 \times 10^{-4} m/s$ ,  $2.5 \times 10^{-4} m/s$  y  $2.8 \times 10^{-4} m/s$ , para el estado permanente se presenta los valores de  $2 \times 10^{-4} m/s$ ,  $2.2 \times 10^{-4} m/s$  y  $2.2 \times 10^{-4} m/s$ , para amplitudes de giro de  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  y  $\pm 75^\circ$ , respectivamente. Ver graficas de las Figuras 3.19, 3.20 y 3.21. Lo que indica que el número de Rayleigh amortigua el sobresalto de la velocidad del patrón convectivo.

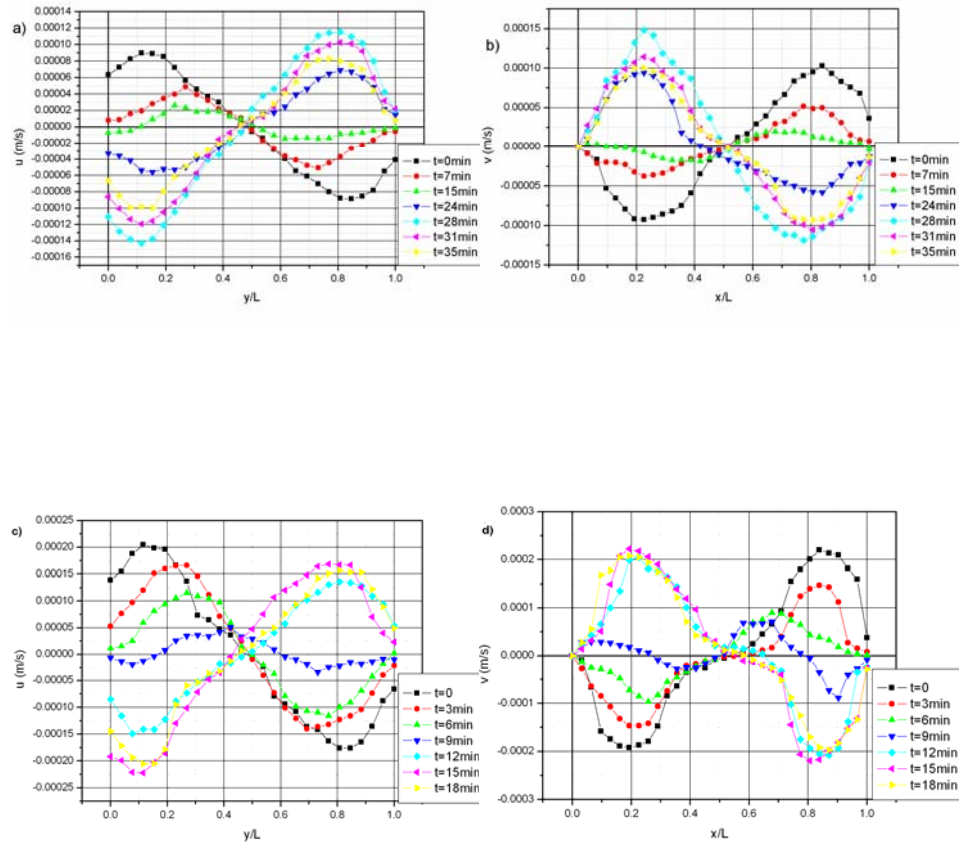


Figura 3.19. Efecto del número de Rayleigh para una amplitud de giro de  $\pm 15^\circ$ . a) y b) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$  e  $y$  para  $Ra = 3 \times 10^4$ , respectivamente. Para  $Ra = 1 \times 10^5$  c) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$ . d) Perfil de velocidad en la dirección  $y$ .

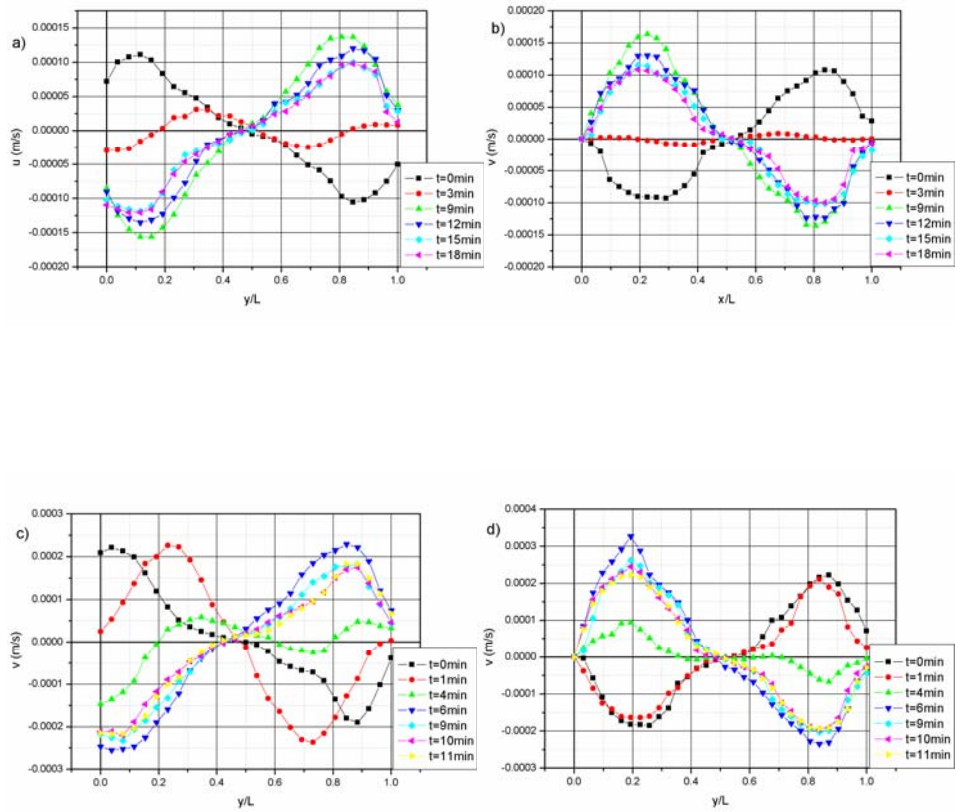


Figura 3.20. Efecto del número de Rayleigh para una amplitud de giro de  $+45^\circ$ .  
 a) y b) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$  e  $y$  para  $Ra = 3 \times 10^4$ , respectivamente. Para  $Ra = 1 \times 10^5$  c) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$  d) Perfil de velocidad en la dirección  $y$ .



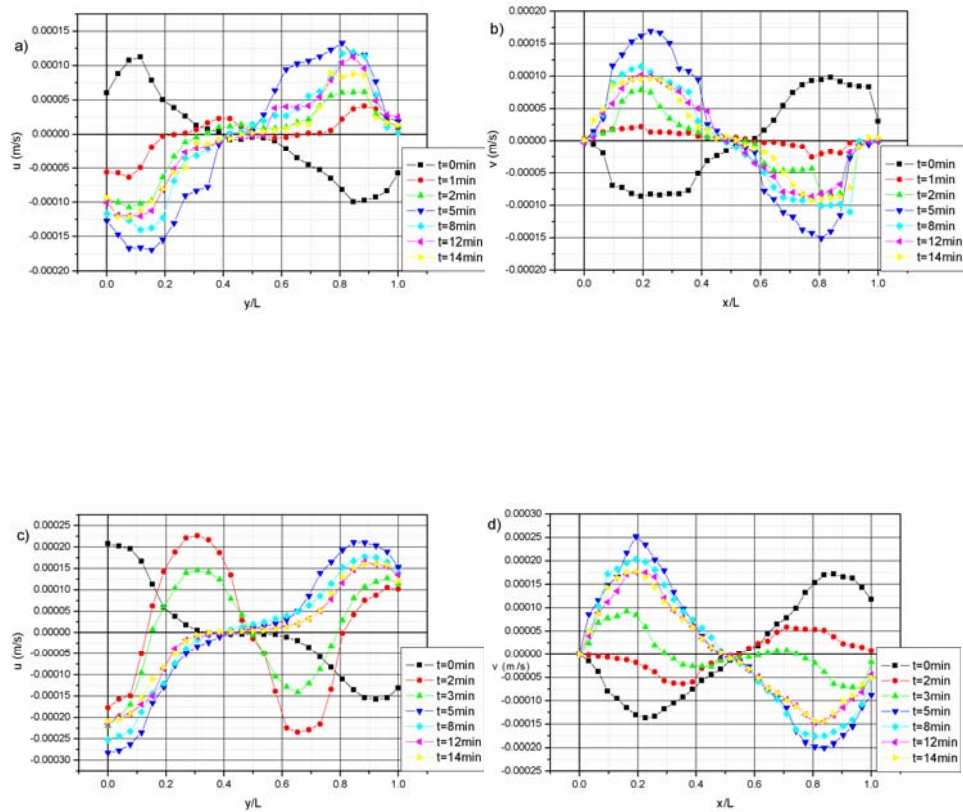


Figura 3.21. Efecto del número de Rayleigh para una amplitud de giro de  $\pm 75^\circ$ . a) y b) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$  e  $y$  para  $Ra = 3 \times 10^4$ , respectivamente. Para  $Ra = 1 \times 10^5$  c) Perfiles de velocidad en la dirección  $x$ . d) Perfil de velocidad en la dirección  $y$ .

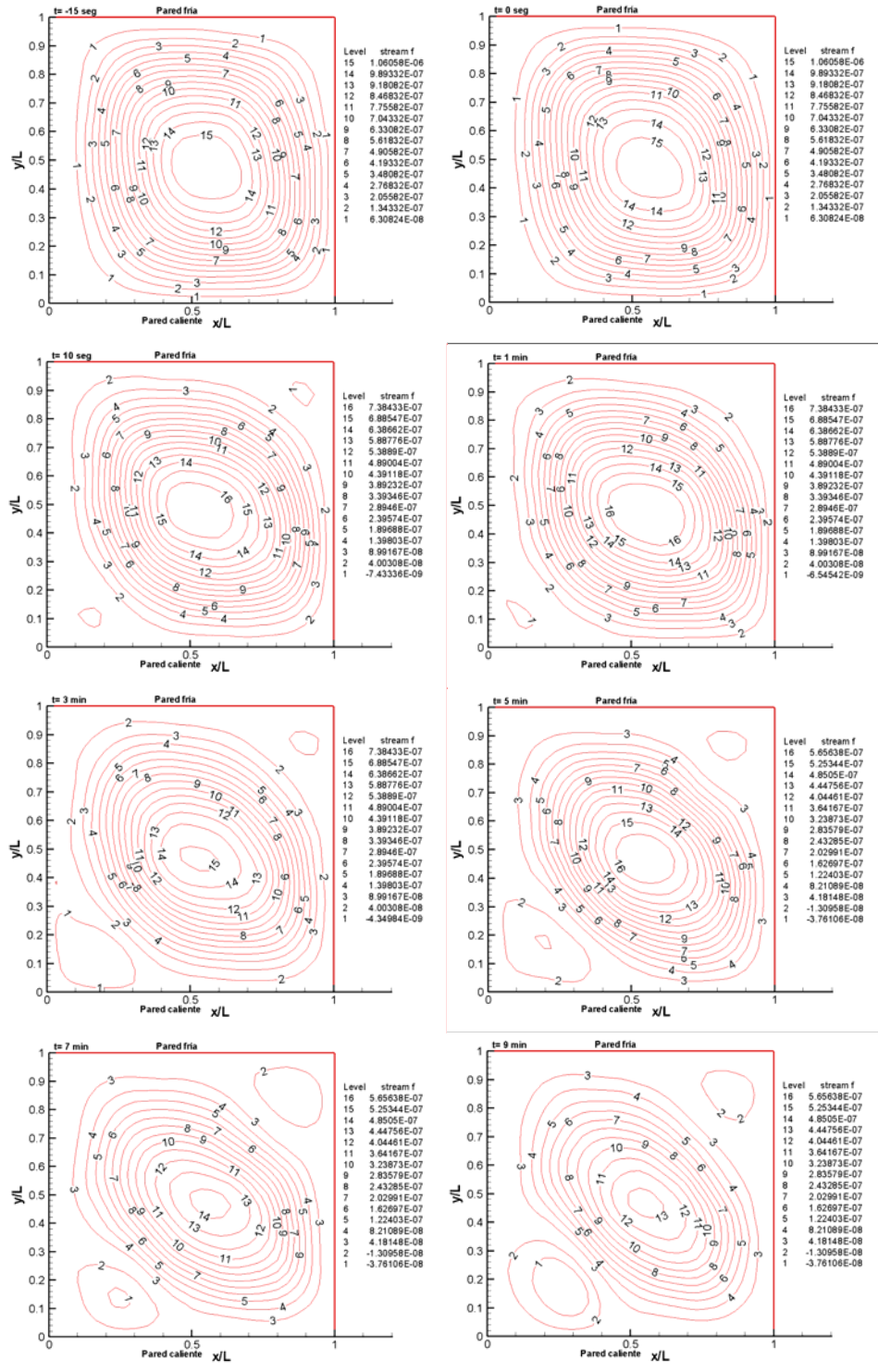


Figura 3.22a. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

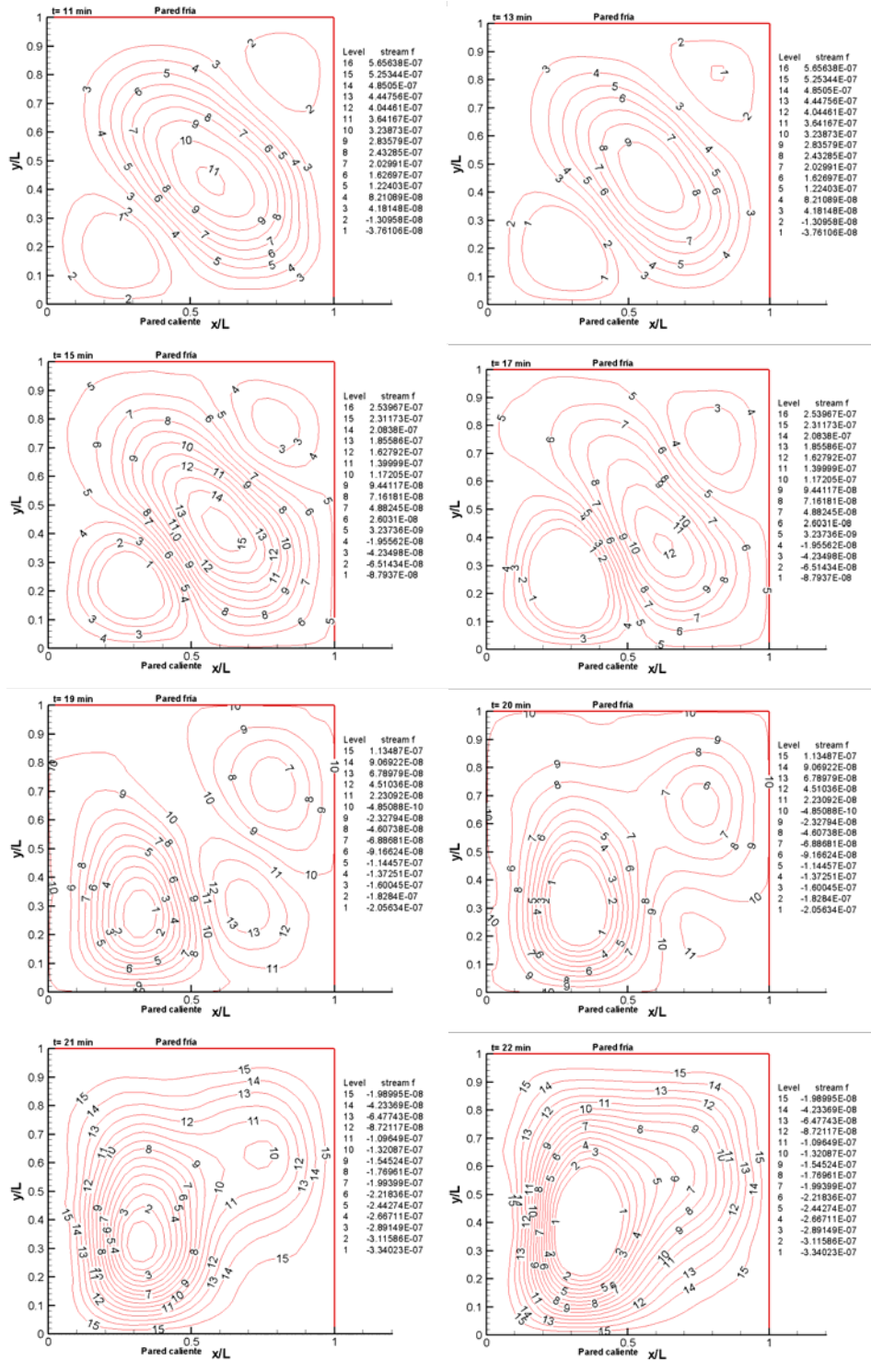


Figura 3.22b. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

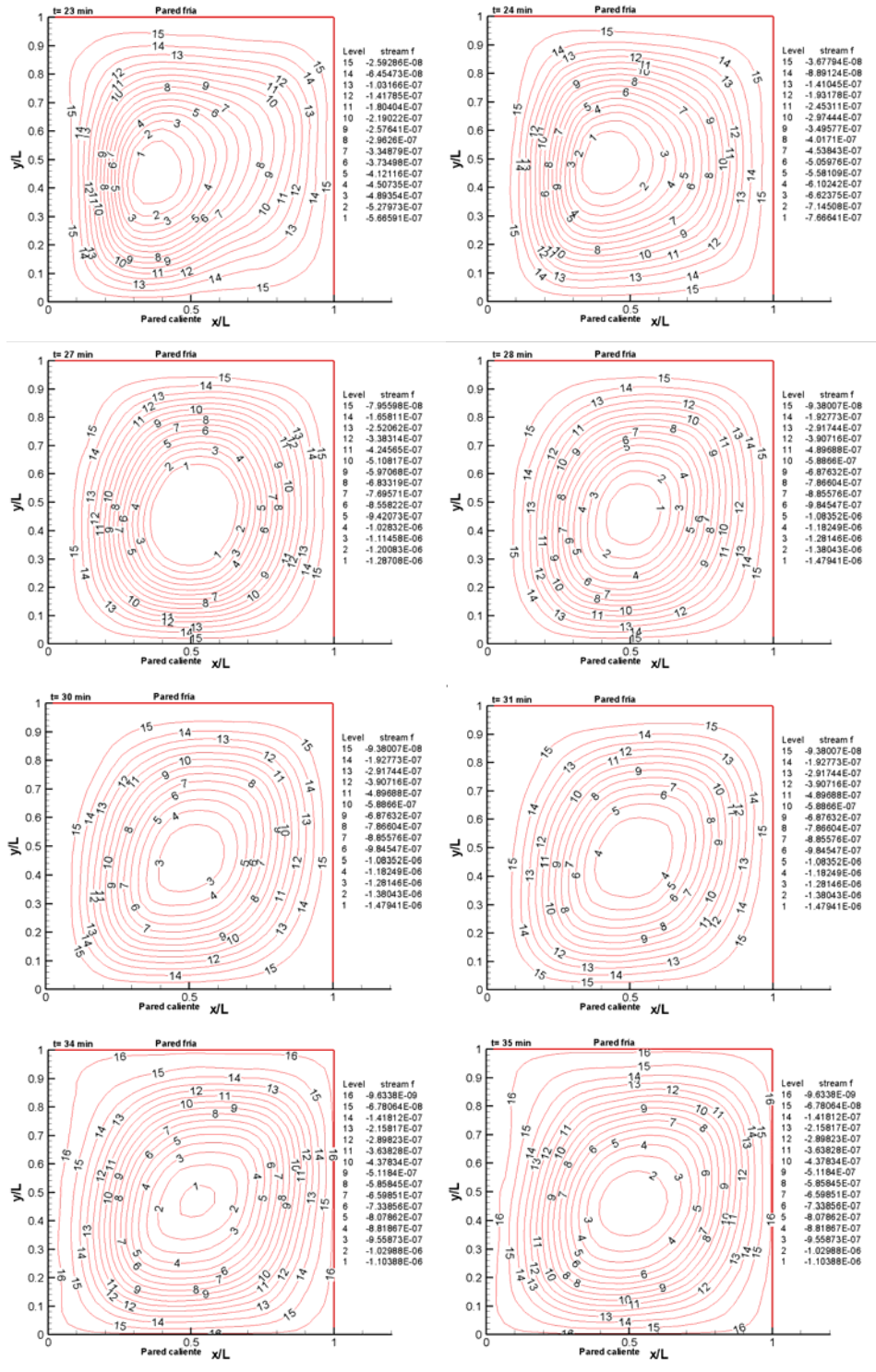


Figura 3.22c. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro  $= \pm 15^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

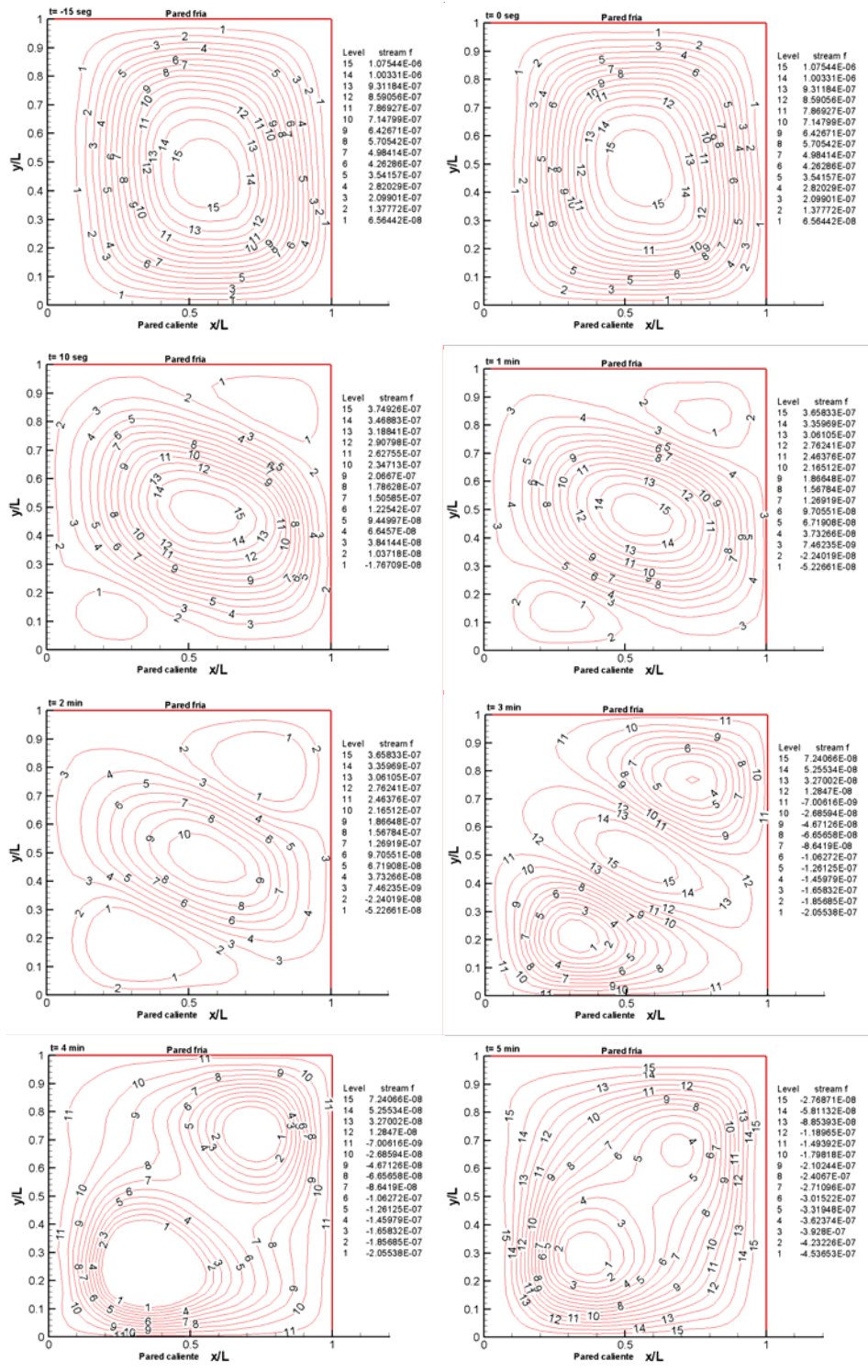


Figura 3.23a. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 45^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

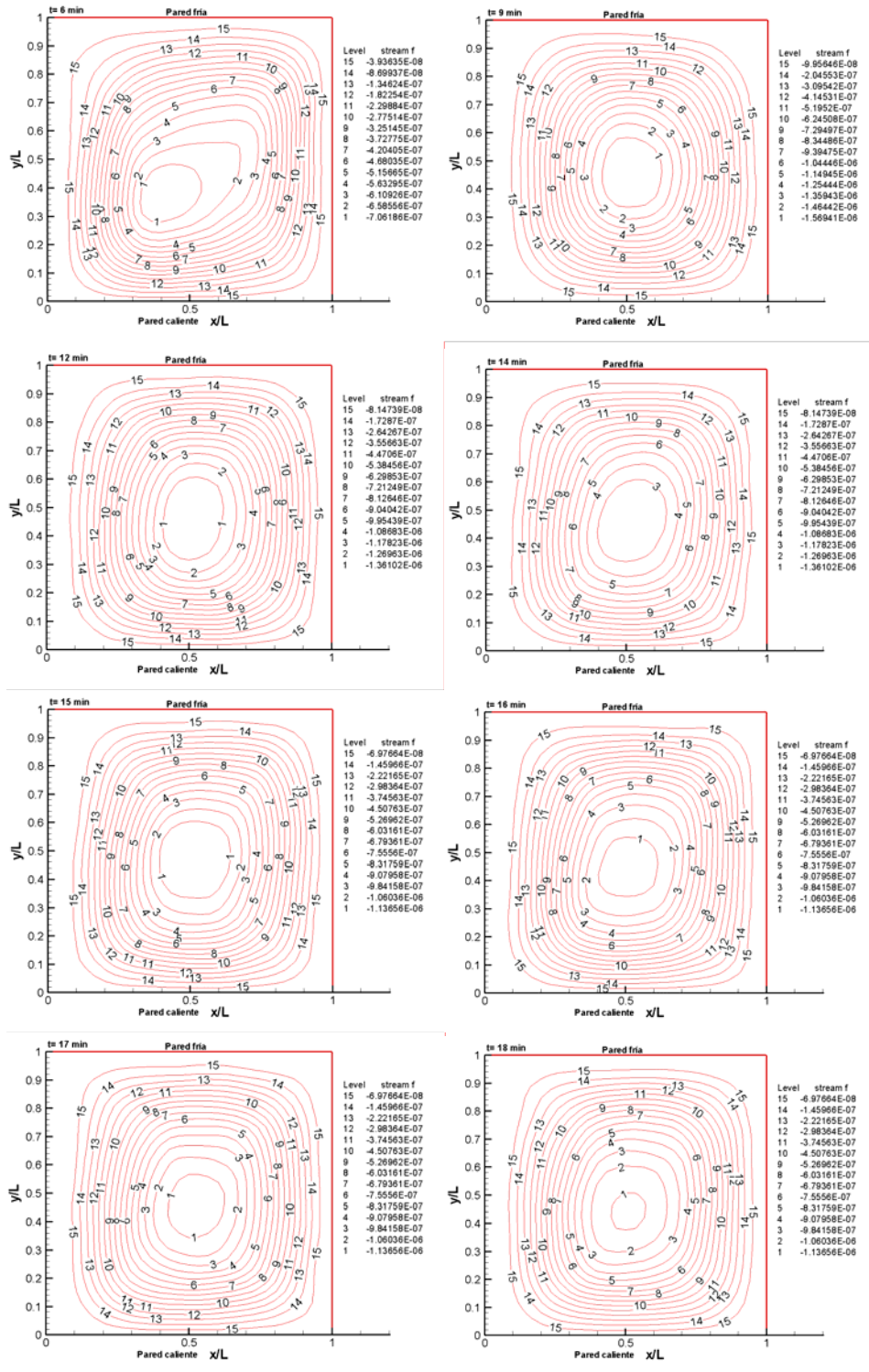


Figura 3.23b. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 45^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

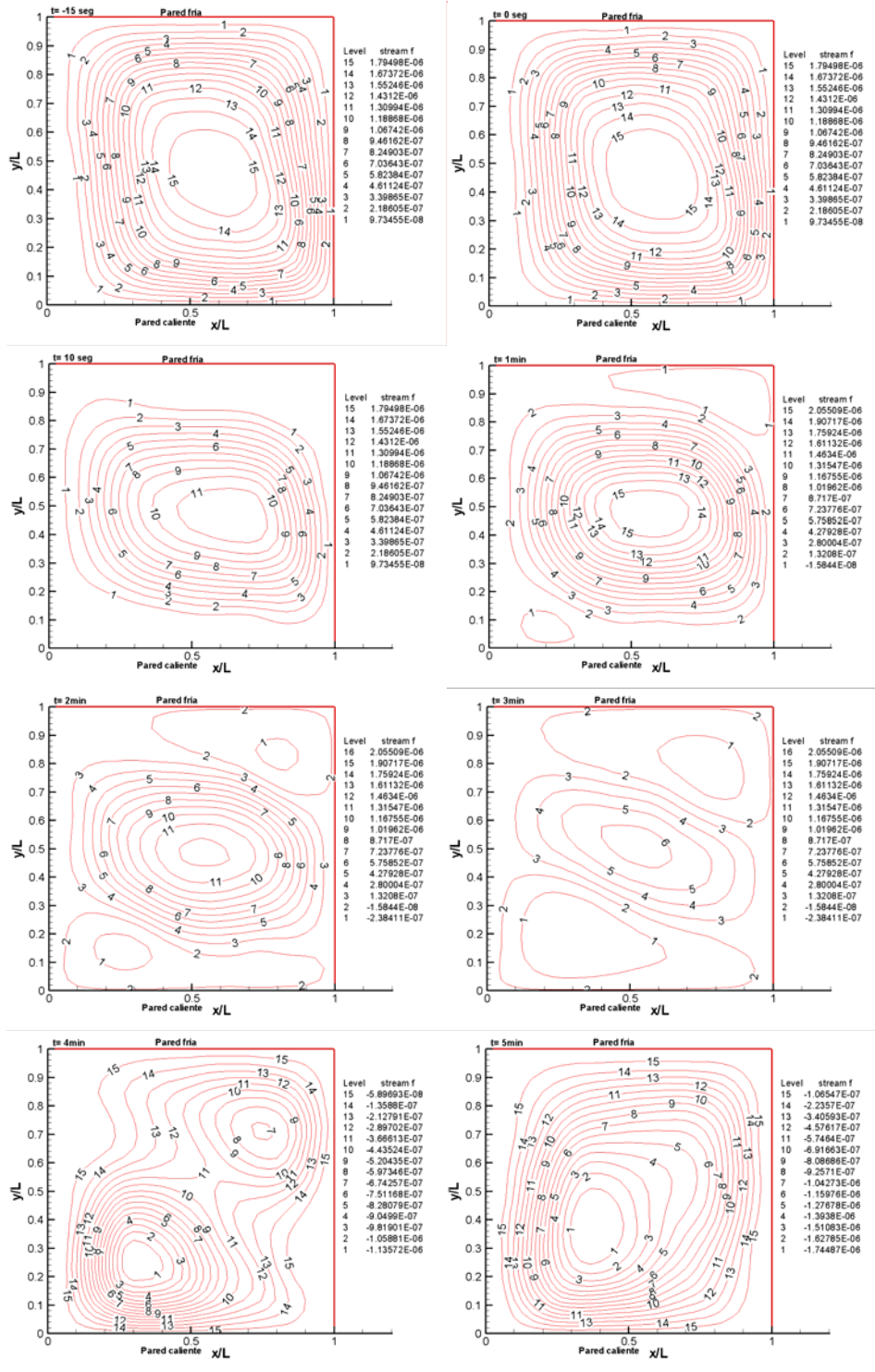


Figura 3.24a. Líneas de corriente para  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro =  $\pm 45^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

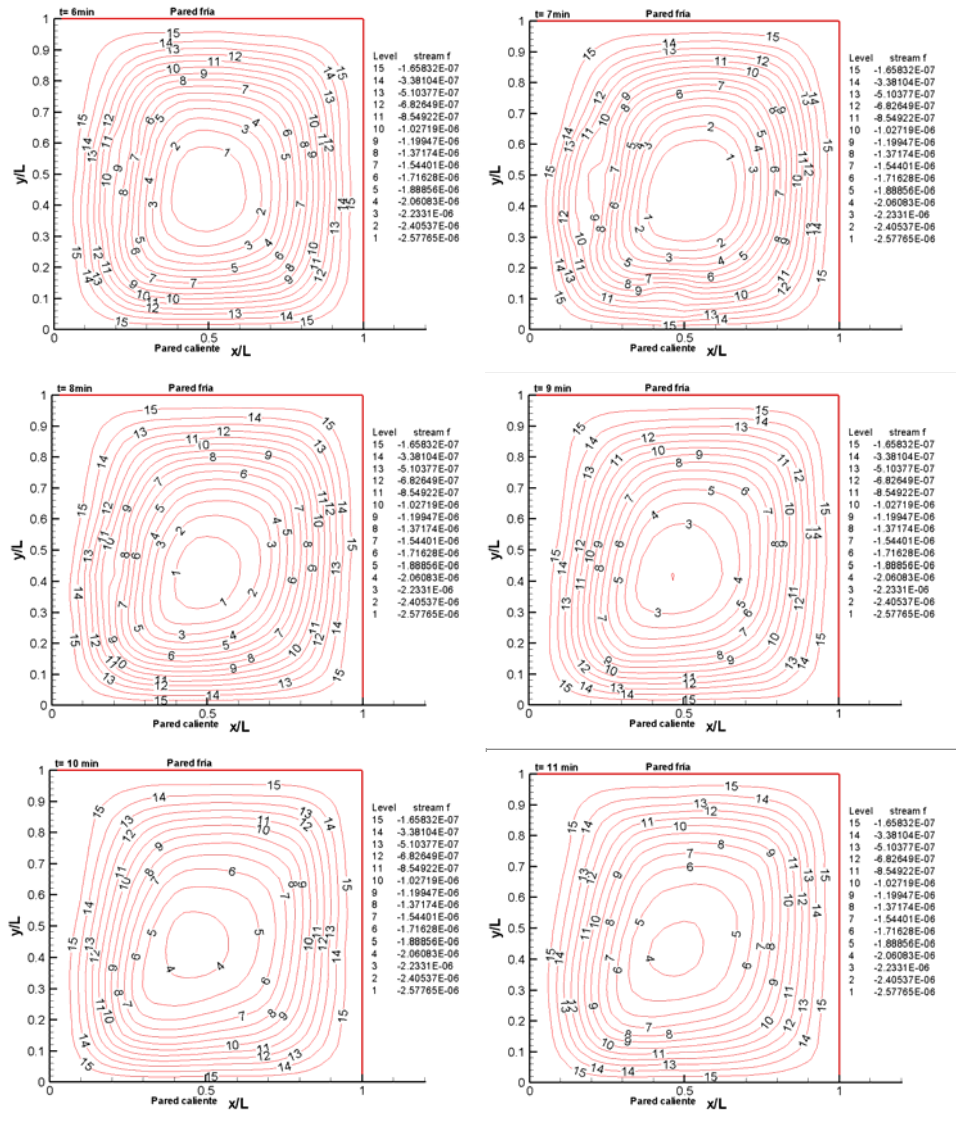


Figura 3.24b. Líneas de corriente para  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro =  $\pm 45^\circ$ . Relación de giro cuadrada.



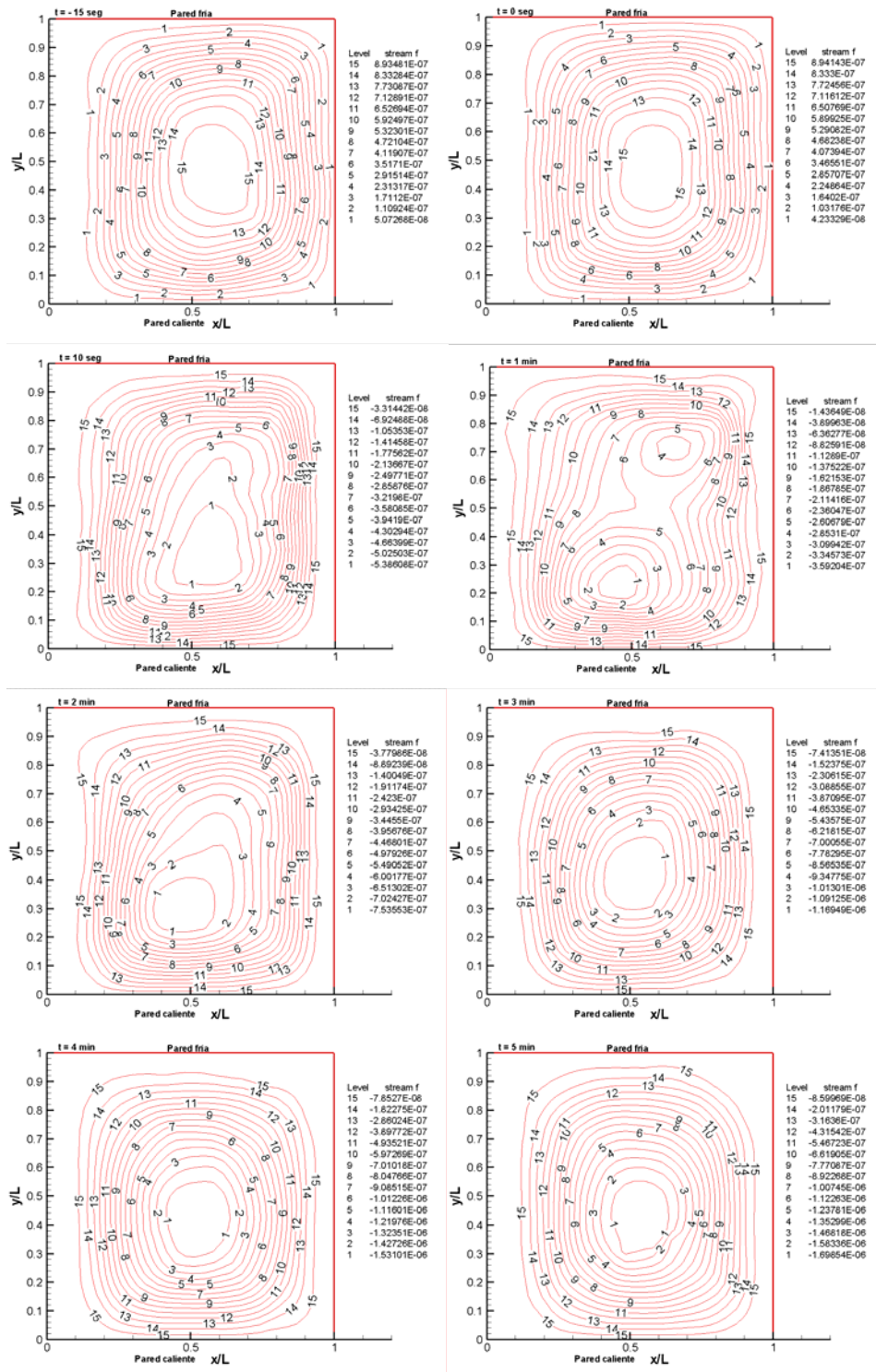


Figura 3.25a. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 75^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

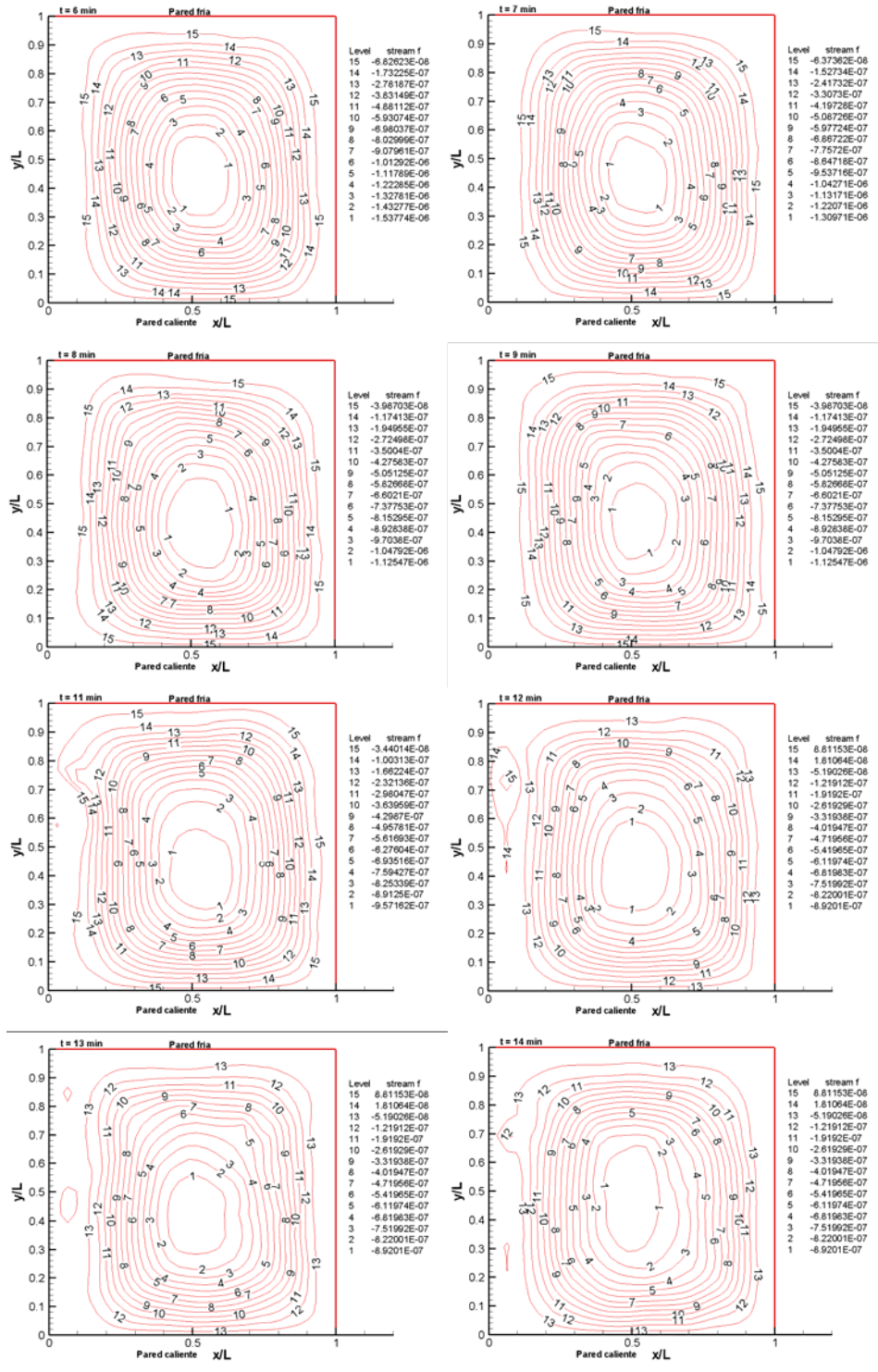


Figura 3.25b. Líneas de corriente para  $Ra = 3 \times 10^4$ , amplitud de giro =  $\pm 75^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

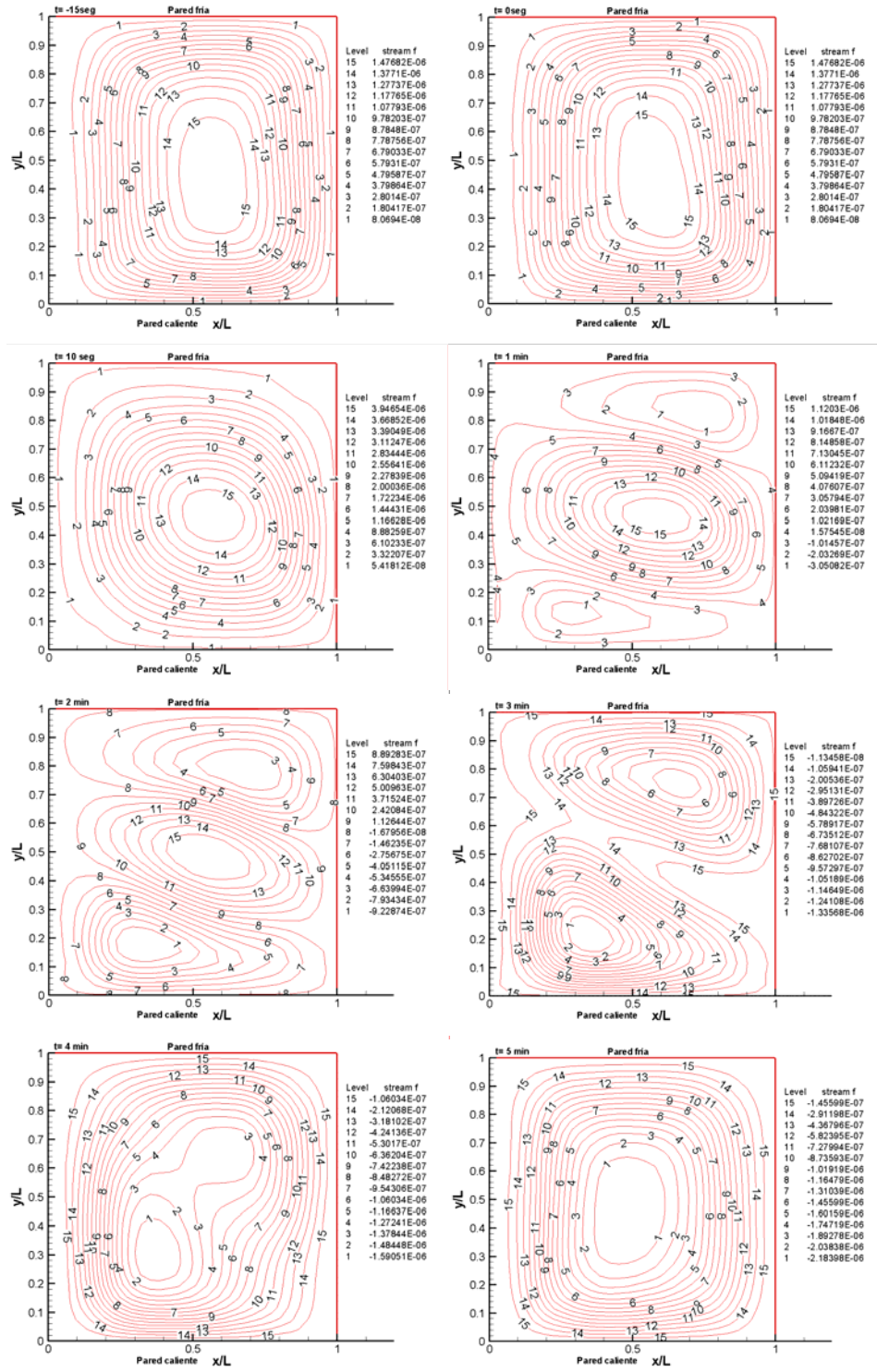


Figura 3.26a. Líneas de corriente para  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro =  $\pm 75^\circ$ .  
Relación de giro cuadrada.

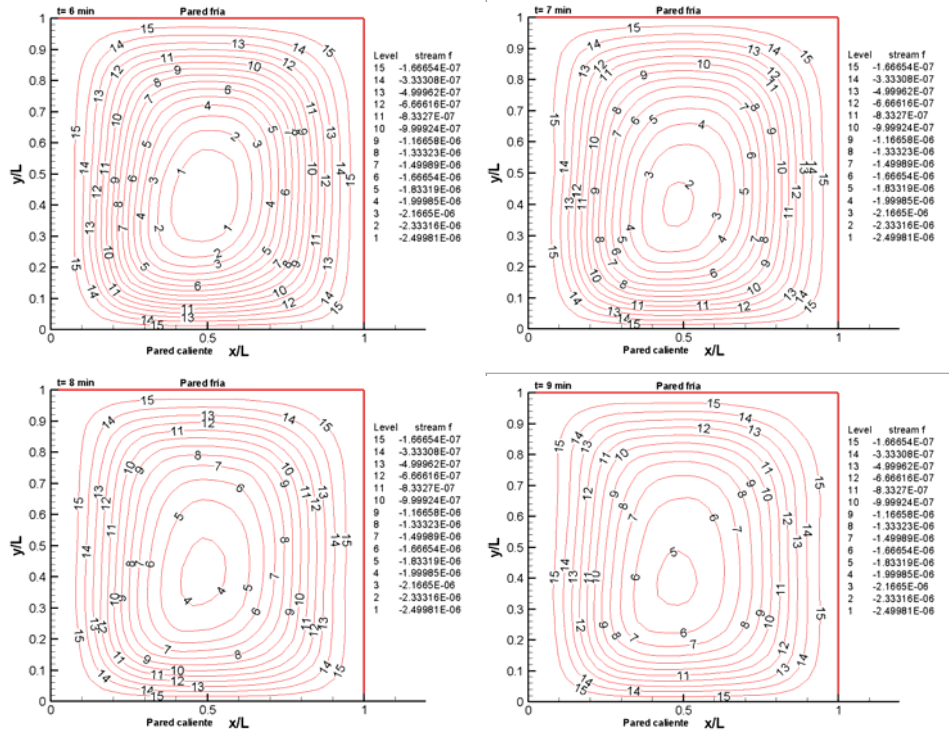


Figura 3.26b. Líneas de corriente para  $Ra = 1 \times 10^5$ , amplitud de giro =  $\pm 75^\circ$ . Relación de giro cuadrada.

Por otro lado, cuando se incrementa el número de Rayleigh disminuye el tiempo de estabilización del patrón convectivo en un 50% aproximadamente, para la misma amplitud de giro. Mientras que el valor de las componentes de la velocidad  $u$  y  $v$ , se duplica. Por ejemplo, con una amplitud de giro de  $\pm 15^\circ$  y un  $Ra = 3 \times 10^4$ , cuando la cavidad se encuentra en  $-15^\circ$ , es decir todavía no gira, las componentes de la velocidad  $u$  y  $v$  tienen un valor máximo de  $9 \times 10^{-5} (m/s)$  y  $-9 \times 10^{-5} (m/s)$ , respectivamente, en tanto que para  $Ra = 1 \times 10^5$ , se tienen valores máximos de  $u$  y  $v$  de  $20 \times 10^{-5} (m/s)$  y  $-20 \times 10^{-5} (m/s)$ , respectivamente. Para esa misma amplitud de giro y un  $Ra = 3 \times 10^4$  el tiempo de estabilización es de 35 minutos y para  $Ra = 1 \times 10^5$  el tiempo de estabilización es de 18 minutos.

### 3.2.2 Comportamiento del patrón convectivo cuando la cavidad oscila.

Esta última parte de la tesis se realizó para un  $Ra = 1 \times 10^5$ , una amplitud de oscilación de  $\pm 45^\circ$ , un  $Re_0 = 8.27 \times 10^{-3}$  y un periodo de oscilación de 60 minutos, es decir completa un ciclo de  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$  ida y vuelta en 60 minutos, Figura 3.30, con una relación de giro cuadrada. Este periodo de oscilación se escogió a partir de los resultados obtenidos de los experimentos realizados de forma cualitativa, donde se observó que para un periodo de oscilación de 60 minutos el flujo convectivo había cambiado el sentido de giro. En la Figura 3.30 se puede observar el proceso evolutivo para diferentes puntos de la oscilación. En la esquina superior izquierda de cada imagen se especifica el ángulo de inclinación de la cavidad y el sentido de giro de la misma, donde  $b$  indica que el sentido de giro es horario y  $a$  un sentido de giro anti horario. La primera imagen corresponde a 15 segundos antes de que la cavidad comience a oscilar.

El análisis de la evolución del patrón convectivo se puede dividir en dos partes: en la primera la cavidad parte de  $-45^\circ$ , el programa de control de movimiento hace girar al motor en sentido horario hasta llegar a  $+45^\circ$ , inmediatamente que la cavidad llega a  $+45^\circ$  el programa de control manda una señal para que el motor comience a moverse en sentido antihorario hasta  $-45^\circ$ , segunda parte del análisis de la oscilación. Una vez finalizada la primera oscilación, cuando la cavidad llega a  $-45^\circ$ , el programa de control nuevamente manda una señal para que el motor se mueva en el sentido horario y comience así la segunda oscilación. Los cambios en la dirección de giro se efectúan de forma automática por lo que la cavidad siempre se encuentra oscilando.

Analizando la evolución del patrón convectivo para la primera oscilación, Figura 3.30. En la primera parte cuando la cavidad se encuentra en  $-45^\circ$ , el flujo convectivo presenta una celda convectiva ligeramente inclinada hacia la diagonal que corre de la esquina inferior derecha a la superior izquierda, cuyo centro de giro se encuentra en  $y/L=0.5$  y  $x/L=0.5$ , el sentido de giro es contrario al de las manecillas del reloj. En el trayecto de  $-45^\circ$  a  $0^\circ$  se presenta una ligera disminución de la velocidad del patrón convectivo. Para el momento en que la cavidad llega a  $5^\circ$ , Figura 3.30<sup>a</sup>, aparecen dos celdas convectivas secundarias en las esquinas superior derecha e inferior izquierda con sentido de giro contrario al de la celda convectiva principal. Conforme la cavidad continua desplazándose hacia  $+45^\circ$ , el tamaño de las celdas convectivas secundarias aumenta de tal forma que para  $20^\circ$  están a punto de dividir a la celda convectiva principal, entre los  $25^\circ$  y  $30^\circ$  la celda secundaria que se encuentra en la esquina superior derecha crece y se desplaza sobre la pared lateral hasta llegar a la pared caliente, mientras que la celda convectiva secundaria que se encuentra en la esquina inferior izquierda se desplaza hacia la pared fría hasta que finalmente se fusionan para formar una celda convectiva, se pueden observar las secuelas de la fusión en la Figura para  $30^\circ$ . En  $+45^\circ$  se presenta una estructura con una celda convectiva alargada sobre la diagonal que corre de la esquina inferior izquierda a la superior derecha, con sentido de giro igual al de las manecillas del reloj. Lo anterior puede corroborarse con la ayuda de los perfiles de velocidad en la dirección  $x$ , Figura

3.28a y 3.28c, donde se observa que el perfil de velocidad es prácticamente el mismo, pero con signos opuestos.

La segunda parte es cuando la cavidad gira de  $+45^\circ$  a  $-45^\circ$ , es decir en sentido contrario al de las manecillas del reloj. Cuando la cavidad llega a  $0^\circ$  la velocidad del flujo convectivo disminuye y nuevamente aparecen dos celdas convectivas secundarias pero en esta ocasión se ubican en las esquinas superior izquierda e inferior derecha, el tamaño de estas se incrementa a tal grado que para  $-20^\circ$  las celdas convectivas secundarias están a punto de dividir a la celda convectiva principal. Entre  $-25^\circ$  y  $-30^\circ$  las celdas convectivas secundarias se fusionan formando una celda convectiva. En  $-30^\circ$  se pueden observar todavía las secuelas de la fusión, el centro de la celda convectiva tiene una forma ovalada y alargada hacia las esquinas inferior izquierda y superior derecha. Finalmente cuando la cavidad regresa a  $-45^\circ$ , se presenta un flujo convectivo con una celda que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj, y que esta alargada hacia las esquinas inferior derecha y superior izquierda. El eje de giro se encuentra en el centro de la cavidad, es decir  $y/L=0.5$  y  $x/L=0.5$ . Este es el mismo patrón de flujo que se presenta en la cavidad antes de que esta comience a oscilar. Esto puede corroborarse si comparamos las respectivas imágenes de las líneas de corriente para el momento en que la cavidad comienza a oscilar y el instante en que la cavidad finaliza la primera oscilación, para ambos casos la cavidad se encuentra en  $-45^\circ$ . Figura 3.30.

Con el propósito de observar si el patrón convectivo cambia de una oscilación a otra, se analizan las tres primeras oscilaciones de la cavidad, Figuras 3.30, 3.31 y 3.32. En estas figuras se observa que el proceso evolutivo del patrón convectivo es similar al descrito anteriormente, el cual corresponde a la primera oscilación de la cavidad. En las Figuras 3.28 y 3.29 se comparan los perfiles de velocidad en la dirección  $x$  y  $y$ , en diferentes ángulos de inclinación de la cavidad. Como se puede observar los perfiles de velocidad presentan un comportamiento similar.

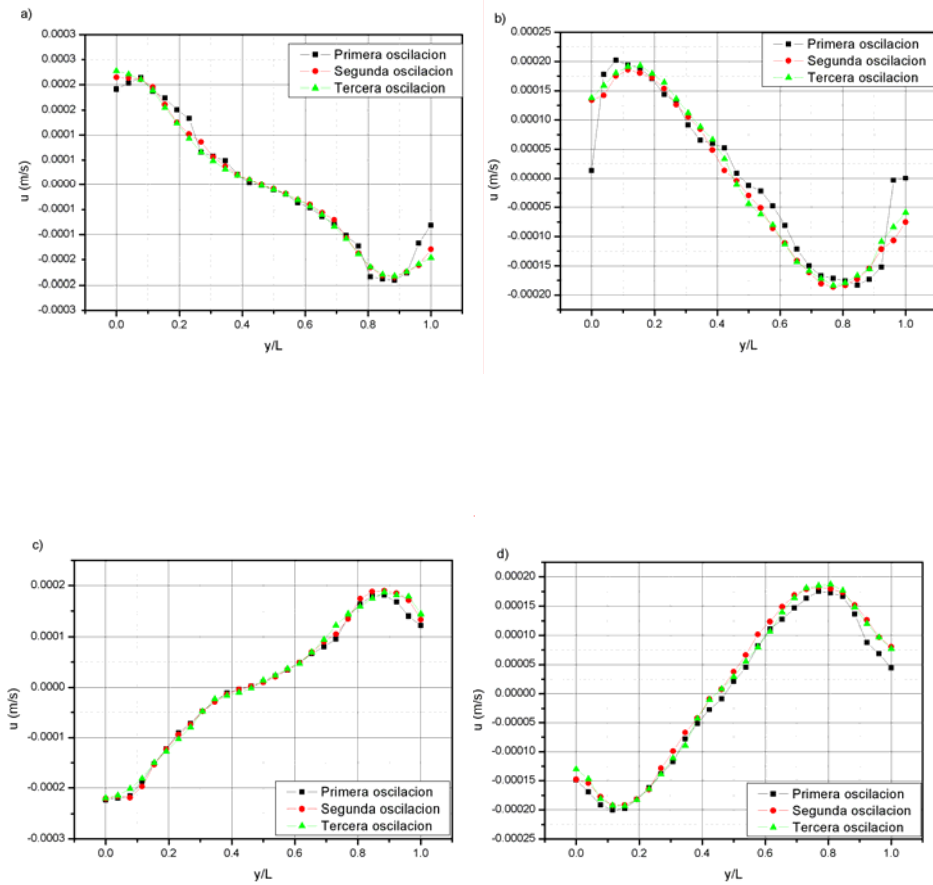


Figura 3.28. Perfiles de velocidad en la direcci3n  $x$  para un  $Ra = 1 \times 10^5$  (m/s), un  $Re_0 = 8.27 \times 10^{-3}$ , una amplitud de giro de  $\pm 45^\circ$  y un periodo de oscilaci3n de 60 minutos,  $x/L = 0.5$  y  $y/L = 0.5$ . a), b) y c) Primera parte de la oscilaci3n, cuando la cavidad se encuentra en  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $+45^\circ$ , respectivamente. d) Segunda parte de la oscilaci3n, cuando la cavidad se encuentra en  $0^\circ$ .



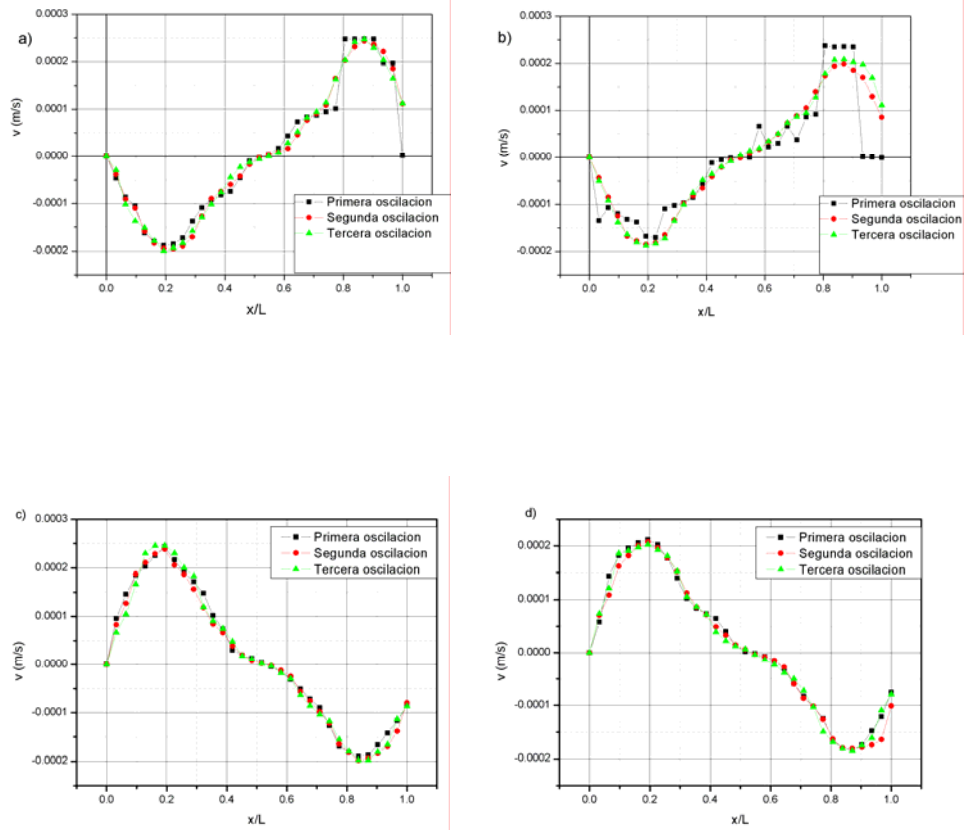


Figura 3.29. Perfiles de velocidad en la dirección  $x$  para un  $Ra = 1 \times 10^5 (m/s)$ , un  $Re_0 = 8.27 \times 10^{-3}$ , una amplitud de giro de  $\pm 45^\circ$  y un periodo de oscilación de 60 minutos,  $x/L=0.5$  y  $y/L=0.5$ . a), b) y c) Primera parte de la oscilación, cuando la cavidad se encuentra en  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $+45^\circ$ , respectivamente. d) Segunda parte de la oscilación, cuando la cavidad se encuentra en  $0^\circ$ .

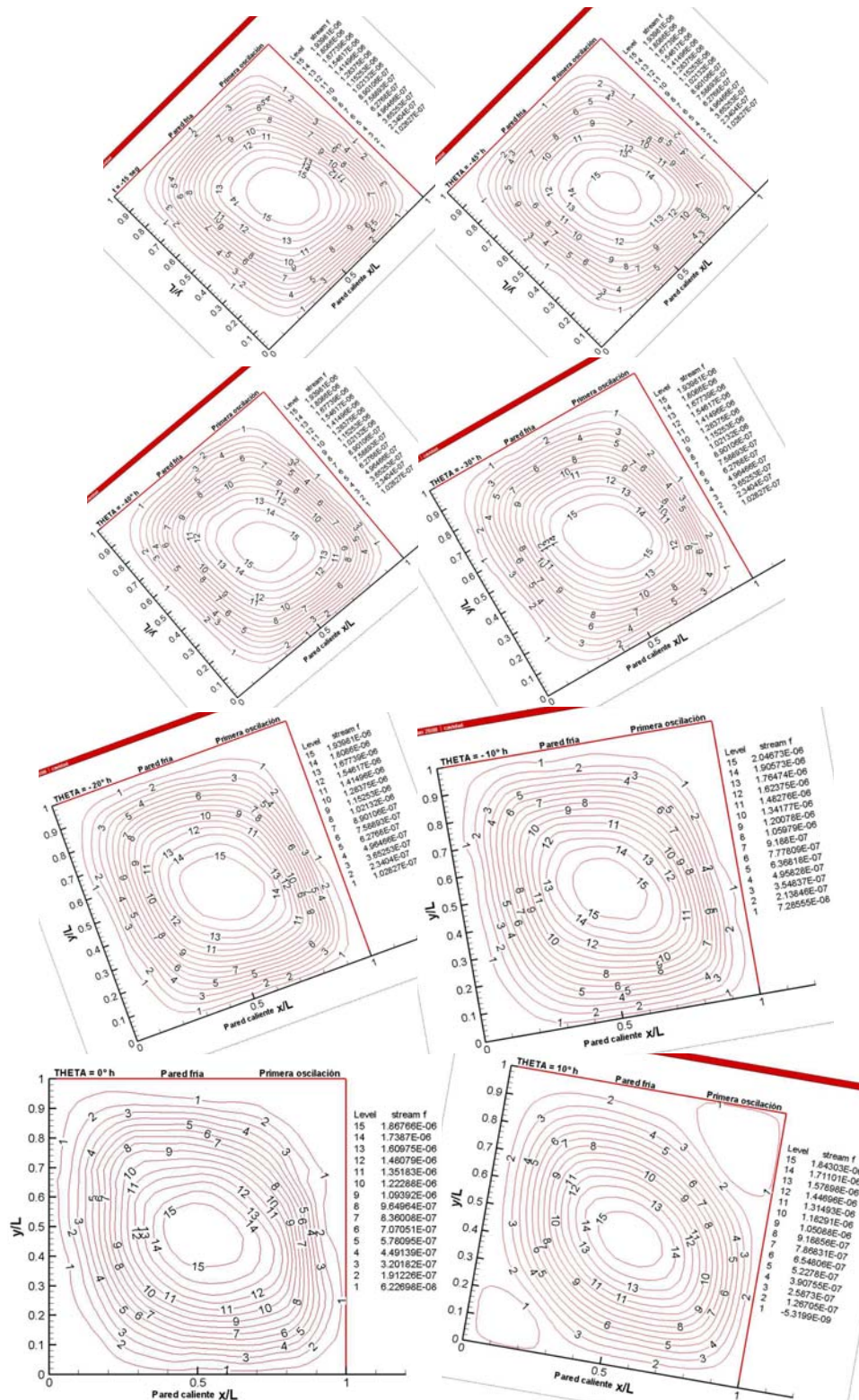


Figura 3.30a. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Primera oscilación.

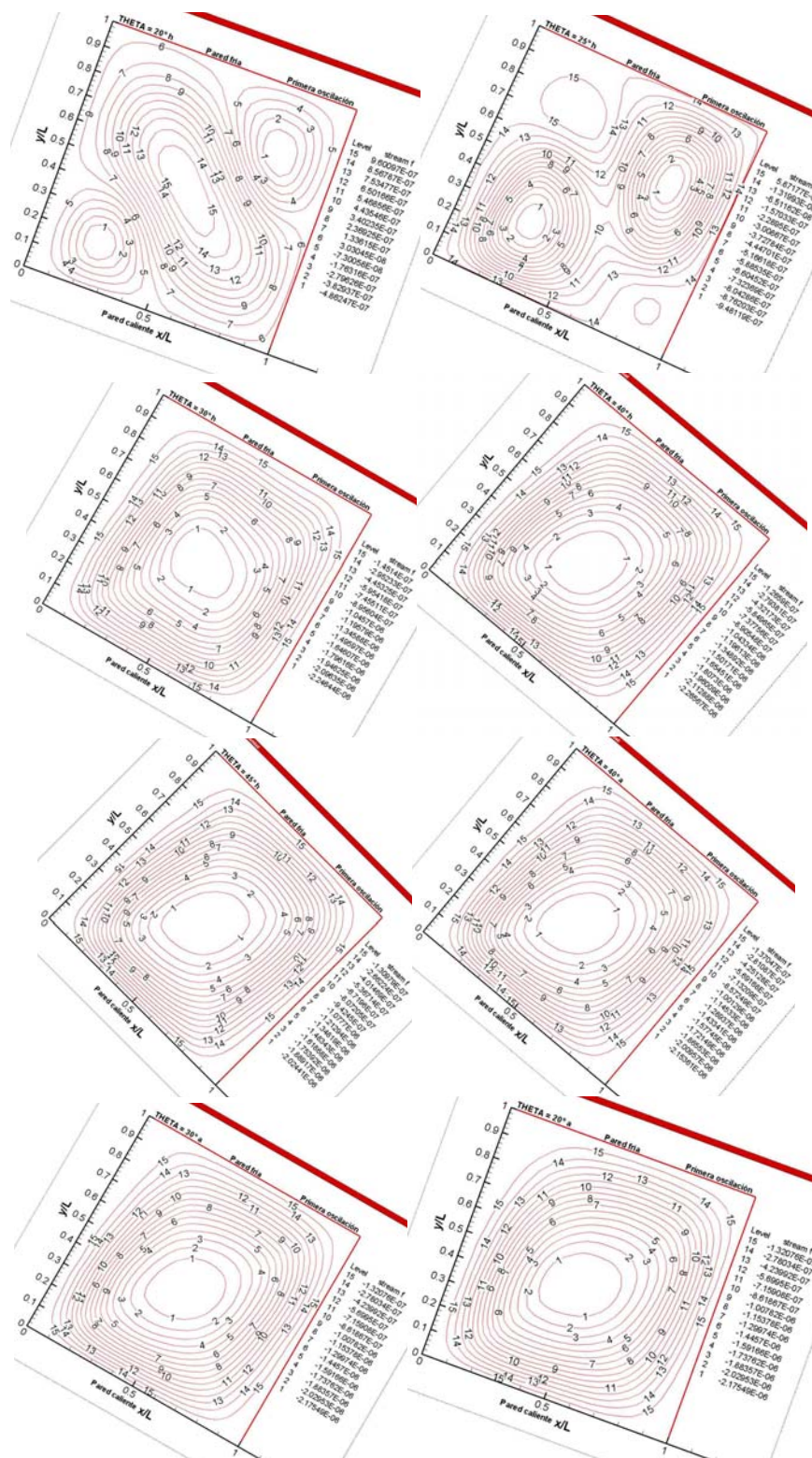


Figura 3.30b. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Re_0=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Primera oscilación.

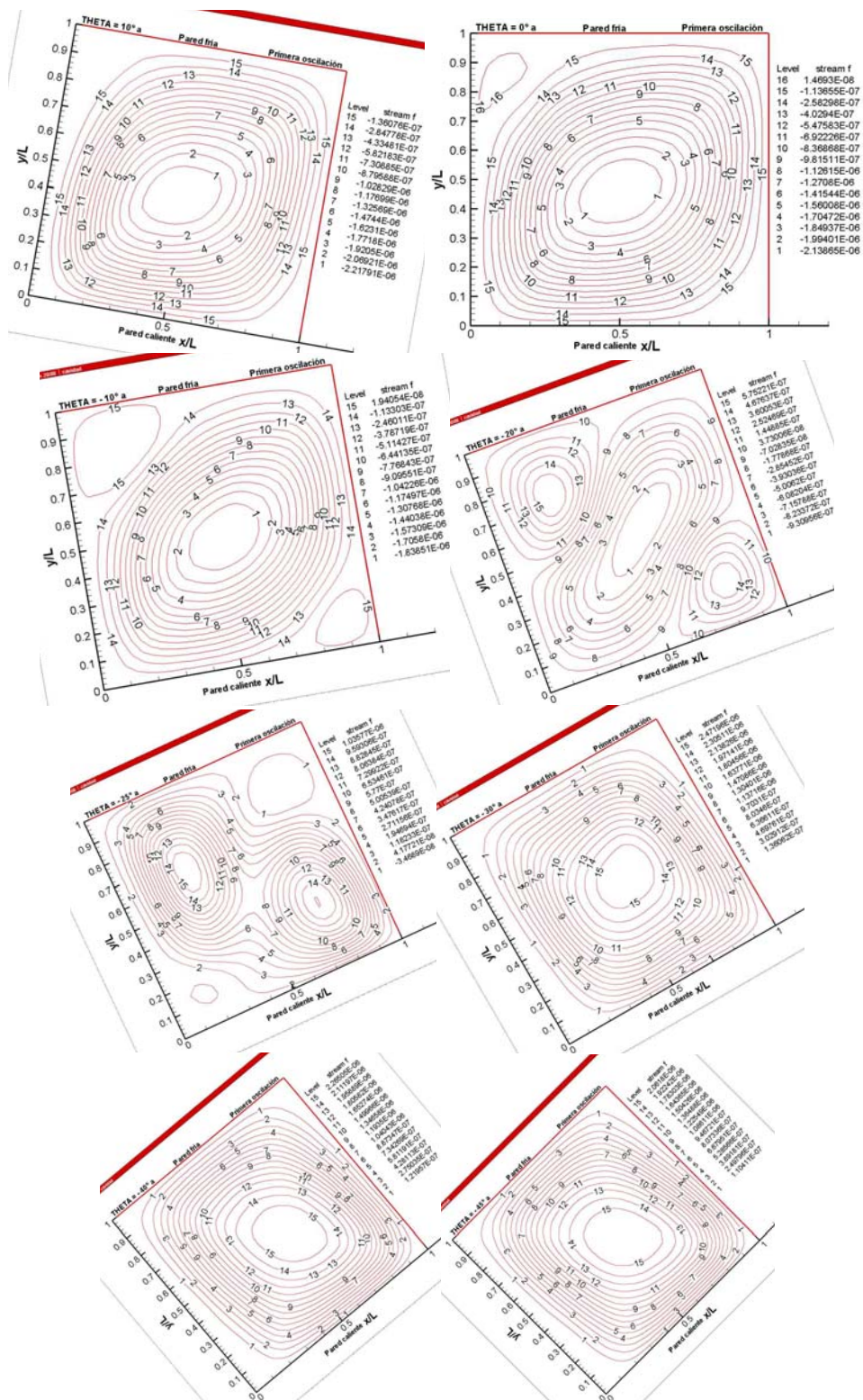


Figura 3.30c. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Primera oscilación.

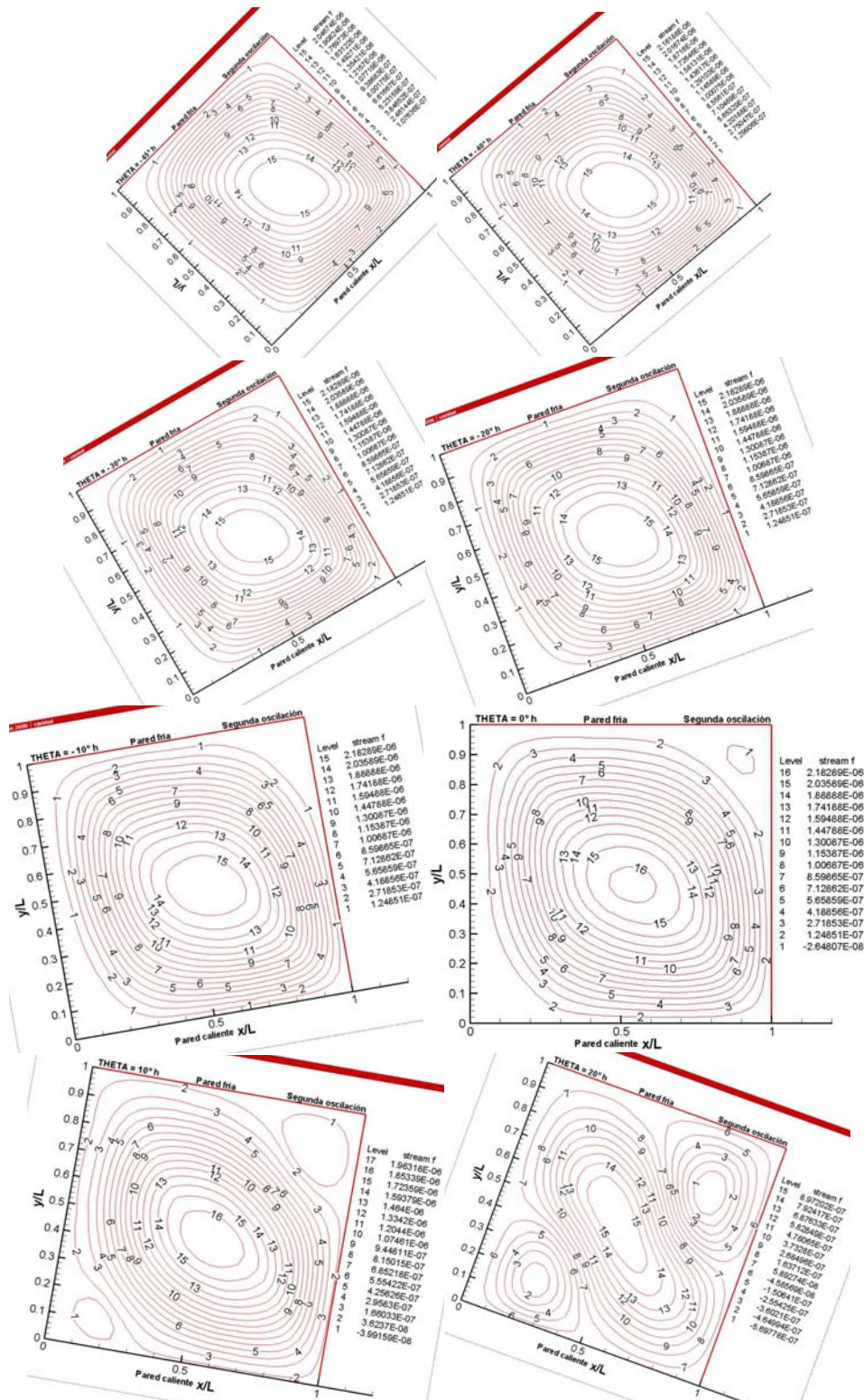


Figura 3.31a. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Re_o=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Segunda oscilación.

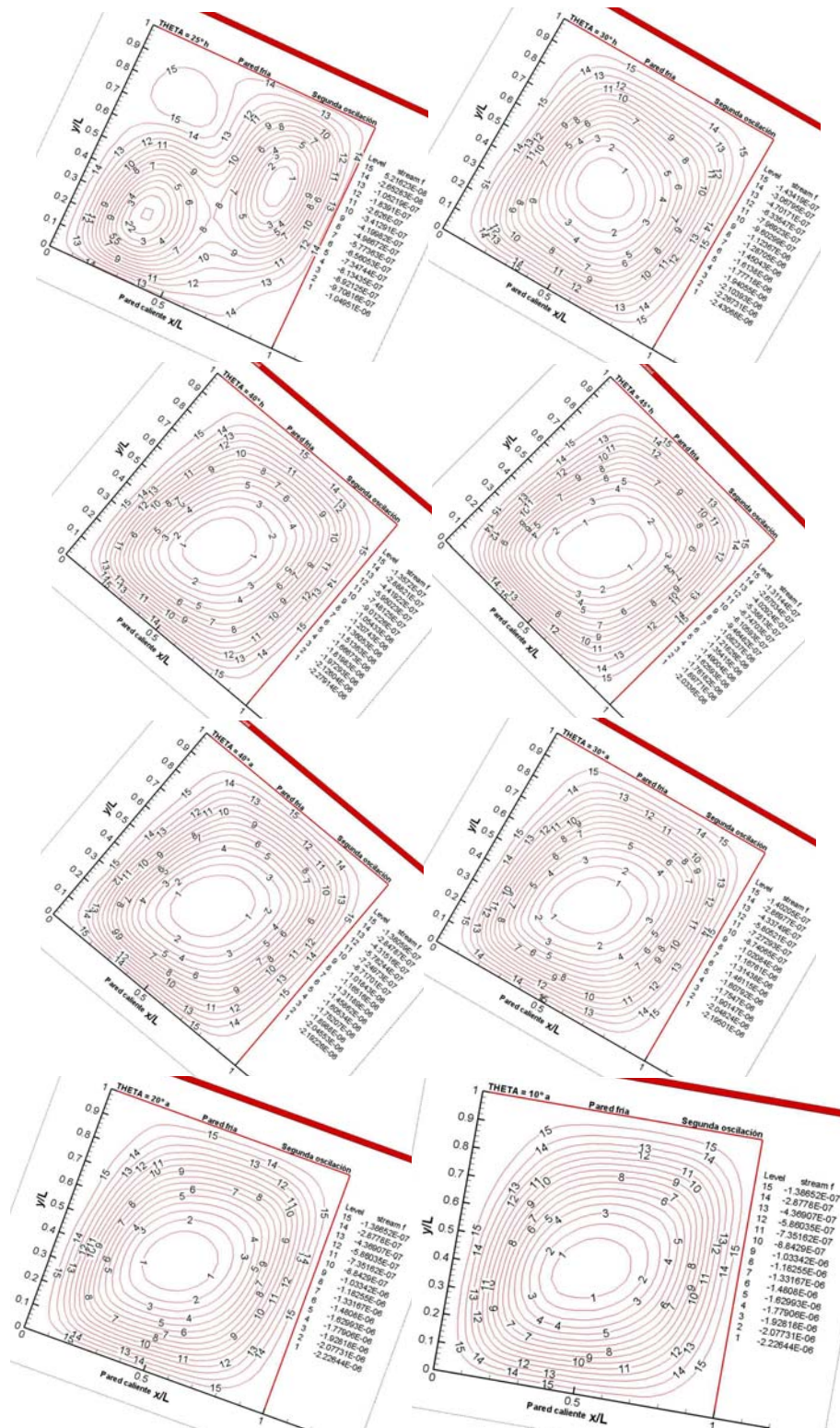


Figura 3.31b. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Segunda oscilación.

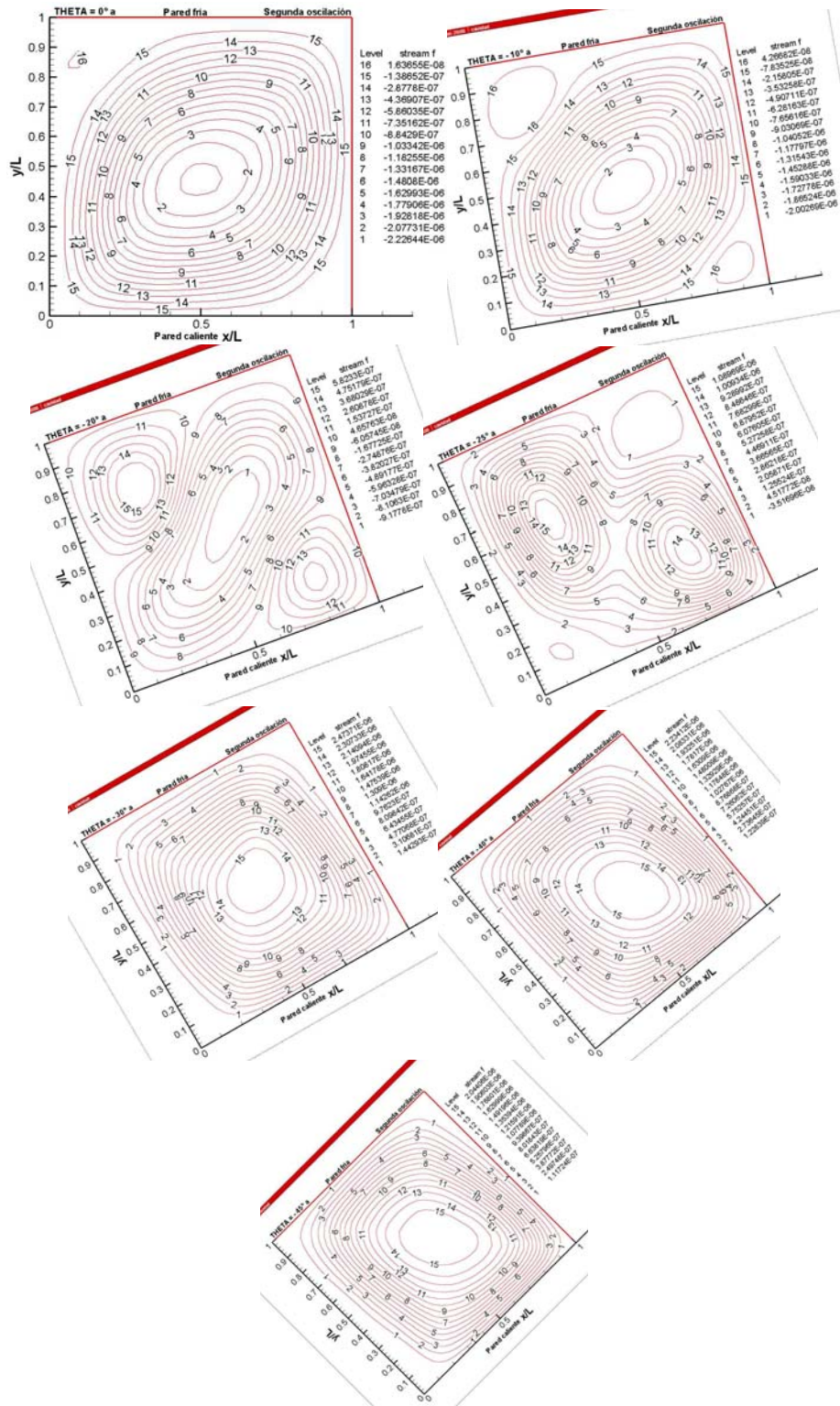


Figura 3.31c. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Segunda oscilación.

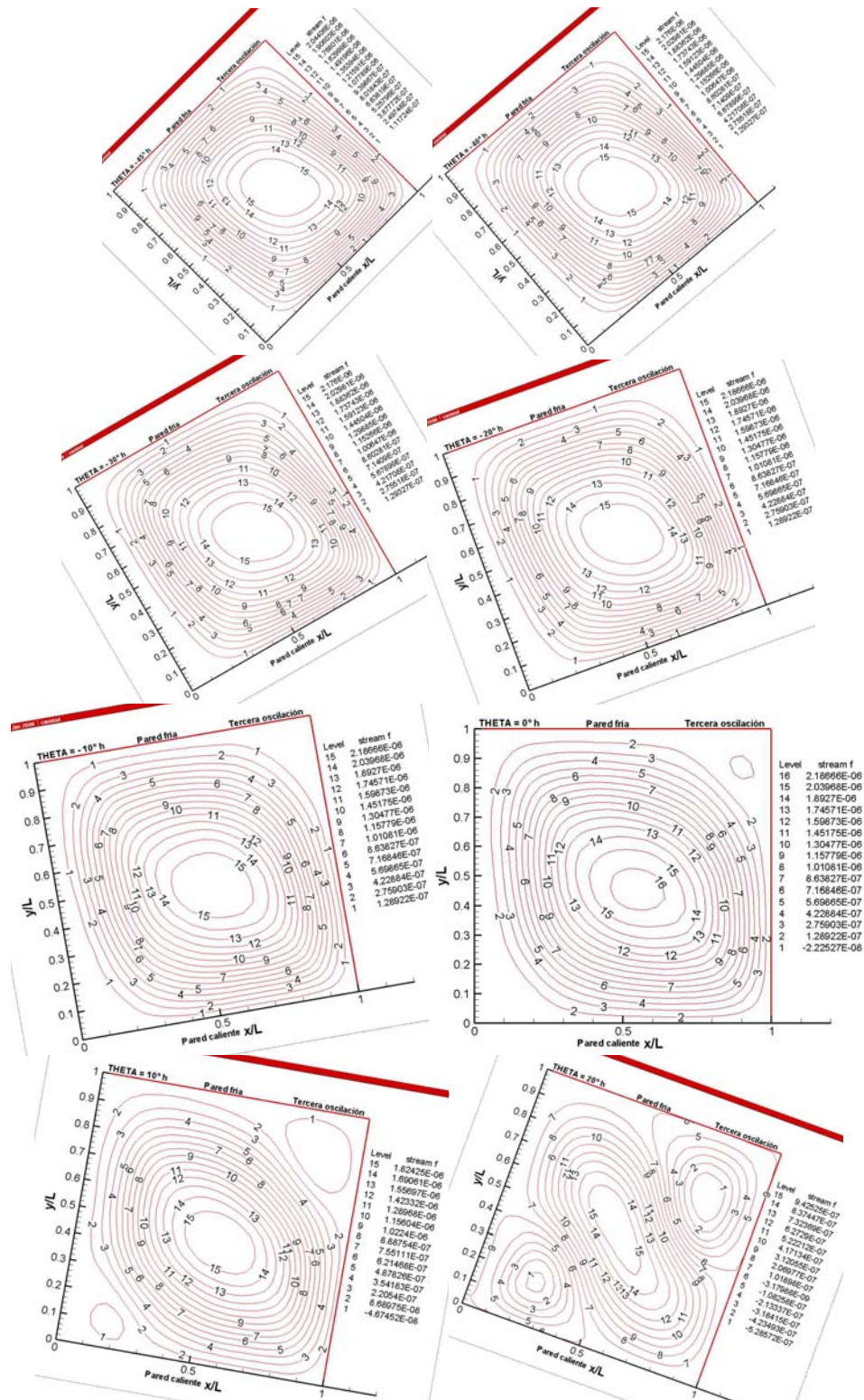


Figura 3.32a. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Tercera oscilación.



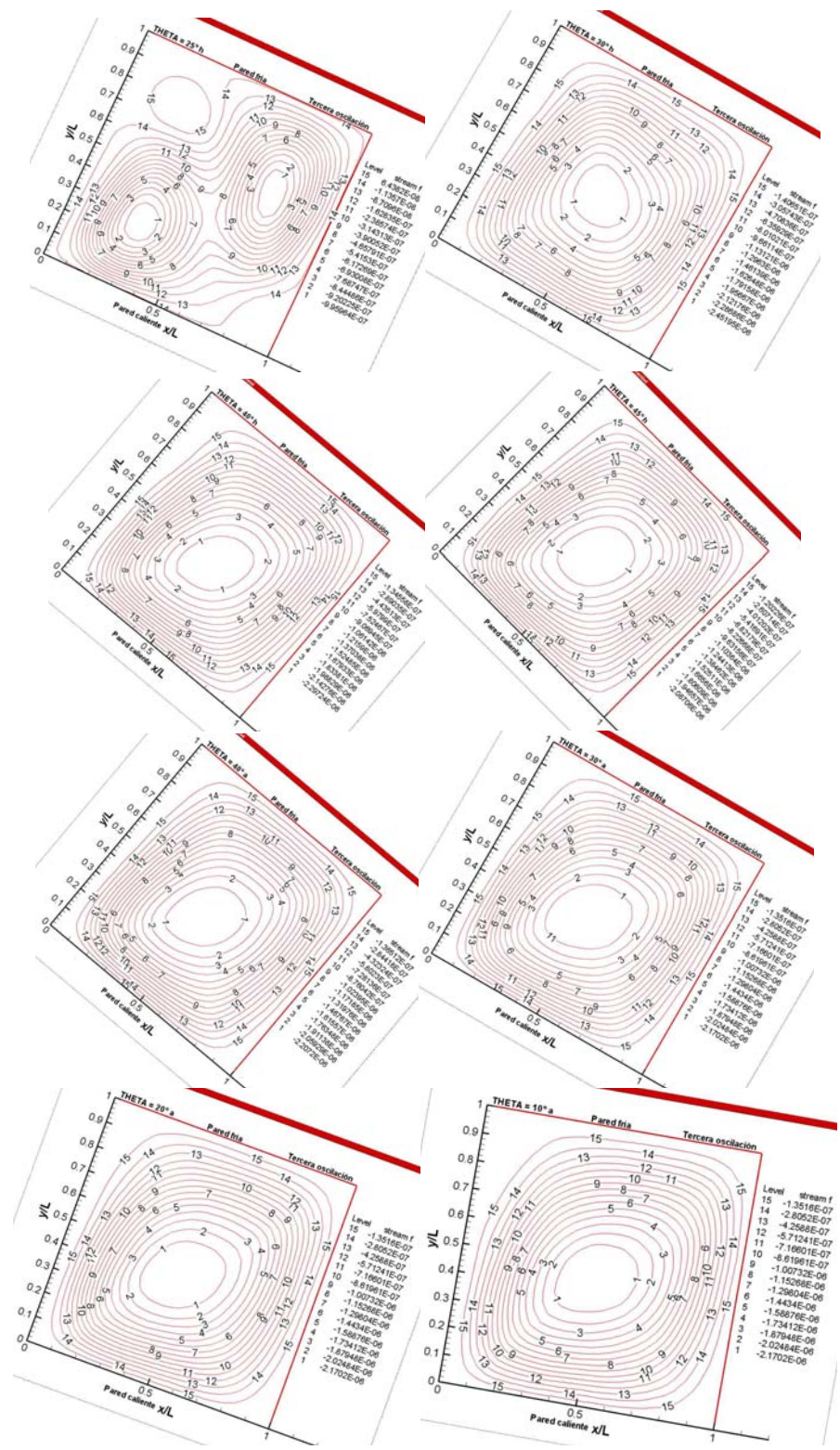


Figura 3.32b. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Tercera oscilación.

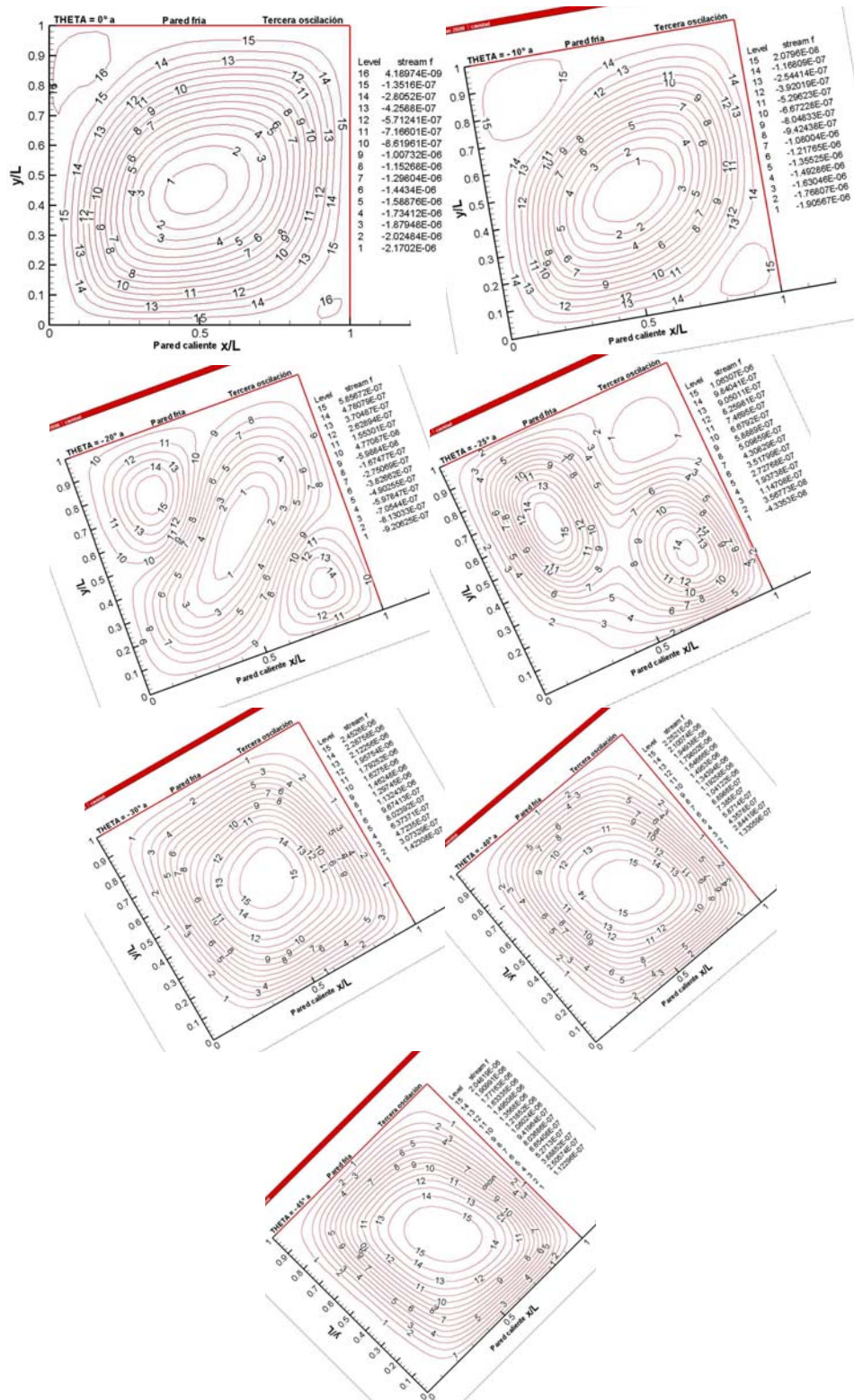


Figura 3.32c. Líneas de corriente para  $Ra=1 \times 10^5$ ,  $Reo=8.27 \times 10^{-3}$ , amplitud de oscilación  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ . Periodo de oscilación 1 hora. Tercera oscilación.

## CAPÍTULO 4

### Conclusiones.

La convección natural en cavidades es un fenómeno ampliamente estudiado en lo que respecta a cavidades fijas. El campo de las cavidades dinámicas ha sido poco explorado y en lo que respecta a cavidades oscilantes no se conoce hasta el momento un estudio experimental sobre el tema. De igual modo no existe estudio experimental alguno en el que se estudie la convección natural en el estado transitorio para una cavidad que cambia de ángulo de inclinación.

Este trabajo se ha enfocado al estudio de la evolución de los patrones convectivos, cuando la cavidad presenta un cambio súbito en su ángulo de inclinación y cuando esta se encuentra oscilando continuamente, tanto de forma cualitativa como cuantitativa. Se emplea para ello el método PIV (particle image velocimetry, por sus siglas en inglés) para determinar los campos de velocidad del flujo dentro de la cavidad.

Los resultados obtenidos corresponden a una cavidad con una relación de forma  $H/L = 1$  y  $H/W = 4$ , distribución uniforme de temperatura en las paredes caliente y fría, paredes laterales con conductividad térmica finita, para números de Rayleigh de  $3 \times 10^4$  y  $1 \times 10^5$ , amplitudes de giro de  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  y  $\pm 75^\circ$ , amplitudes de oscilación de  $\pm 15^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ , periodos de oscilación de 30 minutos, 60 minutos y 120 minutos. Se utilizó glicerina de alta pureza como fluido de trabajo.

Analizando los resultados obtenidos se pueden hacer las siguientes conclusiones:

Estudio cualitativo:

Debido a que no se tuvo el tiempo necesario para aplicar la técnica PIV a esta parte del estudio experimental, no se pudo obtener la cantidad de información deseada y por ende no se pueden hacer comentarios con el detalle que se hubiese deseado.

A partir de los patrones de flujo obtenidos de forma visual, se concluye que el parámetro que tiene más efecto en la evolución de los patrones convectivos es el periodo de oscilación, ya que para el mismo número de Rayleigh, con forme se incrementa dicho periodo, las celdas convectivas secundarias que aparecen tienen más tiempo para desarrollarse y crecer, teniendo como consecuencia la división de la celda convectiva principal y posteriormente que el sentido de giro del patrón convectivo cambie de dirección debido a la fusión de las celdas convectivas secundarias, por ejemplo para  $Ra = 3 \times 10^4$  y un periodo de oscilación de 120 minutos. Mientras que para periodos de oscilación cortos las celdas convectivas secundarias apenas cambian de tamaño, por lo que no se presenta el cambio en el sentido de giro del patrón convectivo, por ejemplo para  $Ra = 3 \times 10^4$  y un periodo de oscilación de 30 minutos.

En lo que respecta al número de Rayleigh, mientras mayor sea su valor, el tamaño de las celdas convectivas secundarias se incrementa más rápidamente, lográndose así que el sentido de giro del patrón convectivo se invierta. Haciendo la combinación de número de Rayleigh y periodo de oscilación pequeños,  $Ra = 3 \times 10^4$  y 30 minutos respectivamente, el sentido de giro del flujo convectivo no se invierte. Para números de Rayleigh y periodos de oscilación

grandes  $Ra = 1 \times 10^5$  y 120 minutos, el sentido de giro del patrón convectivo se invierte de manera clara.

Estudio cuantitativo.

Para el caso de estudio donde la cavidad cambia súbitamente de un ángulo negativo a otro positivo, la evolución del patrón convectivo es muy interesante, ya que el cambio en el sentido de giro del patrón convectivo se debe al crecimiento y evolución de dos celdas convectivas secundarias que se forman en las esquinas superior derecha e inferior izquierda de la cavidad, las cuales con el tiempo crecen de tal forma que dividen a la celda convectiva principal, con forme crecen, la celda convectiva secundaria que se ubica en la esquina superior derecha se desplaza sobre la pared lateral hasta llegar a la pared caliente, mientras que la celda convectiva que se encuentra en la esquina inferior izquierda se desplaza sobre la pared lateral hacia la pared fría para finalmente fusionarse en una celda convectiva con sentido de giro inverso al original para todos los números de Rayleigh y amplitudes de giro utilizados.

Todos los experimentos realizados para cuando la cavidad presenta un cambio súbito en su ángulo de inclinación presentan el mismo proceso evolutivo, independientemente de la relación de giro que se emplee. Lo único que se modifica es el tiempo necesario para que el nuevo patrón convectivo alcance el estado permanente, el cual va a depender del número de Rayleigh y de la amplitud de oscilación. Para un  $Ra = 3 \times 10^4$ , conforme se incrementa el valor de la amplitud de giro, el tiempo de estabilización del patrón convectivo disminuye drásticamente, teniéndose los siguientes tiempos:  $\pm 15^\circ$  el tiempo de estabilización es de 35 minutos, para  $\pm 45^\circ$  18 minutos y con  $\pm 75^\circ$  12 minutos. Con un  $Ra = 1 \times 10^5$  se tienen los siguientes tiempos de estabilización:

para:  $\pm 15^\circ$  es de 18 minutos, con  $\pm 45^\circ$  de 10 minutos y para  $\pm 75^\circ$  la estabilización se alcanza a los 8 minutos. Por otro lado manteniendo la amplitud de giro constante e incrementando el valor del número de Rayleigh el tiempo de estabilización también disminuye, lo que muestra de que las fuerzas de flotación juegan un papel importante en la estabilización del patrón de flujo convectivo dentro de la cavidad.

Cuando la cavidad está sujeta a una oscilación continua con un periodo de oscilación de una hora, un  $Ra = 1 \times 10^5$  y una amplitud de oscilación de  $\pm 45^\circ$  y una relación de oscilación cuadrada, el proceso evolutivo del patrón convectivo es sorprendente ya que cuando la cavidad gira de  $-45^\circ$  a  $0^\circ$  el patrón convectivo solo presenta una disminución de la velocidad y las celdas convectivas secundarias aparecen cuando la cavidad ha superado los  $0^\circ$ , dichas celdas crecen hasta dividir a la celda convectiva principal en dos; con forme la celda convectiva secundaria que se ubica en la esquina superior derecha crece, se desplaza sobre la pared lateral hacia la pared caliente, mientras que la celda convectiva secundaria que se encuentra en la esquina inferior izquierda crece y se desplaza sobre la pared lateral hacia la pared fría,  $+25^\circ$ , para finalmente fusionarse en una celda convectiva con sentido de giro contrario al de la celda convectiva original,  $+45^\circ$ . Las celdas convectivas productos de la división de la celda convectiva principal disminuyen de tamaño para posteriormente desaparecer. Para el trayecto de  $+45^\circ$  a  $-45^\circ$  se presenta un comportamiento similar, pero en este caso las celdas convectivas secundarias se ubican en las esquinas superior izquierda e inferior derecha y cuando la cavidad llegada a  $-45^\circ$  el patrón convectivo dentro de la cavidad es similar al flujo convectivo inicial; es decir, una celda convectiva alargada hacia las esquinas superior izquierda e inferior derecha que gira en

sentido contrario a las manecillas del reloj, el eje de giro se encuentra en el centro de la cavidad.

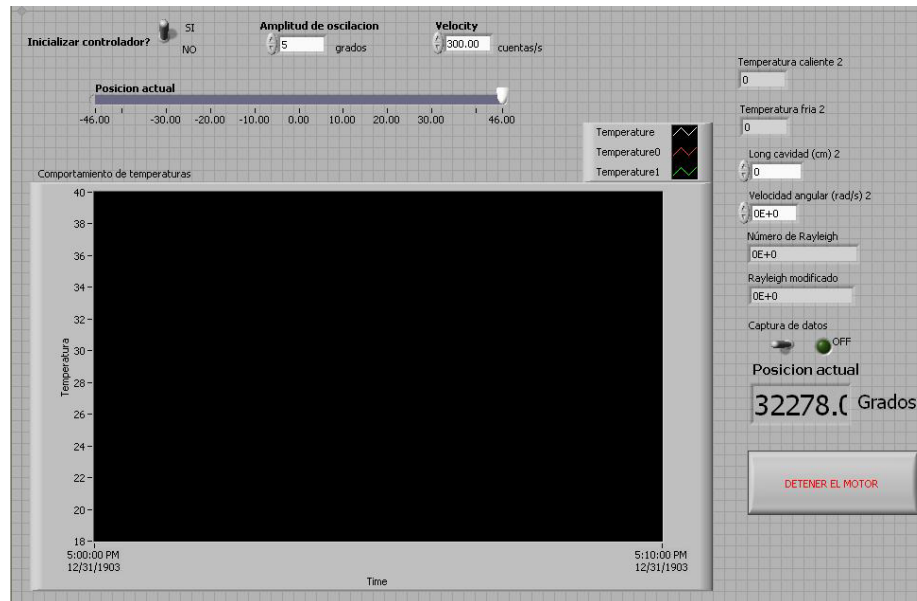
Por otro lado, se analizaron las tres primeras oscilaciones de la cavidad con el propósito de observar si el patrón convectivo cambia de una oscilación a otra, se reportan los perfiles de velocidad para las componentes de la velocidad  $u$  y  $v$ , para diferentes posiciones de la cavidad  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+45^\circ$  y  $0^\circ$ , Figuras 3.28 y 3.29. Estos perfiles presentan un comportamiento similar lo que indica que la evolución del patrón convectivo no cambia de una oscilación a otra. Es importante destacar que los campos de velocidad son instantáneos por lo que son más susceptibles al ruido, motivo por el cual las pequeñas variaciones entre los perfiles de velocidad de las tres primeras oscilaciones se consideran aceptables. Por otro lado, conociendo que el patrón convectivo no cambia de una oscilación a otra se puede realizar un promedio en fase de los campos de velocidad y de esta forma eliminar el ruido.

Se espera que este trabajo sirva como base para estudios posteriores en este campo de estudio poco explorado.

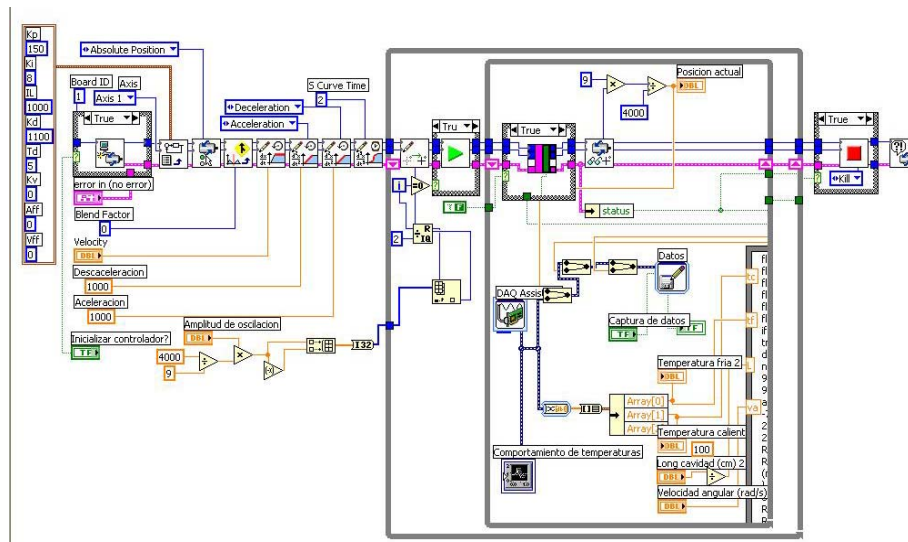
# Apéndice A

Programa de control de movimiento para relación de giro cuadrada. a) Panel de control, b) Diagrama de bloques.

a)



b)

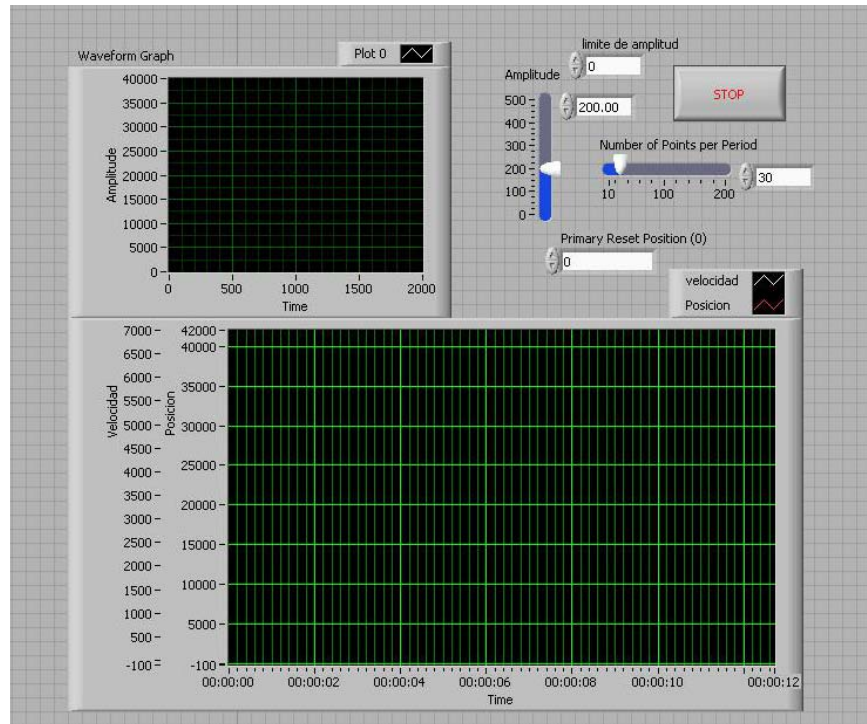




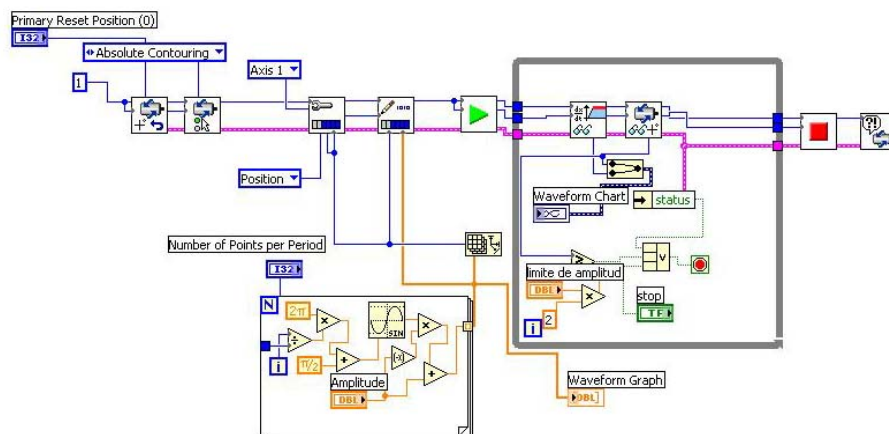
Programa de control de movimiento para relación de giro senoidal. a)

Panel de control, b) Diagrama de bloques.

a)



b)



## Apéndice B

**Tabla B.1. Diferencia de temperaturas para diferentes números de Rayleigh y ángulos de inclinación.**

Rayleigh	Amplitud de giro		
	+/- 15°	+/- 45°	+/- 75°
$3 \times 10^4$	$\Delta T = 6.7^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 6.7^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 6.7^\circ \text{ C}$
	0.62 W	0.61 W	0.67 W
$1 \times 10^5$	$\Delta T = 15.1^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 15^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 15^\circ \text{ C}$
	1.984 W	1.984 W	2.048 W

Nota: Esta tabla es sólo una guía para obtener el número de Rayleigh en la cavidad utilizada en los experimentos. La potencia aplicada a la resistencia por la fuente de alimentación puede variar, dependiendo de la temperatura ambiente ( $T_a$ ).  $T_f = 20^\circ \text{ C}$ .

## Apéndice C

**Programa para el cálculo del número de Rayleigh.**

```
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<math.h>
#include<conio.h>
#include<ctype.h>
#include<string.h>
#include<io.h>
float l,Tmin,Tmax,Tm,nu,alfa,Ra,L,dt,alfas;
main(void)
{

clrscr();

printf("Calculo número de Raleigh para glicerina \t\n");
printf("Longitud de la cavidad(cm): \t\n");
scanf("%f",&l);
printf("Temperatura minima (°C):\t\n ");
scanf("%f",&Tmin);
printf("Temperatura maxima (°C):\t\n ");
scanf("%f",&Tmax);
Tm =((Tmin+Tmax)/2)+273.15;
dt=Tmax-Tmin;
L=l/100;
nu = 0.000078+4461273765.76133*exp(-Tm/9.85208)+4461273753.48201*
    exp(-Tm/9.85208);
alfa=-1.8824*pow10(-5)+2.51005*pow10(-7)*Tm-1.24612*pow10(-9)*Tm*
Tm+2.74543*pow10(-12)*Tm*Tm*Tm-2.26662*pow10(-
15)*Tm*Tm*Tm*Tm;
alfas=alfa*10000000;
Ra=(9.78*0.00047*dt*L*L*L)/(nu*alfa);

printf("el Ra es %f\t\n",Ra);

getche();
return(0);
}
```

## Bibliografía.

- [1] T. E. Unny, *Thermal instability in differentially heated inclined fluids layers*, J. Appl. Mech., 39, 41 – 46 (1972).
- [2] S. H. Davis, *Convection in a box: linear theory*, J. Fluid Mech., 30, 464 – 478 (1967).
- [3] K. Stork y U. Müller, *Convection in boxes: experiments*, J. Fluid Mech., 54, 599 – 611 (1972).
- [4] F. J. Hamady, J. R. Lloyd and H. Q. Yang, K. T. Yang, *Study of local natural convection heat transfer in an inclined enclosure*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp 1697 – 1708, 1989.
- [5] J. Pallares, M. P. Arroyo, F. X. Grau, F. Giralt, *Experimental laminar Rayleigh-Bernard convection in a cubical cavity at moderate Rayleigh and Prandtl numbers*, Experiments in fluids, pp 208 – 218, 2001.
- [6] J. Pallares, M. P. Arroyo, F. X. Grau, F. Giralt, *Flow transitions in laminar Rayleigh-Bénard convection in a cubical cavity at moderate Rayleigh numbers*, Int. J. Heat Mass Trans 42 (1999) 753 – 769.
- [7] N. Ramesh, S.P. Venteshan, *Experimental study of natural convection in a square enclosure using differential interferometer*, Int. J. Heat Mass transfer., Vol. 44, pp 1107 – 1117, 2001..
- [8] J. T. Han, *Numerical solutions for an isolated vortex in a slot and free convection across a square cavity*, MASC. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Toronto, 1967.
- [9] M. E. Newell, F. W. Schmidt, *Heat transfer by laminar convection within rectangular enclosures*, ASME J. Heat Transfer, Vol 92, pp 159-168, 1970.
- [10] B. M. Berkovsky, V. K. Polevikov, *Numerical study of problems in high intensive free convection*, in : D. Brian Spalding, N. Afgan (Eds.), Heat Transfer and Turbulent Buoyant Convection, Hemisphere, Washington, Vol. 2, pp 443 – 455, 1977.
- [11] C. Balaji, S. P. Venkateshan, *Interaction of surface radiation with free convection in a square cavity*, Int. J. Heat Fluid Flow 14 (3), pp 260 – 267, 1993.
- [12] Rossby, *A study of Bénard convection with and without rotation*. J. Fluid Mech, vol 36, part 2 pp 309 – 335, 1969.
- [13] S. Abell and J. L. Hudson, *An experimental study of centrifugally driven free convection in a rectangular cavity*, Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 18, pp 1415 – 1423, 1975.
- [14] Jeffrey L. Rogers and Michael F. Schatz, Jonathan L. Bougie and Jack B. Swift, *Rayleigh-Bénard Convection in a Vertically Oscillated Fluid Layer*, Physical Review Letters, Volume 84, Number 1, pp 87 – 90, 2000.
- [15] Chávez Rafael. *Obtención del campo de velocidades en una cavidad cerrada inclinada mediante PIV*, Trabajo de tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2005.

## Nomenclatura.

$a$  área de interrogación.  
 $A_x$  razón de forma (alto/ancho).  
 $A_x$  razón de forma longitudinal (largo/ancho).  
 $f$  frecuencia forzada, Hz  
 $g$  aceleración de la gravedad,  $m/s^2$   
 $Gr$  número de Grashof,  

$$g\beta L^3 (T_c - T_f) / \nu^2$$
  
 $H$  altura de la cavidad, m  
 $k$  conductividad térmica.  
 $L$  longitud característica, largo de la cavidad, m  
 $Nu$  número de Nusselt,  $hL/k$   
 $\overline{Nu}$  número de Nusselt promedio.  
 $Pr$  número de Prandtl,  $\nu/\alpha$   
 $Ra$  número de Rayleigh,  

$$g\beta L^3 (T_c - T_f) / (\alpha\nu)$$
  
 $Ra_c$  número de Rayleigh crítico  
 $Re_o$  número de Reynolds oscilatorio  
 $Ta$  número de Taylor,  $4\Omega^2 L^4 / \nu^2$   
 $Ta$  temperatura ambiente, K  
 $Tc$  temperatura caliente, K  
 $Tf$  temperatura fría, K

$Tm$  temperatura media,  
 $(T_c + T_f) / 2$ , K  
 $u$  componente de la velocidad en la dirección horizontal, m/s  
 $v$  componente de la velocidad en la dirección vertical. m/s  
 $W$  espesor de la cavidad, m  
 $x, y$  coordenadas rectangulares.

Letras griegas.

$\alpha$  difusividad térmica,  $m^2/s$   
 $\beta$  coeficiente de expansión térmica volumétrica,  $K^{-1}$   
 $\delta$  amplitud de desplazamiento,  
 $\alpha^2 \delta' / (gL^4)$   
 $\delta'$  amplitud, cm  
 $\theta$  ángulo de inclinación.  
 $\nu$  viscosidad cinemática,  $m^2/s$   
 $\omega$  frecuencia de oscilación,  $2\pi/L^2/\alpha$

Abreviaciones.

PIV particle image velocimetry.  
 TIFF tagged image file format

