



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

CONVECCIÓN NATURAL EN  
CILINDROS ESBELTOS

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERÍA

ENERGÍA - SISTEMAS ENERGÉTICOS

P R E S E N T A :

MIGUEL LÓPEZ CABALLERO

DIRECTOR DE TESIS: DR. EDUARDO RAMOS MORA



MÉXICO D.F.

2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Francisco Javier Solorio Ordáz

Secretario: Dr. Eduardo Ramos Mora

Vocal: Dr. Jorge Antonio Rojas Menéndez

1er Suplente: Dra. Minerva Guadalupe Vargas Vega

2do Suplente: Dr. José Ramón Herrera Velarde

Centro de Investigación en Energía, Temixco, Morelos, México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Eduardo Ramos Mora

A mi hermano Rene y a Ana por confiar  
siempre en mi.

A todas las personas que ayudaron a  
que esto fuera posible.



# Agradecimientos

A los miembros del jurado, Dr. Eduardo Ramos Mora, Dra. Minerva Vargas Vega y Dr. Francisco Javier Solorio Ordáz, por sus recomendaciones sobre este trabajo.

A Guillermo Hernández Cruz por su apoyo durante toda la fase experimental y ayuda en la instrumentación del equipo.

A Héctor Daniel Cortés González y Guillermo Barrios del Valle por su apoyo en los sistemas de computo.

A las personas del taller mecánico, que me ayudaron en la manufactura de algunas piezas del equipo experimental.

A todas las personas que me dieron consejos para mejorar el funcionamiento del equipo.

Al Centro de Investigación en Energía por permitirme usar las instalaciones en las que se desarrolló este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de los estudios.

A todos mis compañeros y amigos del CIE, por ayudarme y darme su amistad durante mi estancia.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. La Convección Natural . . . . .	1
1.2. Objetivo . . . . .	5
1.3. Aplicaciones . . . . .	5
<b>2. Equipo, Metodología y Análisis Experimental</b>	<b>7</b>
2.1. Equipo Experimental . . . . .	7
2.1.1. Cavidad . . . . .	8
2.1.2. Sistema de Adquisición de Imágenes . . . . .	11
2.1.3. Sistema de Adquisición de Temperaturas . . . . .	13
2.1.4. Programa de Adquisición de Datos . . . . .	14
2.2. Metodología Experimental y Análisis . . . . .	16
2.2.1. Labores previas . . . . .	16
2.2.2. Preparación y Ejecución del Experimento . . . . .	16
2.2.3. Procesamiento de la Información . . . . .	17
<b>3. Resultados</b>	<b>19</b>
3.1. Experimentos Preliminares . . . . .	19
3.1.1. Pruebas de los Sistemas del Equipo Experimental . . . . .	19
3.1.2. Pruebas de Funcionamiento del Sistema Integrado . . . . .	22



---

3.2. Resultados Finales . . . . .	27
3.2.1. Experimento 1 ( $Ra = 3.36 \times 10^5$ ) . . . . .	29
3.2.2. Experimento 2 ( $Ra = 3.50 \times 10^5$ ) . . . . .	38
3.2.3. Experimento 3 ( $Ra = 5.60 \times 10^5$ ) . . . . .	40
3.2.4. Experimento 4 ( $Ra = 1.59 \times 10^6$ ) . . . . .	45
3.2.5. Experimento 5 ( $Ra = 2.18 \times 10^6$ ) . . . . .	53
3.2.6. Estimación de la Velocidad Máxima en Función del Número de Rayleigh . . . . .	57
3.3. Reconstrucción Tridimensional . . . . .	59
<b>4. Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>68</b>

# Índice de figuras

1.1. Mapa ( $A$ , $Ra$ ) del comportamiento cualitativo de la convección natural en una cavidad cilíndrica observada por Müller et al. [1]. Los triángulos verdes se refieren a los casos explorados por Leong [2]. La línea roja indica el rango al que el dispositivo experimental tiene acceso. . . . .	3
1.2. Esquema del dispositivo para hacer crecimiento de cristales por el método de Czochralski [3]. . . . .	6
2.1. Equipo experimental para estudiar la convección natural en una cavidad cilíndrica. . . . .	8
2.2. Esquema de la cavidad cilíndrica. $T_c$ y $T_h$ indican temperatura fría y caliente respectivamente. . . . .	9
2.3. Esquema de la cavidad cilíndrica. . . . .	10
2.4. Planos a los que se tuvo acceso en los experimentos. Las letras V-, V, V+, H-, H y H+ corresponden a las posiciones en las cuales los campos vectoriales fueron registrados. Los planos $\pm V$ , se encuentran a $\pm 4 \text{ mm}$ del plano vertical que se encuentra en el centro del cilindro. Los planos $\pm H$ , se encuentran a $\pm 5 \text{ mm}$ del centro del plano horizontal que se encuentra en el cilindro. . . . .	11
2.5. Distribución de los componentes del sistema de adquisición de imágenes. . . . .	12
2.6. Posición de los termopares en coordenadas cilíndricas ( $R$ , $\theta$ , $z$ ) centradas en la base del cilindro. a) Termopar superior ( $D/2$ , $0$ , $h$ ), b) termopar inferior ( $D/2$ , $\pi$ , $0$ ), c) termopar en el intercambiador inferior ( $D/2$ , $\pi$ , $-h/20$ ). . . . .	13
2.7. Este programa cuenta los pasos que da el motor en el intervalo de distancia que el usuario ajuste previamente. . . . .	15

2.8. Control de la velocidad de los motores que posicionan los planos de luz y la cantidad de imágenes por estación. . . . .	15
2.9. Programa que registra las temperaturas, de los termopares colocados en las posiciones indicadas en la figura 2.6. . . . .	15
3.1. Posición de los dispositivos para realizar experimentos de observación cualitativa de la convección natural en el plano vertical. La cámara está colocada de manera perpendicular al plano de luz láser que fue posicionado en la parte central de la cavidad. . . . .	20
3.2. Temperatura como función del tiempo durante el proceso de calentamiento del sistema. Historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. Las barras de error reportada es la desviación estándar de la lectura del termopar correspondiente [4]. . . . .	21
3.3. Temperatura como función del tiempo durante el proceso de calentamiento del sistema. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. . . . .	22
3.4. Temperatura como función del tiempo del experimento exploratorio. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. . . . .	23
3.5. Imagen tomada en la posición $z = 3h/4$ de la cavidad, que corresponde a la línea roja de la figura 3.7. . . . .	24
3.6. Imagen tomada en la parte central de la cavidad, que corresponde a la línea verde de la figura 3.7. . . . .	24
3.7. Proyecciones del campo de velocidad en la cavidad. Panel superior: Componentes de la velocidad en las direcciones $x$ y $y$ . El corte se toma en $z = h/4$ que corresponde a la línea horizontal del panel inferior. Panel inferior: Componentes de la velocidad en las direcciones $x$ y $z$ . El corte se toma en la posición central que corresponde a la línea vertical del panel superior. . . . .	25

3.8. Magnitud de la componente $x$ de la velocidad como función de la posición, situada en las líneas de corte de la figura 3.7. Los puntos sólidos corresponden a la línea horizontal del panel superior de la figura 3.7. Los puntos huecos corresponden a línea horizontal del panel inferior de la figura 3.7. . . . . .	26
3.9. Gráfica de comportamiento cualitativo de la convección natural de acuerdo a Müller et al. [1]. Los triángulos verdes corresponden a los casos explorados en este trabajo. . . . .	28
3.10. Temperatura como función del tiempo durante la ejecución del experimento. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. El comportamiento irregular en la traza del termopar b) se debe a un problema electrónico en la tarjeta de adquisición de datos. . . . .	30
3.11. Campos de velocidad de los cortes verticales obtenidos en las posiciones $(-D/4, 0$ y $D/4)$ de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades, indicadas en la figura 2.4. . . . .	32
3.12. Campos vectoriales de los cortes horizontales obtenidos en las posiciones $(-h/4, 0$ y $h/4)$ de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades, indicadas en la figura 2.4. . . . .	33
3.13. Componente de la velocidad en la dirección $u$ en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para $Ra = 3.36 \times 10^5$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4. . . . .	34
3.14. Componente horizontal (panel izquierdo) y componente vertical (panel derecho) de la velocidad como función de las coordenadas $(x, z)$ en el plano central de la cavidad. . . . .	35
3.15. Mapa de contornos de la componente horizontal (panel izquierdo) y componente vertical (panel derecho) de la velocidad como función de las coordenadas $(R, z)$ en el plano central de la cavidad. . . . .	36
3.16. Energía cinética $ec = \sqrt{u^2 + v^2}$ como función de las coordenadas $(R, z)$ en el plano central de la cavidad. . . . .	36

3.17. Mapa de contornos de la distribución de la energía cinética como función de las coordenadas $(R, z)$ en el plano central de la cavidad. . . . .	37
3.18. Valor absoluto de la diferencia entre la energía cinética de los planos (V, H+) y (V, H-), normalizada por $ (ec(V, H+)+ec(V, H-))/2 $ . . . . .	37
3.19. Mapa de contornos del valor absoluto de la resta de la energía cinética entre los planos (V, H+) y (V, H-), normalizada por $ (ec(V, H+)+ec(V, H-))/2 $ . . . . .	38
3.20. Componente de la velocidad en dirección $u$ en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para $Ra = 3.50 \times 10^5$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4. . . . .	39
3.21. Componente de la velocidad en dirección $u$ en la posición $(R, 0, h/6)$ , para los experimentos con número de Rayleigh $Ra = 3.36 \times 10^5$ , subsección 3.2.1 y $Ra = 3.50 \times 10^5$ , subsección 3.2.2. . . . .	40
3.22. Temperatura como función del tiempo durante la ejecución del experimento. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. El comportamiento irregular en la traza del termopar b) se debe a un problema electrónico en la tarjeta de adquisición de datos. . . . .	41
3.23. Campos vectoriales de los cortes verticales obtenidos en las posiciones $(-D/4, 0$ y $D/4)$ de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades indicadas en la figura 2.4. . . . .	42
3.24. Campos vectoriales de los cortes horizontales $(-h/4, 0$ y $h/4)$ de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades indicadas en la figura 2.4. . . . .	44
3.25. Componente de la velocidad en la dirección $u$ en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para $Ra = 5.60 \times 10^5$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4. . . . .	45

3.26. Temperatura como función del tiempo durante la ejecución del experimento. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. . . . . .	46
3.27. Campos vectoriales de los cortes verticales obtenidos en las posiciones $(-D/4, 0$ y $D/4)$ de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades indicadas en la figura 2.4. . . . .	47
3.28. Campos vectoriales de los cortes horizontales $(-h/4, 0$ y $h/4)$ de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades indicadas en la figura 2.4. . . . .	48
3.29. Componente de la velocidad en la dirección $u$ en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para $Ra = 1.4 \times 10^6$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4. . . . .	49
3.30. Componente horizontal (panel izquierdo) y componente vertical (panel derecho) de la velocidad como función de las coordenadas $(R, z)$ en el plano central de la cavidad. . . . .	50
3.31. Mapa de contornos de la componente horizontal (panel izquierdo) y componente vertical (panel derecho) de la velocidad como función de las coordenadas $(R, z)$ en el plano central de la cavidad. . . . .	50
3.32. Energía cinética $ec = \sqrt{u^2 + v^2}$ como función de las coordenadas $(R, z)$ en el plano central de la cavidad. . . . .	51
3.33. Mapa de contornos de la distribución de la energía cinética como función de las coordenadas $(R, z)$ en el plano central de la cavidad. . . . .	51
3.34. Valor absoluto de la resta de la energía cinética entre los planos (V, H+) y (V, H-), normalizada por $ (ec(V, H+) + ec(V, H-))/2 $ . Para los experimentos 1 (panel izquierdo) y 4 (panel derecho). . . . .	52
3.35. Mapa de contornos del valor absoluto de la resta de la energía cinética entre los planos (V,H+) y (V,H-) normalizada por $ (ec(V, H+) + ec(V, H-))/2 $ . . . . .	52

3.36. Temperatura como función del tiempo durante la ejecución del experimento. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. . . . .	53
3.37. Campos vectoriales de los cortes verticales obtenidos en las posiciones $(-D/4, 0$ y $D/4)$ de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4. . . . .	54
3.38. Campos vectoriales de los cortes horizontales $(-h/4, 0$ y $h/4)$ de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4. . . . .	55
3.39. Componente de la velocidad en la dirección $u$ en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para $Ra = 2.18 \times 10^6$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4. . . . .	56
3.40. Velocidad en función del número de Rayleigh para los experimentos presentados en esta tesis $w^* = \frac{w}{\sqrt{\frac{\alpha \nu}{h^2}}}$ . . . . .	58
3.41. Planos bidimensionales registrados por los dos sistemas PIV y graficados en el espacio tridimensional que les corresponde en una vista isométrica. . . . .	60
3.42. Intersección de los planos bidimensionales (V-, H+) del experimento 3.2.3, junto con la línea de vectores tridimensionales construidos apartir de estos planos. . . . .	60
3.43. Plano horizontal (panel izquierdo) del campo de velocidades mostrando la intersección de los dos planos situados en V- y en H+ de la figura 3.24. Plano vertical (panel derecho) del campo de velocidades mostrando la intersección de los dos planos situados en V- y en H+ de la figura 3.23. Los datos fueron obtenidos para $Ra = 5.60 \times 10^5$ (experimento 3.2.3). Las flechas rojas indican la proyección del campo tridimensional. . . . .	61
3.44. Intersección de los planos bidimensionales (V, H+) del experimento 3.2.3, junto con la línea de vectores tridimensionales construidos apartir de estos planos. . . . .	62

---

3.45. Vista horizontal (panel izquierdo) del campo de velocidades mostrando la intersección de los dos planos situados en V y en H+ de la figura 3.24. Vista vertical (panel derecho) del campo de velocidades mostrando la intersección de los dos planos situados en V y en H+ de la figura 3.23. Los datos fueron obtenidos para $Ra = 5.60 \times 10^5$ (experimento 3.2.3). Las flechas rojas indican la proyección del campo tridimensional. . . . .	62
3.46. Construcción de las nueve líneas de intersección presentadas en la figura 2.4. Cada línea contiene los vectores tridimensionales construidos a partir de los dos sistemas PIV. . . . .	63
3.47. Vista de las nueve líneas de vectores tridimensionales, junto con seis de los dieciocho planos bidimensionales. Los seis planos corresponden a cada uno de los cortes en la cavidad. . . . .	64





# Índice de tablas

3.1. Condiciones usadas en los experimentos realizados en este estudio. . . . .	28
---	----



# Nomenclatura

## Símbolos Griegos

$\alpha$	Difusividad térmica
$\beta$	Expansión volumétrica
$\nu$	Viscosidad cinemática

## Símbolos Romanos

$A$	Razón de aspecto
$D$	Diámetro
$e$	Espesor de la cavidad
$ec$	Energía cinética
$g$	Aceleración de la gravedad
$H$	Plano horizontal
$h$	Altura
$Pr$	Número de Prandtl
$R$	Radio
$Ra$	Número de Rayleigh
$Ra_c$	Número de Rayleigh Crítico
$T$	Temperatura
$T_c$	Temperatura fría
$T_h$	Temperatura caliente
$t$	Tiempo

$t_c$	Tiempo característico del experimento
$u$	Velocidad en la dirección $x$
$V$	Plano vertical
$v$	Velocidad en la dirección $y$
$w$	Velocidad en la dirección $z$
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas

## Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo, la puesta a punto y la utilización de un equipo experimental compuesto por dos sistemas PIV (*Particle Image Velocimetry* (Velocimetría por Imágenes de Partículas)) para la obtención simultánea de campos de velocidad en planos horizontales y verticales. Este equipo se utiliza para determinar los campos de velocidad en el interior de una cavidad cilíndrica, cuyas partes inferior y superior se mantienen a temperaturas alta y baja respectivamente. La diferencia de temperaturas que se impone en ambos extremos de la cavidad cilíndrica y la presencia de la aceleración de la gravedad, ocasionan un movimiento de convección natural.

La cavidad cilíndrica usada en este estudio, tiene una razón de aspecto (altura / diámetro) de 1.3 y el fluido de trabajo es agua destilada. La diferencia de temperaturas entre los extremos de la cavidad es de 2.4, 4, 11.4 y 15.6 °C, por lo que el rango de números de Rayleigh explorados es de  $Ra = 3.36 \times 10^5$  hasta  $Ra = 2.18 \times 10^6$ . Para los números de Rayleigh menores, el flujo se encuentra en estado permanente mientras que para los mayores, el flujo es dependiente del tiempo. El movimiento es fuertemente tridimensional y su descripción requiere necesariamente del conocimiento de campos de velocidad en planos no paralelos. En cada observación experimental se obtienen los campos de velocidad bidimensional en tres planos verticales y tres horizontales. Usando la información de los campos de velocidad bidimensional no paralelos, se reconstruyó el campo tridimensional en su intersección.

La información obtenida se usó para sugerir el patrón de movimiento tridimensional en todo el volumen para los casos en los que se presenta un flujo en estado permanente. La metodología experimental usada no permitió obtener suficiente información para hacer una reconstrucción tridimensional del flujo dependiente del tiempo.



# Capítulo 1

## Introducción

En esta introducción, se discute el fenómeno de la convección natural, esto es, el movimiento de un fluido generado por dos condiciones concurrentes; un gradiente de densidad adecuado y una fuerza volumétrica. Los gradientes de densidad pueden ser generados por gradientes de temperatura y/o concentración de alguna sustancia diferente de la que se compone el fluido. La fuerza volumétrica puede ser de origen gravitatorio, rotacional o electromagnético. En este trabajo estudiamos la convección natural del agua con gradientes térmicos en presencia de la fuerza de gravedad.

A continuación se describirá brevemente algunos conceptos sobre la convección natural. Una descripción completa de este fenómeno se puede encontrar en [5].

### 1.1. La Convección Natural

El físico francés Henri Bénard (1901) fue el primer científico en explorar el fenómeno de convección de manera sistemática. Sus observaciones se basaron principalmente en un experimento que consistía en calentar una capa muy delgada de aceite de ballena (spermaceti). Esta capa descansaba sobre una placa horizontal lo suficientemente grande, para considerar que la razón de aspecto  $A$ , definida como su espesor dividido entre la magnitud característica horizontal, fuera de orden  $10^{-3}$ . En este experimento, se observó que se formaban celdas de forma hexagonal en las que el fluido se movía con rapidez constante.

Posteriormente en 1916, Lord Rayleigh formuló una teoría para predecir el inicio del movimiento convectivo en este fenómeno cuando la razón de aspecto de la capa de fluido es infinitamente grande. Esta teoría indica que la estabilidad depende únicamente del siguiente parámetro adimensional,



$$Ra = \frac{g\beta |dT/dz| h^4}{\alpha\nu} \quad (1.1)$$

donde  $g$  denota la aceleración de la gravedad,  $h$  la profundidad del fluido,  $|dT/dz|$  es el gradiente de temperatura uniforme mantenido por agentes externos, y  $\beta$ ,  $\alpha$ , y  $\nu$  son la expansión volumétrica, la difusividad térmica, y la viscosidad cinemática, respectivamente;  $Ra$  es llamado el número de Rayleigh [6].

La teoría de Rayleigh indica que para una capa de fluido ilimitada en su extensión horizontal y considerando que el fluido tiene velocidad nula en las paredes inferior y superior, el número de Rayleigh crítico para el inicio del movimiento es  $Ra = 1708$ . Ésta predice que el patrón de movimiento adoptado por el fluido es hexagonal coincidiendo con la observación reportada por Bénard. Los trabajos pioneros de Bénard (observación experimental) y Rayleigh (análisis teórico de la estabilidad), dieron origen al estudio moderno de la convección natural en fluidos. Sin embargo, es de interés histórico observar que la modificación de la tensión superficial con la temperatura, es un efecto determinante en el experimento de Bénard y esto fue totalmente ignorado en la teoría de lord Rayleigh.

El efecto de las paredes laterales del contenedor que aloja al fluido que se mueve por efectos de la fuerza de flotación, fue incorporado en la teoría de estabilidad hasta la década de los 70's del siglo pasado. Esta consideración requiere de la solución numérica de las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento y energía [7], y por tanto los resultados cuantitativos se aplican únicamente a los flujos cuyos parámetros físicos y geométricos fueron empleados en los cálculos numéricos.

La primera investigación numérica que incorpora efectos no lineales en flujos axisimétricos de convección natural en estado permanente dentro de cavidades, fue realizada por Charlson y Sani [8]. Utilizando un método de Galerkin, ellos estudiaron la estabilidad de la convección axisimétrica al interaccionar con perturbaciones no axisimétricas. Este análisis se realizó tomando en cuenta distintas condiciones de frontera para las paredes laterales y con las fronteras superior e inferior rígidas o libres, así como para distintos números de Prandtl ( $Pr = 0.025, 1$  y  $60$ ).

Rosenblat [9], hizo un estudio teórico del flujo de convección natural en un cilindro calentando la parte inferior. El estudio se enfocó en razones de aspecto ( $A = r/h$ ) de  $0.5 \leq A \leq 2.0$ . Su principal objetivo fue investigar cómo las interacciones no lineales que generan movimiento convectivo se modifican al cambiar la razón de aspecto del contenedor. En todos los cálculos del estudio de Rosenblat se tomó en cuenta condiciones de frontera donde el esfuerzo cortante se anula en las paredes laterales y las fronteras superior e inferior se consideran como superficies libres isotérmicas no-deformables. Estas condiciones no modelan correctamente las condiciones de frontera correspondientes a los experimentos, pero reducen en gran parte la dificultad de los cálculos.

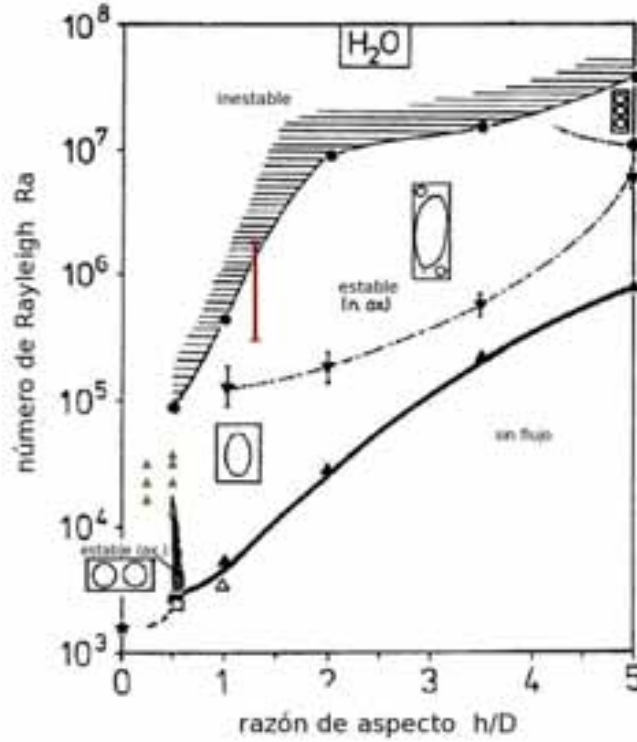


Figura 1.1: Mapa  $(A, Ra)$  del comportamiento cualitativo de la convección natural en una cavidad cilíndrica observada por Müller et al. [1]. Los triángulos verdes se refieren a los casos explorados por Leong [2]. La línea roja indica el rango al que el dispositivo experimental tiene acceso.

El patrón de movimiento convectivo dentro de una cavidad cilíndrica de altura ( $h$ ) y diámetro ( $D$ ), fue estudiado por Müller et al. [1]. En un estudio numérico y experimental, analizaron los patrones de movimiento convectivo para diferentes razones de aspecto  $A = h/D$ . Resumieron los resultados en un diagrama  $(A, Ra)$ , para dos tipos de fluidos de trabajo: agua y un material semiconductor fundido (GaSb). Se describen los distintos patrones de flujo en un rango de razón de aspecto de  $0.1 < A < 5$ . El mapa de comportamiento cualitativo para agua se presenta en la figura 1.1, donde se observan cuatro regiones que indican las características del flujo. La primera región corresponde al flujo sin movimiento que ocurre en el rango del número de Rayleigh de  $10^3 < Ra < 8.5 \times 10^5$ . Es en esta región donde se han realizado la mayoría de los estudios teóricos para calcular el número de Rayleigh crítico que indica el inicio de la convección. Para valores menores a  $A = 0.5$  el flujo convectivo se comporta axisimétricamente, el fluido asciende o desciende por el centro de la cavidad dependiendo de las condiciones iniciales con las que se realizó el experimento. En sus resultados numéricos para esta razón de aspecto, Müller et al. obtuvieron un modo no axisimétrico encontrado analíticamente por Charlson y Sani [8]. Sin embargo, experimentalmente no lograron comprobarlo y atribuyeron

esta discrepancia a las condiciones iniciales de temperatura [10].

El primer número de Rayleigh crítico ( $Ra_c$ ), indica las condiciones bajo las cuales el movimiento convectivo se manifiesta. El lugar geométrico de  $Ra_c$  se denota por la línea negra que se encuentra en la parte inferior del mapa de la figura 1.1 y es la condición que se calcula con los métodos de perturbación lineal cuando se toma como flujo base el de velocidad cero.

El movimiento del fluido en la zona del mapa de Müller et al., contenida entre las dos líneas inferiores, puede describirse, desde un punto de vista escogido de manera adecuada, como una única celda convectiva no axisimétrica, donde el movimiento del fluido es ascendente en un extremo y descendente en el otro. El intervalo de número de Rayleigh en donde podemos encontrar este tipo de movimiento es de  $2 \times 10^3 - 2 \times 10^5$  para cavidades con razón de aspecto entre  $A \sim 1$ . Es importante aclarar que si trazáramos un plano perpendicular al plano central de la cavidad en donde se observa la celda única, se distinguirían cuatro celdas colocadas simétricamente dentro del plano de observación.

En la tercera zona del mapa de Müller et al. situada entre la línea punteada y la zona sombreada, podemos observar un flujo tricelular en el plano central, aquí existe una celda que ocupa la mayor parte de la cavidad y dos pequeñas celdas situadas en las esquinas. El movimiento de las celdas pequeñas es opuesto al de la celda central. En el presente estudio, encontramos este tipo de movimiento y lo reportamos con detalle en la sección 3.2.3. Neumann [11] realizó un estudio numérico en el que encontró patrones de flujo semejantes a éste.

En la parte superior del mapa, se encuentra la región en la que el flujo es dependiente del tiempo. En esta zona, se observan celdas múltiples que evolucionan, integrándose y fraccionándose continuamente. En el experimento 3.2.5 de este estudio se observan movimientos de este tipo. En la gráfica  $A - Ra$  realizada por Müller et al. para GaSb líquido con un  $Pr = 2 \times 10^{-2}$ , reportaron un movimiento similar al del agua, pero algo peculiar en este fluido, es que el patrón de movimiento dependiente del tiempo ocurre para números de Rayleigh de menor valor.

Leong [2], hizo un estudio numérico del flujo de convección natural para un contenedor cilíndrico en donde la tapa superior es enfriada, la base calentada y la pared cilíndrica es considerada adiabática. Las soluciones que presentó fueron obtenidas para razones de aspecto de  $A = 1/2$  y  $A = 1/4$ , con número de Prandtl  $Pr = 7$ . Para este estudio se utilizaron los valores del número de Rayleigh que se pueden observar en triángulos verdes en la figura 1.1. Él observó seis patrones de flujo al incrementar el número de Rayleigh entre  $2 \times 10^3$  hasta  $3.7 \times 10^4$ , para las dos razones de aspecto. Leong concluyó que la transferencia de calor entre las placas depende de la estructura que tenga el flujo dentro del contenedor, por lo que el estudio de las estructuras tridimensionales de los flujos de convección natural en cavidades cobran gran importancia.

## 1.2. Objetivo

El objetivo del presente trabajo es reportar resultados experimentales, usando una técnica para reconstruir una distribución de velocidades tridimensionales en un flujo de convección natural, mediante dos sistemas de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Así como mostrar progresos en el desarrollo de esta técnica.

## 1.3. Aplicaciones

El estudio de la convección natural ha sido importante debido a la gran cantidad de aplicaciones que tiene este fenómeno. Algunas de estas se presentan en la formación de nubes, perforación de ductos, efecto termosifón, crecimiento de cristales y otros.

Una de las aplicaciones más relevantes en el contexto del estudio presente, es en la obtención de estructuras cristalinas uniformes de silicio. Se ha demostrado que las propiedades ópticas y electrónicas de los materiales semiconductores, mejoran considerablemente cuando estos materiales se obtienen bajo estas estructuras [12]. Este tipo de materiales son actualmente de mucha importancia en la industria electrónica y en la transformación fotovoltaica de la energía solar.

En la actualidad se cuentan con algunos métodos para la elaboración de cristales de silicio, que son procesos muy lentos y a su vez costosos; el mejoramiento en la elaboración de dichos cristales, tendría un efecto importante para la industria. Uno de estos métodos es el de Czochralski y consiste en fundir el material a cristalizar dentro de un crisol; en la parte superior se sostiene un cristal semilla que toca ligeramente al material fundido. La semilla y el cristal rotan para proveer un crecimiento uniforme. El movimiento convectivo del fluido es muy importante en este proceso, ya que afecta de manera sustancial en la calidad del cristal. En el movimiento convectivo, las fuerzas dominantes son la de flotación, la rotación del cristal y el gradiente de tensión superficial. Las propiedades cualitativas del movimiento determinan la uniformidad de la estructura cristalina del sólido, y a través de ésta, la calidad óptica y electrónica.

Específicamente, se sabe que cuando el material fundido tiene un movimiento oscilatorio, se genera un patrón de estrías en el cristal que reducen la uniformidad del cristal.

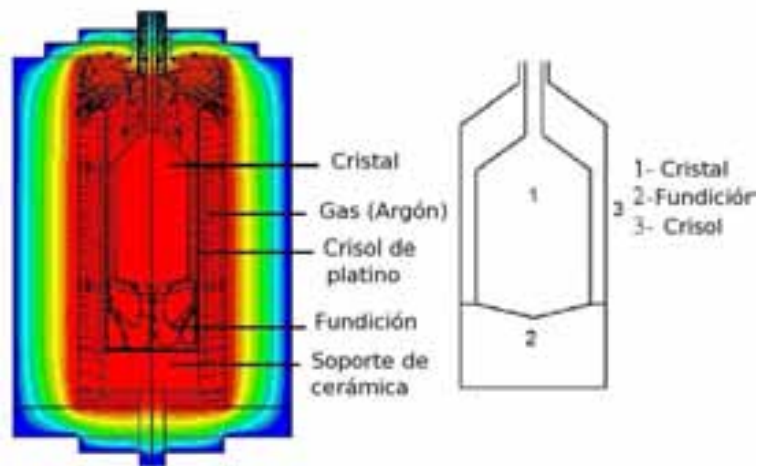


Figura 1.2: Esquema del dispositivo para hacer crecimiento de cristales por el método de Czochralski [3].

# Capítulo 2

## Equipo, Metodología y Análisis Experimental

El registro cuantitativo de la velocidad de un fluido en un gran número de puntos, es posible gracias a la técnica de PIV (*Particle Image Velocimetry*), que se ha perfeccionado desde hace treinta años. Este método de registro de velocidades ha sido una herramienta fundamental para estudiar experimentalmente el movimiento de los fluidos en diferentes condiciones. Esta técnica consiste en tomar dos imágenes separadas por un intervalo de tiempo delimitado por la cámara, posteriormente las imágenes son divididas en áreas de interrogación, en donde es posible calcular el vector de desplazamiento usando una auto-correlación entre las partículas situadas en estos recuadros. Con el vector de desplazamiento y el tiempo de captura entre las imágenes, es posible obtener la velocidad. Una descripción completa de esta técnica se encuentra en la referencia [13].

En este capítulo, se describe el sistema experimental encargado de hacer un doble análisis PIV simultáneo del desplazamiento de un fluido confinado en una cavidad cilíndrica. Se definen los subsistemas que integran el equipo experimental, sus especificaciones y funcionamiento. También se explica la metodología de la ejecución de los experimentos y los pasos seguidos para el análisis de los datos obtenidos.

### 2.1. Equipo Experimental

El dispositivo experimental se compone de una cavidad cilíndrica que tiene dos baños térmicos, uno en la parte inferior y otro en su parte superior. Estos intercambiadores mantienen las tapas inferior y superior de la cavidad a temperaturas caliente y fría respectivamente. La instrumentación de la cavidad incluye cuatro termopares, situados dos en la parte inferior, uno en el exterior y uno en la parte superior, que registran

las mediciones de temperatura a través de una tarjeta de adquisición de datos. Este dispositivo cuenta con dos láseres para iluminar los planos transversal y longitudinal. Las fuentes de luz están montadas sobre dos brazos mecánicos. Las imágenes de los trazadores iluminados por los láseres son capturadas por dos cámaras. Todo el dispositivo es controlado por un programa de LabView que coordina los brazos mecánicos y la captura de las imágenes. La figura 2.1 muestra una vista general del equipo.



Figura 2.1: Equipo experimental para estudiar la convección natural en una cavidad cilíndrica.

### 2.1.1. Cavidad

Las dimensiones del cilindro ubicado entre las dos tapas son:  $2\text{ mm}$  de espesor en la pared del cilindro,  $16\text{ mm}$  de diámetro interno y  $20\text{ mm}$  de altura, el material utilizado fue vidrio pyrex que permite un acceso óptico para registrar el movimiento de los trazadores situados en el interior de la cavidad. Un diagrama esquemático del cilindro se muestra en la figura 2.2. La cavidad cilíndrica fue cubierta por una camisa cuadrada de vidrio con  $2\text{ mm}$  de espesor y el espacio entre estas dos camisas fue llenado con agua destilada. La función de esta camisa es disminuir los efectos de refracción del haz de láser al incidir sobre la pared de la cavidad.

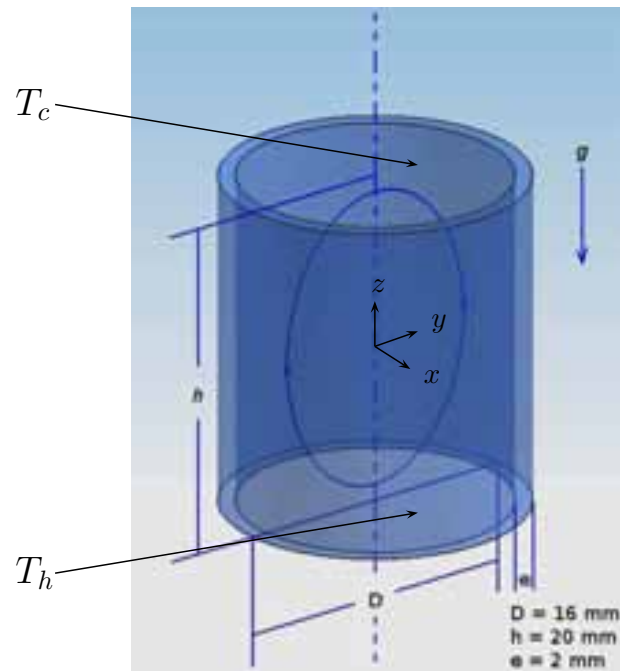


Figura 2.2: Esquema de la cavidad cilíndrica.  $T_c$  y  $T_h$  indican temperatura fría y caliente respectivamente.

La cavidad cilíndrica cuenta con una base de cobre hueca dentro de la cual circula agua a temperatura constante. La temperatura es controlada por un baño térmico marca TECHNE, donde su termostato tiene una estabilidad reportada por el fabricante de  $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  y su rango de temperatura es de  $-20$  a  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  [14]. Esta placa de cobre mantiene la temperatura constante en la base de la cavidad.

En la parte superior de la cavidad se encuentra un intercambiador de calor por el que fluye agua a temperatura constante. La base de ésta cámara cuenta con una superficie de vidrio, debido a que es necesario tener acceso óptico al interior del cilindro por esta zona. El objetivo de diseñar el intercambiador hecho con base de vidrio es dejar que los rayos de luz reflejados por los trazadores inmersos en el fluido, puedan llegar a la cámara de adquisición de imágenes que está colocada sobre el soporte del cilindro. La temperatura del agua se mantiene constante gracias a un baño térmico marca NESLAB modelo RTE-220. Este intercambiador a diferencia del descrito anteriormente, cuenta con una bomba externa, que hace fluir agua en el interior de la cámara de circulación. Es necesario regular la velocidad con la que fluye el agua dentro de la cámara, ya que una alta velocidad promueve la formación de burbujas y éstas refractan la luz reflejada por los trazadores ocasionando una imagen borrosa. Por otro lado, una baja



velocidad no logra transferir el calor suficiente entre la cavidad y la cámara, afectando así el gradiente deseado. El termostato de este baño térmico, según los datos del fabricante, mantiene el rango de temperatura entre  $-24$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y cuenta con una estabilidad de  $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  [15].

En la imagen 2.3 se muestra la cavidad cilíndrica y su montura. El volumen de agua que puede contener esta cavidad es de  $1.3\text{ cm}^3$ .

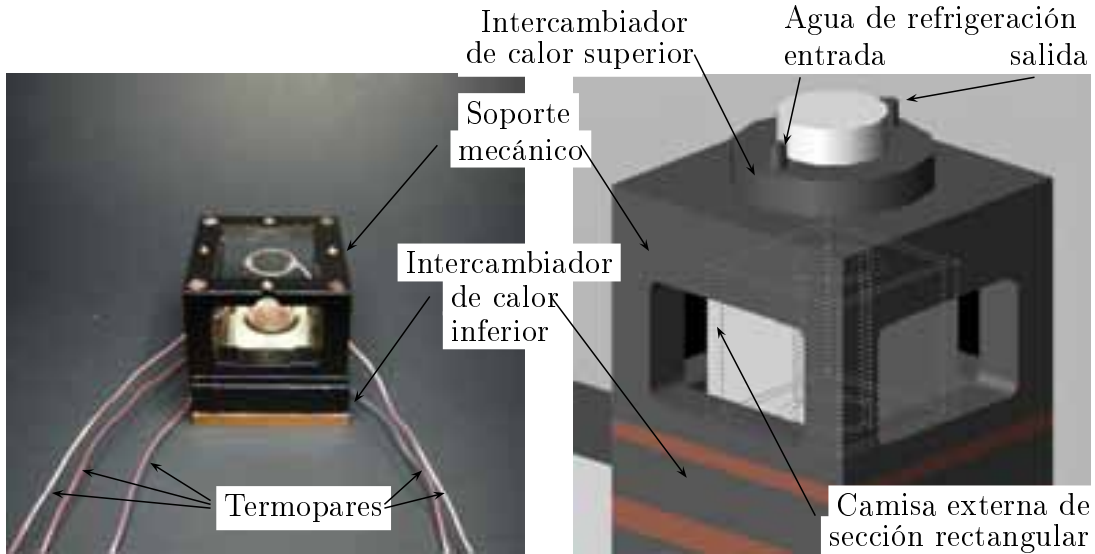


Figura 2.3: Esquema de la cavidad cilíndrica.

Para la fase experimental del presente estudio se obtuvieron los campos de velocidad en tres planos horizontales y tres planos verticales. Teniendo información en cada uno de estos planos, se accede a nueve intersecciones entre planos dentro de la cavidad y se construyen las tres componentes de velocidad de los vectores situados en estas intersecciones. En principio, con el sistema utilizado se puede tener acceso a siete planos horizontales y siete planos verticales, pero al incrementar a esta cantidad de planos, se aumenta el tiempo requerido por el experimento y se hace más complejo el análisis de los datos. Se consideró que tres planos era el número óptimo por la relativa simplicidad y rapidez para efectuar el experimento y porque de esta manera se tiene una información suficiente para bosquejar la reconstrucción tridimensional del flujo, pues los planos se encuentran en las zonas más representativas. En la figura 2.4, se muestran los planos a los que se tuvo acceso con el arreglo usado en el experimento. Para describir mejor la localización en donde se encuentran las intersecciones, se les asignó a cada uno de los planos una letra de identificación como se muestra en la figura 2.4.

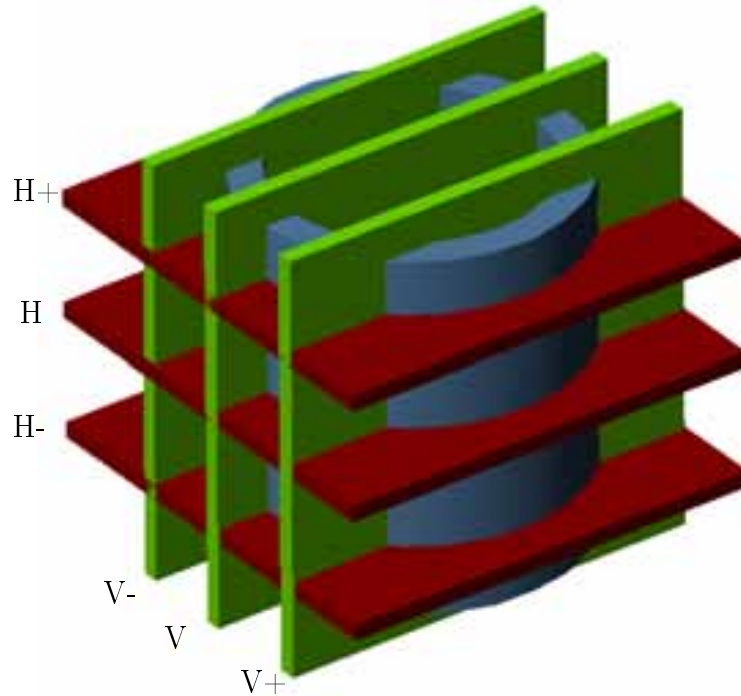


Figura 2.4: Planos a los que se tuvo acceso en los experimentos. Las letras V-, V, V+, H-, H y H+ corresponden a las posiciones en las cuales los campos vectoriales fueron registrados. Los planos  $\pm V$ , se encuentran a  $\pm 4 \text{ mm}$  del plano vertical que se encuentra en el centro del cilindro. Los planos  $\pm H$ , se encuentran a  $\pm 5 \text{ mm}$  del centro del plano horizontal que se encuentra en el cilindro.

### 2.1.2. Sistema de Adquisición de Imágenes

Este subsistema consiste en dos fuentes de luz láser, dos cámaras y dos brazos mecánicos. Los láseres tienen la función de iluminar las partículas contenidas en el fluido y cada uno cuenta con una fibra óptica que conduce la luz hasta un prisma que genera un plano de luz. Los planos de luz se mantienen en posición perpendicular uno respecto del otro. Las cámaras son encargadas de tomar fotografías de los trazadores contenidos en cada plano; cuentan con filtros colocados frente a sus lentes para bloquear la luz dispersada que proviene de fuentes indeseadas. Para registrar las imágenes de manera digital, cada cámara utiliza una tarjeta de video marca National Instruments. Los brazos mecánicos sujetan las fibras ópticas que conducen la luz láser que ilumina los planos transversal y longitudinal. Estos mecanismos funcionan mediante un sistema mecánico independiente, accionado cada uno por un motor de pasos. Los dos motores son controlados por un programa en la computadora y alimentados por una fuente externa [16].

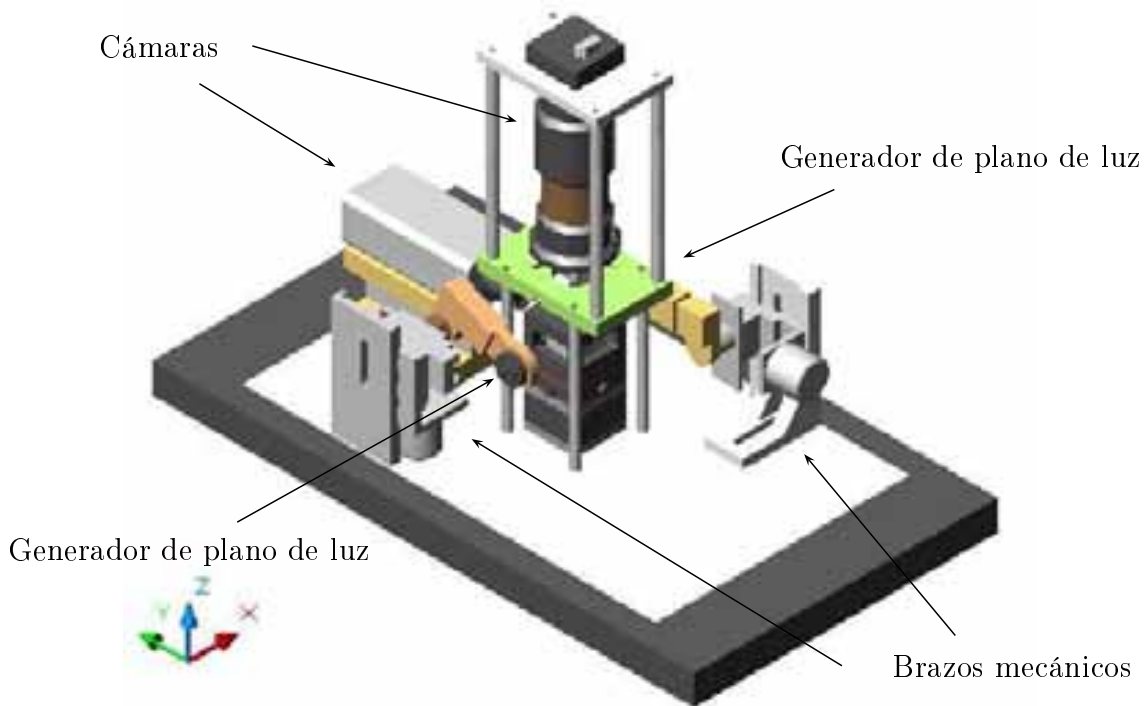


Figura 2.5: Distribución de los componentes del sistema de adquisición de imágenes.

### Cámaras

Se cuenta con una cámara CCD (Charge-Coupled Device) de alta resolución marca Kodak modelo MegaPlus ES 1.0 con una resolución ajustada a  $648 H \times 575 V$  y con salida digital. La frecuencia de adquisición de las imágenes para todos los experimentos fue de 30 cuadros por segundo, que es su velocidad más alta. Esta cámara registra las imágenes en el plano vertical. La segunda cámara, fue una cámara CCD monocromática marca BASLER modelo A302b con una resolución ajustada de  $782 H \times 582 V$ . Su velocidad máxima de adquisición es de 60 cuadros por segundo, pero para utilizarla en sincronía con la cámara Kodak, se utilizó a una velocidad de 30 cuadros por segundo.

### Láseres

Para el plano vertical se utilizó un láser de estado sólido con una longitud de onda de  $532 \text{ nm}$  y una potencia de  $300 \text{ mW}$  marca B&WTEK modelo BWT-50-PIG. El plano de luz fue generado usando un lente Powell acromático con una distancia focal de  $3.5 \text{ mm}$  y con un ángulo de apertura del haz de luz de  $30^\circ$ , marca OZ Optics. Este lente tiene la propiedad de distribuir uniformemente la intensidad en el abanico de luz a lo largo de la distancia perpendicular a la dirección de propagación del haz. El ancho del

plano de luz es de  $1\text{ mm}$ . Para el plano horizontal, se usó una fuente de luz láser de Helio-Neón con una longitud de onda de  $632.8\text{ nm}$  y con una potencia de  $75\text{ mW}$  marca Melles Griot modelo 05-LHP-927. Se utilizó un lente Powell acromático por lo que el plano de luz es igual al anterior así como el ángulo de apertura del plano.

### Brazos Mecánicos

El sistema cuenta con dos brazos mecánicos fijos a la base. Cada brazo tiene una cremallera que permite un desplazamiento transversal o longitudinal. El movimiento es promovido por motores de pasos acoplados a cada brazo y la resolución angular de los motores es de 200 pasos por revolución. Los acopladores de fibra óptica y sistemas de lentes que generan los planos de luz, son montados en los extremos de los brazos mecánicos. El movimiento de los motores es controlado y monitoreado por computadora, de tal manera que se conoce en todo tiempo la posición relativa de los planos de luz respecto de la cavidad con una precisión de  $\pm 0.07\text{ mm}$ . Una descripción detallada del diseño de los brazos mecánicos puede encontrarse en Hernández-Cruz et al. [17].

### 2.1.3. Sistema de Adquisición de Temperaturas

La temperatura es un parámetro importante a tomar en cuenta en el estudio de la estabilidad de la convección natural, ya que esta pieza de información se requiere para calcular el número de Rayleigh y ubicar en la gráfica de Müller et al. (figura 1.1) el comportamiento cualitativo del flujo. El sistema cuenta con cuatro termopares que se encuentran ubicados en la cavidad cilíndrica de la siguiente manera: dos en la parte inferior, uno en la parte superior y uno en el ambiente. Ver figura 2.6. Los termopares a) y b) registran la diferencia de temperatura que se genera dentro de la cavidad cilíndrica.

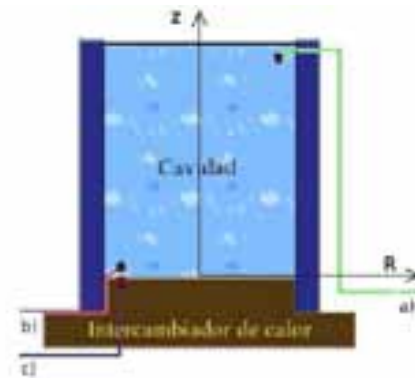


Figura 2.6: Posición de los termopares en coordenadas cilíndricas  $(R, \theta, z)$  centradas en la base del cilindro. a) Termopar superior  $(D/2, 0, h)$ , b) termopar inferior  $(D/2, \pi, 0)$ , c) termopar en el intercambiador inferior  $(D/2, \pi, -h/20)$ .

Los termopares son de tipo ‘T’ marca Omega, con un error intrínseco de  $\pm 0.5$  °C [18]. Estos termopares están conectados a un bloque de conexiones marca National Instruments tipo SCXI-1303, que a su vez se conecta a un acondicionador de señales de la misma marca modelo SCXI-1000. Todo lo anterior va conectado a una tarjeta de adquisición de temperaturas National Instruments PCI-MIO-16E-1 [19], que guarda las mediciones de las temperaturas en memoria digital.

#### 2.1.4. Programa de Adquisición de Datos

Se cuenta con un software hecho en la plataforma de LabView que controla la adquisición de temperaturas, el movimiento de los planos de luz y la adquisición de imágenes. Este programa tiene la habilidad de posicionar los planos de luz en una determinada cantidad de entre 1 y 7 estaciones. El programa permite también la posibilidad de variar la velocidad de los motores que accionan a los brazos mecánicos. Una vez posicionados los planos de luz, se registran las imágenes; se pueden adquirir entre una y cien imágenes por plano. Por último en un programa independiente se guardan las mediciones de las temperaturas [20].

A continuación se explica brevemente cada subprograma:

- El primer subprograma caracteriza el movimiento, esto quiere decir que cuenta los pasos totales que da el motor, para después dividir este dato entre la cantidad de estaciones. Debido a que se observó una pérdida de pasos, es recomendable hacerlo tres veces como mínimo para obtener un valor promedio del número de pasos.
- El siguiente subprograma posiciona los planos de luz en las estaciones en las que se medirá el campo de velocidades y registra las imágenes. Una vez posicionados los planos de luz, las imágenes son registradas en la computadora de manera sistemática. La adquisición de pares de imágenes (una vertical y una horizontal) se hace de manera simultánea pues el código está montado en una plataforma de dos procesadores que manipulan cada uno una cámara, sincronizados con el reloj interno de la computadora.
- Por último se tiene otro subprograma que guarda las mediciones de temperaturas del experimento. Una observación importante sobre este programa es que no puede ser ejecutado paralelamente con la toma de imágenes ya que impediría que las imágenes fueran tomadas simultáneamente debido que este proceso competiría por ancho de banda de uno de los procesadores. El archivo con los datos de temperatura es en formato de texto por lo que puede ser portado fácilmente.

En las figuras 2.7, 2.8 y 2.9 se esquematizan las pestañas que indican los subprogramas descritos:



Figura 2.7: Este programa cuenta los pasos que da el motor en el intervalo de distancia que el usuario ajuste previamente.



Figura 2.8: Control de la velocidad de los motores que posicionan los planos de luz y la cantidad de imágenes por estación.



Figura 2.9: Programa que registra las temperaturas, de los termopares colocados en las posiciones indicadas en la figura 2.6.

En las tres imágenes, los controles circulares inferiores determinan la velocidad con la que se desplazan los motores, las líneas situadas a la izquierda muestran el desplazamiento que van teniendo los motores en función del número de pasos, el recuadro izquierdo muestra el valor que corresponde al número de estaciones. En la figura 2.7, se muestran en las ventanas superiores el número de pasos que dan los motores. En la figura 2.8, en las ventanas superiores se determina el número de estaciones que se deseen y la dirección de la carpeta en las que se guardan las imágenes. En la figura 2.9, en las ventanas superiores se muestra la dirección en donde se guarda el archivo de datos de la temperatura registrada.

## 2.2. Metodología Experimental y Análisis

En esta sección se explica la metodología experimental utilizada para realizar el experimento y el análisis de los datos. La primera etapa de la metodología constituye los preparativos previos para la ejecución del experimento. La segunda corresponde a la metodología con la que se prepararon y realizaron los experimentos. La tercera etapa consiste en hacer el análisis PIV a las imágenes obtenidas por el experimento y el procesamiento de esta información para la adquisición de los resultados finales.

### 2.2.1. Labores previas

Los preparativos que necesita el equipo experimental antes de realizar un experimento son los siguientes:

1. Verificar que todos los equipos se encuentren conectados a la corriente y revisar que el no-break de la computadora funcione correctamente.
2. Llenar los depósitos de los intercambiadores con agua destilada, teniendo cuidado en el vaciado para no agregar oxígeno al fluido.
3. Fijar las cámaras y revisar su alineación.
4. Alinear los planos de luz y revisar que su intensidad sea la óptima.
5. Revisar que la computadora detecte todos los subsistemas y probarlos para revisar que funcionen correctamente.
6. Preparar una solución de agua destilada con concentración adecuada de partículas.

### 2.2.2. Preparación y Ejecución del Experimento

Para realizar un experimento se procede con la metodología siguiente:

1. Limpiar las probetas de sección cilíndrica y cuadrada con acetona, después con isopropanol y por último con metanol. Esperar hasta que se evapore cada una de las soluciones antes de continuar con la siguiente.
2. Limpiar todas las superficies transparentes y lentes de las cámaras con agua destilada.
3. Posicionar los sensores de desplazamiento de los brazos mecánicos para ambos planos y colocar perpendicularmente los planos de luz.

4. Fijar el termopar de la parte superior en la cuña que tiene el cilindro y colocar el sello en la parte superior del cilindro.
5. Llenar la cavidad cuadrada con agua destilada y posteriormente llenar la cavidad cilíndrica con agua destilada con una cantidad adecuada de trazadores.
6. Sellar la cavidad y colocar las mangueras de la cámara de circulación de la parte superior.
7. Encender el baño térmico superior y asegurar que no existan burbujas ni en la cámara de circulación superior, ni en la cavidad cilíndrica.
8. Ubicar las cámaras en posición perpendicular una de la otra, asegurándose que los filtros respectivos se encuentren colocados.
9. Enfocar las cámaras en el plano deseado. Para estos experimentos de tres por tres estaciones el enfoque óptimo se da en la estación intermedia.
10. Encender el baño térmico inferior e iniciar el monitoreo de la estabilización de la temperatura al gradiente deseado.
11. Encender los láseres y apagar todas las luces del laboratorio para evitar reflejos.
12. Cerrar todas las aplicaciones en la computadora que ocupan ancho de banda del procesador. Especialmente hay que detener la adquisición de temperatura y ejecutar la caracterización de nuestro programa tres veces.
13. Escoger el número de estaciones deseadas, la velocidad y la cantidad de imágenes que se requiera tomar.
14. Correr el programa de adquisición de imágenes.
15. Una vez finalizada la adquisición de imágenes, se corre de nuevo el programa de adquisición de temperaturas, durante al menos 10 segundos.

### 2.2.3. Procesamiento de la Información

Una vez terminado el experimento, el programa guarda en el disco duro las imágenes. El programa de adquisición de información separa las imágenes en una carpeta por cada estación, asignándoles nombres de acuerdo a la cantidad de pasos que da el plano de luz en el movimiento horizontal. El nombre que asigna el programa a las imágenes es por número de imagen y la estación en la que fueron tomadas. Para facilitar el análisis, se separan estas imágenes en subcarpetas dependiendo de la estación en la que fueron tomadas. Posteriormente se procesa esta información utilizando un software comercial para realizar el análisis PIV. Ya con los archivos de datos se hace un promedio de los



campos vectoriales para cada plano y se compara la componente común de velocidades para las intersecciones de los planos, esto con ayuda de dos programas hechos bajo software de distribución libre. Los archivos de datos que se generen del procesamiento de las imágenes son almacenados de la misma manera que las imágenes.

# Capítulo 3

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos durante el proyecto de investigación. Con el fin de optimizar el estudio de la convección natural, el análisis de los resultados experimentales se dividieron en dos partes. En la primera parte, se presentan los experimentos preliminares y se describen brevemente los resultados obtenidos por cada subsistema, estos resultados sirvieron para mejorar la técnica del equipo experimental. La segunda parte corresponde a los experimentos que son base para la interpretación de un flujo tridimensional de convección natural en una cavidad cilíndrica.

### 3.1. Experimentos Preliminares

Se realizaron experimentos preliminares con el objetivo de probar el funcionamiento individual del equipo experimental. Con la ayuda de estas pruebas fue posible corregir errores particulares de los subsistemas y errores en el registro de datos. Estas inexactitudes afectaban la correcta visualización y el entendimiento de los campos de velocidad. También se probó el equipo de manera integral, enlazando el funcionamiento de los subsistemas. Esta etapa experimental nos permitió ensayar y refinar el protocolo experimental de manera completa.

#### 3.1.1. Pruebas de los Sistemas del Equipo Experimental

En los experimentos iniciales, se hicieron observaciones cualitativas del comportamiento del flujo dentro de la cavidad cilíndrica. Esto se hizo combinando un solo plano de luz láser y una cámara. El plano de luz láser se colocó en posición vertical, en la parte media de la cavidad cilíndrica.

Estas observaciones permitieron corregir errores de alineación en el sistema y se logró mejorar la visualización del flujo en la celda. También se obtuvo un valor aproximado del tiempo en el que el flujo alcanza un estado permanente. Este tiempo es corroborado por el registro de la temperatura.

Este experimento se realizó para el plano vertical, ya que es la sección en donde se observa más claramente el comportamiento dinámico del flujo convectivo. En la figura 3.1 se ilustra la localización de la cámara y el láser durante este experimento preliminar.

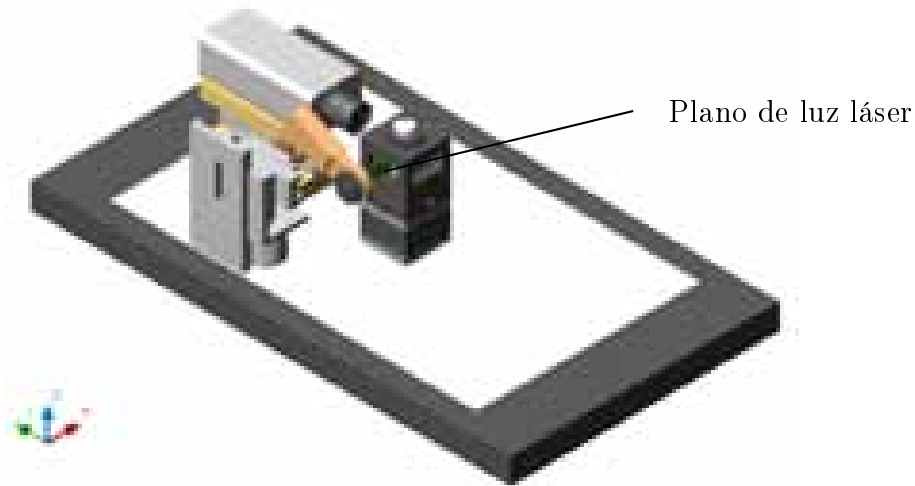


Figura 3.1: Posición de los dispositivos para realizar experimentos de observación cualitativa de la convección natural en el plano vertical. La cámara está colocada de manera perpendicular al plano de luz láser que fue posicionado en la parte central de la cavidad.

Para este experimento se mantuvieron fijos el plano de luz láser y la cámara en los lugares mostrados en la figura 3.1, los baños térmicos fueron encendidos para alcanzar una diferencia de temperatura determinada y se observó el comportamiento celular del fluido dentro de la cavidad cilíndrica.

También se realizaron experimentos para monitorear las temperaturas dentro de la cavidad, con el objetivo de corroborar que las mediciones de temperatura fueran correctas. Esto incluyó la comprobación que los baños térmicos funcionaran adecuadamente. En la figura 3.2 se muestra la temperatura como función del tiempo en los puntos donde fueron colocados los termopares y se observa como gradualmente se alcanza el equilibrio térmico. Los aumentos repentinos en las trazas de la temperatura corresponden a incrementos en la temperatura de los baños térmicos de dos grados centígrados.

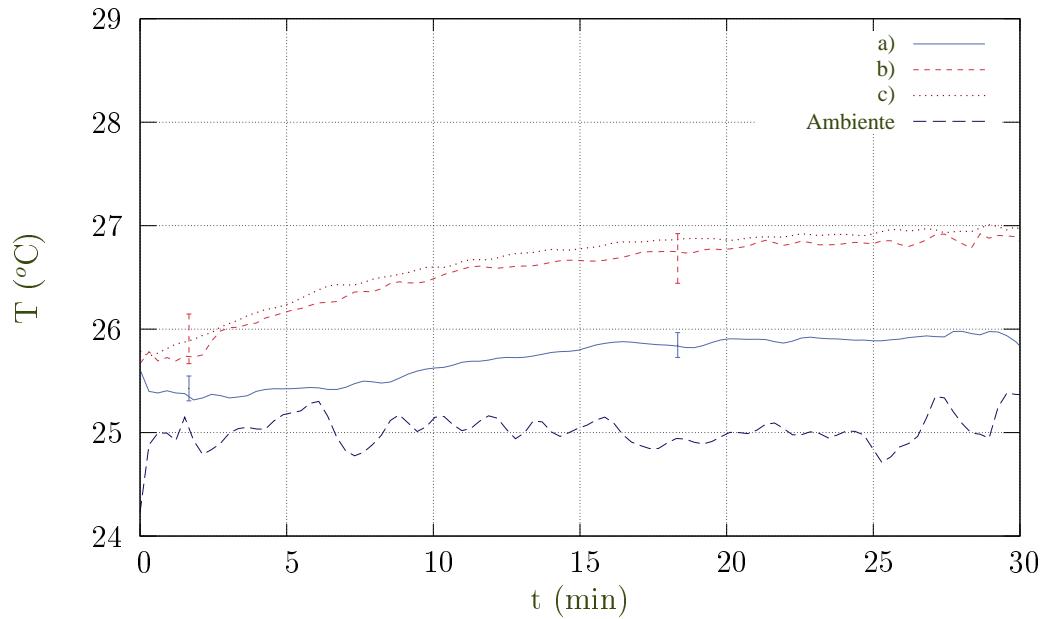


Figura 3.2: Temperatura como función del tiempo durante el proceso de calentamiento del sistema. Historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. Las barras de error reportada es la desviación estándar de la lectura del termopar correspondiente [4].

Para finalizar las pruebas de los sistemas del equipo experimental, se realizó la observación del flujo dentro de la cavidad fijando el gradiente de temperatura a  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  y se noto el movimiento convectivo en la celda. En este experimento se percibe que se requiere aproximadamente una hora y media para alcanzar el estado permanente. Esto se ilustra en la figura 3.3.

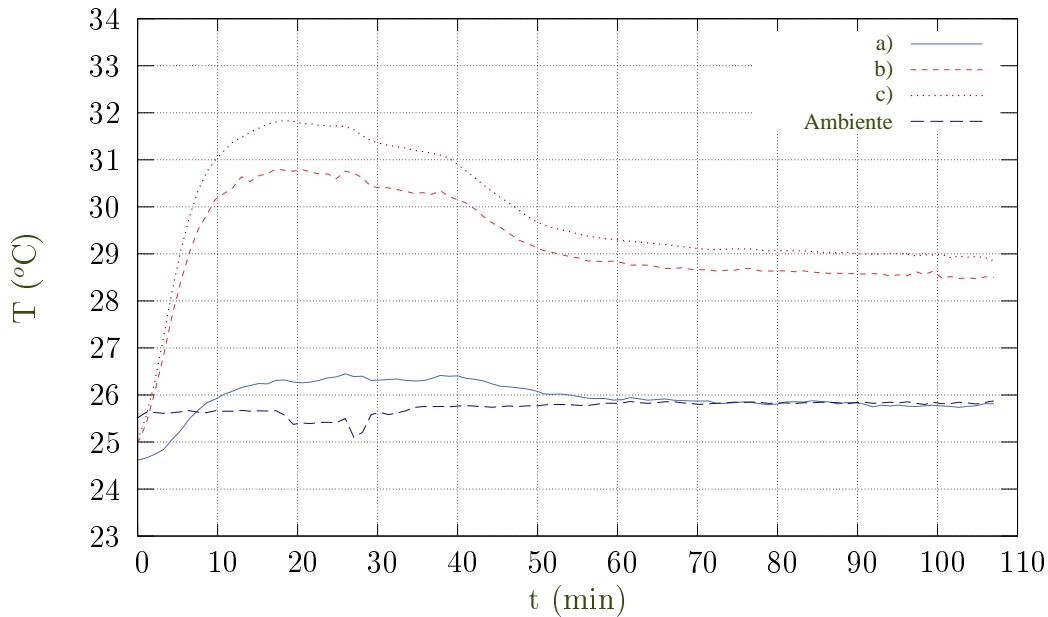


Figura 3.3: Temperatura como función del tiempo durante el proceso de calentamiento del sistema. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6.

Algo importante que observamos en este experimento fue que debido a las pérdidas de calor en las mangueras, la temperatura del baño térmico fue sistemáticamente  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  mayor a la que se midió en la base del cilindro. Conocer esto ayudó a fijar adecuadamente los valores iniciales en los baños térmicos y así tener seguridad en el gradiente deseado al realizar el experimento.

### 3.1.2. Pruebas de Funcionamiento del Sistema Integrado

Una vez que los subsistemas funcionaron correctamente, se realizaron experimentos en donde se tomó la imagen de dos planos mutuamente perpendiculares, consiguiéndose información de las tres componentes de la velocidad en su intersección. Se prepararon los intercambiadores para alcanzar un gradiente de  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , esto se puede apreciar en la figura 3.4. La duración de el registro de imágenes fue de aproximadamente 12 segundos. En la figura 3.4 se puede apreciar un pequeño intervalo de tiempo en el cual no existe la traza de temperatura. Este intervalo corresponde a la duración del experimento.

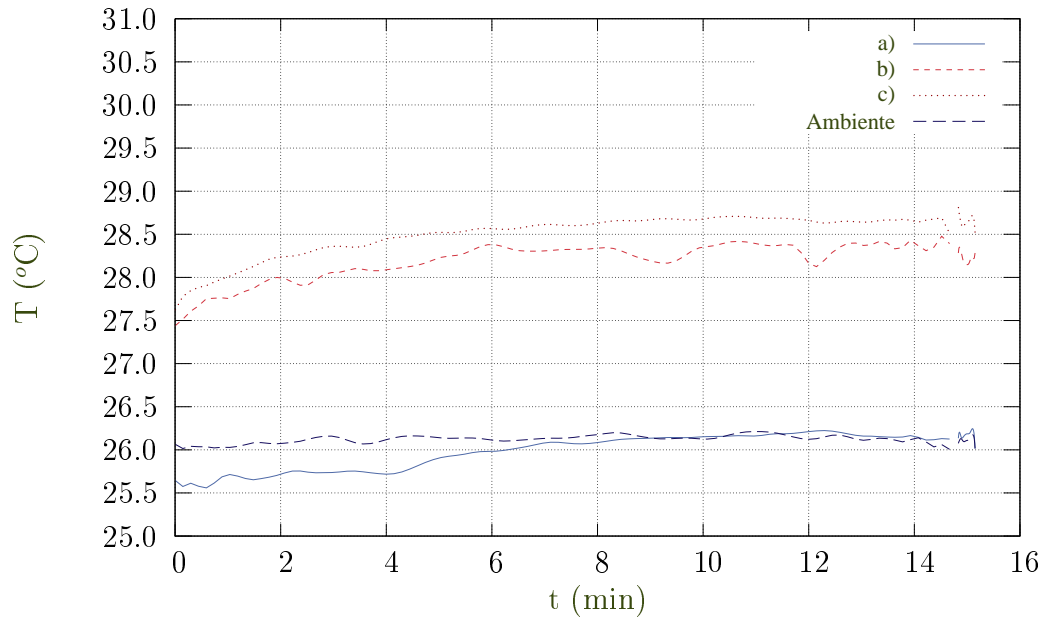


Figura 3.4: Temperatura como función del tiempo del experimento exploratorio. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6.

Las imágenes que se obtuvieron en el experimento se muestran en las figuras 3.5 y 3.6. Las cámaras fueron enfocadas en los planos de interés, por lo que las imágenes mostradas son de buena calidad. No es posible observar esta nitidez en el enfoque para cortes diferentes a esta posición, ya que las cámaras no cuentan con un sistema de auto enfoque. La figura 3.5 muestra una mayor luminosidad en sus partículas que en la observada en la figura 3.6, ya que el láser usado para la iluminación de este plano cuenta con una mayor potencia en comparación al láser usado para iluminar el plano de la figura 3.6.



Figura 3.5: Imagen tomada en la posición  $z = 3h/4$  de la cavidad, que corresponde a la línea roja de la figura 3.7.

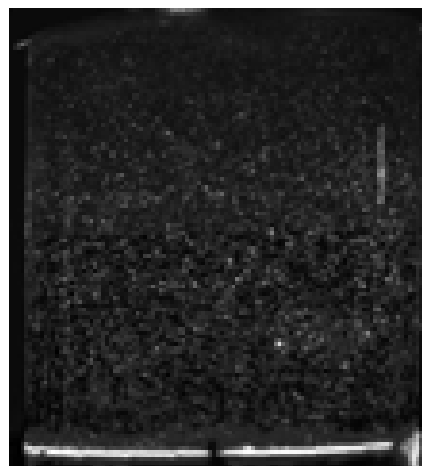


Figura 3.6: Imagen tomada en la parte central de la cavidad, que corresponde a la línea verde de la figura 3.7.

Los campos de velocidad fueron obtenidos promediando de diez campos de velocidad instantáneos. Para poder obtener estos campos vectoriales se tomaron veinte imágenes en cada plano a una velocidad de treinta cuadros por segundo. El análisis de PIV se realizó mediante la ayuda del software comercial FlowManager 3.5. Este programa hace una correlación entre dos fotografías para obtener un campo de velocidades.

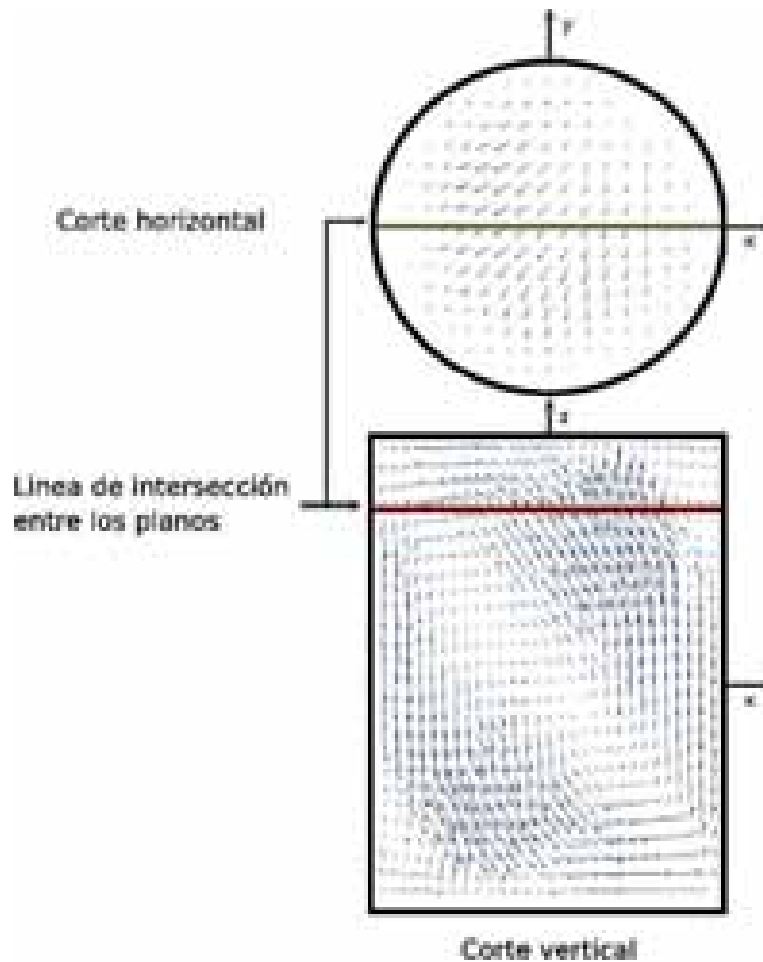


Figura 3.7: Proyecciones del campo de velocidad en la cavidad. Panel superior: Componentes de la velocidad en las direcciones  $x$  y  $y$ . El corte se toma en  $z = h/4$  que corresponde a la línea horizontal del panel inferior. Panel inferior: Componentes de la velocidad en las direcciones  $x$  y  $z$ . El corte se toma en la posición central que corresponde a la línea vertical del panel superior.

Aunque el objetivo principal de este experimento fue obtener información sobre las tres componentes de la velocidad en la línea de intersección de dos planos, es importante notar que esta información también nos permite tener una estimación de la consistencia de los campos de velocidad obtenida en planos independientes. Esto se puede lograr comparando la componente de la velocidad que es común a ambos planos. Usando coordenadas cartesianas, notamos que el campo de velocidad vertical contiene las componentes de la velocidad en las direcciones  $x$  y  $z$ , mientras que el campo de velocidad horizontal incluye las componentes en las direcciones  $x$  y  $y$ . Comparando la componente común  $x$  contenida en ambos planos podemos conseguir una estimación de la consis-



tencia de las mediciones de la velocidad. En este punto, es conveniente enfatizar que los sistemas usados para medir las velocidades en los dos planos son totalmente independientes y una coincidencia de la componente común de la velocidad, será un claro indicador de la validez de ambas mediciones.

En la figura 3.8 podemos observar la gráfica de las componentes  $u$  con respecto a su posición en la línea de intersección. Al intentar hacer la comparación se encontraron algunas dificultades. Aunque la magnitud de velocidad y la posición de los puntos en cada uno de los planos se sabe con precisión, la posición relativa de las dos distribuciones de velocidad no se conoce pues fueron obtenidas con sistemas PIV independientes orientados en direcciones perpendiculares.

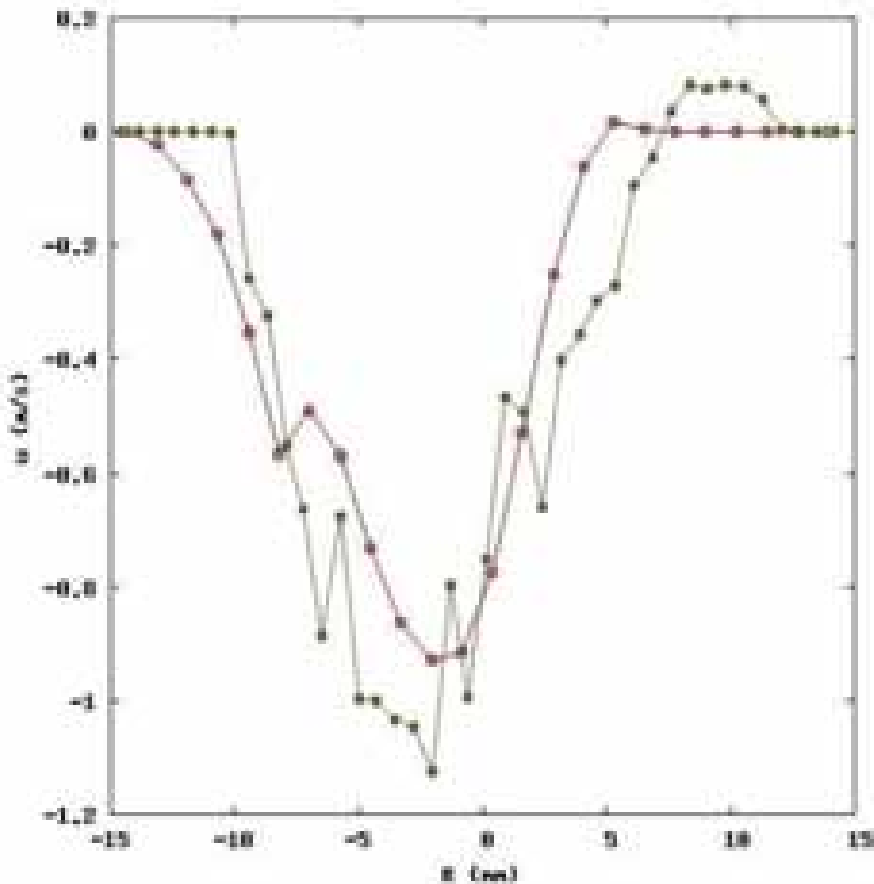


Figura 3.8: Magnitud de la componente  $x$  de la velocidad como función de la posición, situada en las líneas de corte de la figura 3.7. Los puntos sólidos corresponden a la línea horizontal del panel superior de la figura 3.7. Los puntos huecos corresponden a línea horizontal del panel inferior de la figura 3.7.

En este experimento se detectó un error sistemático en el procesamiento de los datos experimentales con el programa de análisis de PIV que incidía en la estimación de la magnitud de la velocidad. El error fue corregido.

En este experimento, también se detectó que el haz láser del plano horizontal era demasiado grueso debido a imperfecciones en la lente generadora del plano de luz, por lo que se optó por reemplazarla. Otro aspecto muy importante que reveló este experimento consistió en que la velocidad con la que se desplazaban los planos de luz láser era demasiado lenta, por lo que se aumentó la velocidad de desplazamiento de los planos de luz. También se encontró que el programa tardaba un tiempo inaceptablemente largo en tomar veinte fotografías, debido principalmente al mal funcionamiento de una de las cámaras. En experimentos posteriores se reemplazó esta cámara por la cámara descrita en el capítulo dos y para incrementar la velocidad del experimento se decidió tomar menor cantidad de fotografías (diez por plano).

## 3.2. Resultados Finales

En esta sección se describen los resultados obtenidos en los experimentos con todos los subsistemas acoplados. Se hace una descripción y análisis del campo de velocidades en los planos a los que tiene acceso el dispositivo experimental. Se describirán algunas características importantes del flujo en estos planos bidimensionales y la relación que tienen entre sí, se mostrará que para ciertos casos los campos de velocidad en las intersecciones de los planos de análisis presentan una consistencia satisfactoria mientras que en otros no es así. En estos últimos se detectaron los factores que afectan la consistencia.

Se describirán los resultados obtenidos por el análisis PIV para tres estaciones horizontales y tres verticales. En esta sección sólo describiremos los campos de velocidad tridimensionales en las intersecciones y cómo estos nos ayudan para hacer un análisis parcial de un flujo de convección natural.

Se efectuaron observaciones experimentales bajo las condiciones mostradas en la tabla 3.1. El intervalo de diferencias de temperatura entre la pared inferior y superior que fue explorado en este estudio fue de  $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  que corresponde a un intervalo de número de Rayleigh de  $3.36 \times 10^5$  a  $2.18 \times 10^6$ . De acuerdo con el mapa de comportamiento cualitativo de Müller et al. [1], las observaciones para números de Rayleigh bajos corresponden a convección en estado permanente, mientras que la observación para el número de Rayleigh más alto corresponde a un movimiento dependiente del tiempo. Ver figura 3.9. Los experimentos 1 y 2 se efectuaron usando una diferencia de temperatura aproximadamente igual para determinar la repetibilidad de nuestro sistema.

Experimento N°	$\Delta T$	Ra
1	2.4	$3.36 \times 10^5$
2	2.5	$3.50 \times 10^5$
3	4.0	$5.60 \times 10^5$
4	11.4	$1.59 \times 10^6$
5	15.6	$2.18 \times 10^6$

Tabla 3.1: Condiciones usadas en los experimentos realizados en este estudio.

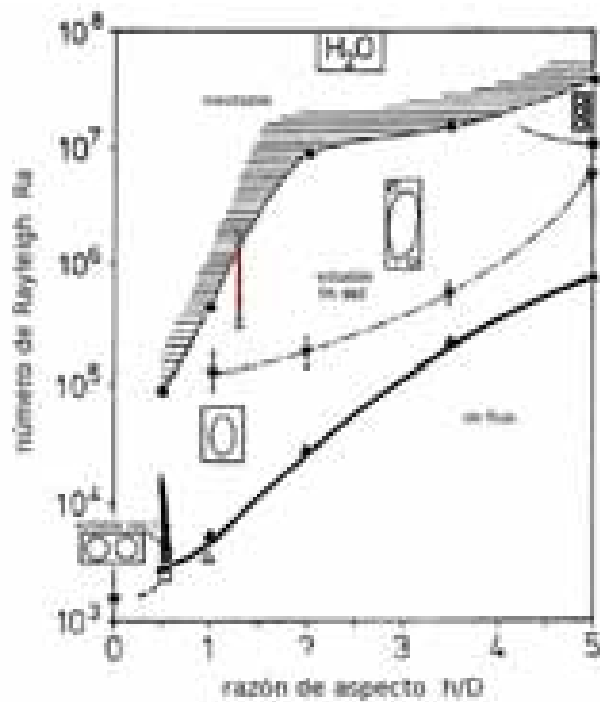


Figura 3.9: Gráfica de comportamiento cualitativo de la convección natural de acuerdo a Müller et al. [1]. Los triángulos verdes corresponden a los casos explorados en este trabajo.

### 3.2.1. Experimento 1 ( $Ra = 3.36 \times 10^5$ )

Este experimento fue realizado con un gradiente de  $2.4 \text{ }^\circ\text{C}$  entre las tapas inferior y superior de la cavidad. Se eligieron cortes en tres estaciones para los planos transversal y longitudinal del cilindro. El tiempo total de duración del experimento fue de 21 segundos. Como fluido de estudio se utilizó agua destilada con un número de Prandtl promedio de  $Pr = 6.7$ . Se utilizaron trazadores esféricos de vidrio con un recubrimiento reflector de plata, con un diámetro promedio de  $10 \text{ }\mu\text{m}$ . El coeficiente de expansión volumétrica de el fluido es de  $\beta = 2.26 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , el coeficiente de difusividad térmica es de  $\alpha = 1.442 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y el coeficiente de viscosidad cinemática tiene un valor de  $\nu = 9.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### Temperatura dentro de la cavidad como función del tiempo

Con base en la observación de la evolución temporal de la temperatura en los puntos indicados en la figura 2.6, se puede conocer el tiempo mínimo a partir del cual el sistema se encuentra en estado permanente. Para ilustrar el comportamiento de la temperatura del sistema en función del tiempo, la figura 3.10 muestra esta información para el caso en el que el número de Rayleigh es  $3.36 \times 10^5$ . Como puede observarse, después de un periodo transitorio, la temperatura en cada uno de los termopares puede considerarse constante (con diferencias menores al error estadístico del termopar) a partir de aproximadamente  $120 \text{ min}$ . El tiempo en el que se puede considerar que la temperatura alcanzó un valor constante, varía con el número de Rayleigh; en los resultados reportados en este caso el sistema analizado se encuentran en estado permanente.

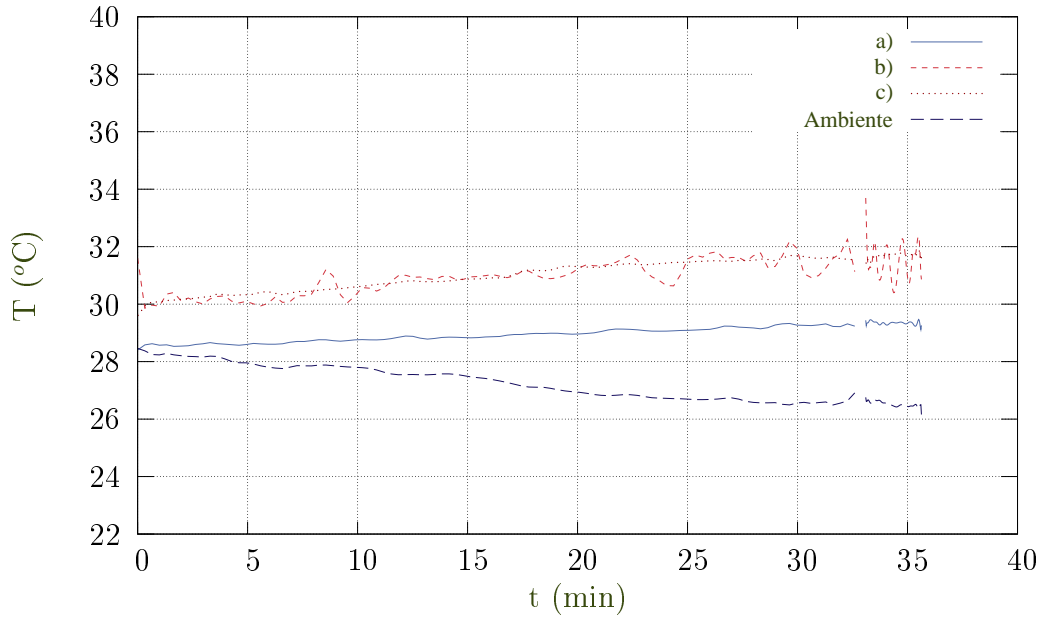


Figura 3.10: Temperatura como función del tiempo durante la ejecución del experimento. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. El comportamiento irregular en la traza del termopar b) se debe a un problema electrónico en la tarjeta de adquisición de datos.

Se tomaron datos de la temperatura antes e inmediatamente después de realizar las observaciones del experimento. Esto nos permitió corroborar que la temperatura no tuvo variación durante la adquisición de imágenes. Esto se manifiesta como una ausencia de datos durante los veintiún segundos en los que se interrumpen las líneas mostradas en la figura 3.10.

### Campos de Velocidad en Planos Verticales y Horizontales

Se obtuvieron nueve campos de velocidad con cortes verticales; tres por cada estación en las posiciones  $D/4$ ,  $0$  y  $-D/4$ , donde  $D$  es el diámetro del cilindro. Para la obtención de un campo de velocidades fue necesario la adquisición de diez imágenes por intersección. Con esta información se obtuvieron cinco campos de velocidad (pues se requieren dos imágenes por campo). Los campos instantáneos se promediaron para obtener el campo promedio en el plano y son los que se muestran en la figura 3.11. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener la información del campo de velocidades (ver la figura 2.4). El campo de velocidades obtenido en cada uno de los tres campos registrados por corte presentan un flujo similar como se puede observar al comparar las figuras en cada una de las columnas. Una descripción más amplia a este respecto se encuentra en la sección 3.2.1. Como era de esperarse, los campos de velocidad son diferentes en cada uno de los cortes verticales del cilindro, como puede observarse al comparar los renglones en la figura 3.11. La estructura dominante en el corte central (columna V en la figura 3.11) es una celda convectiva con dos pequeñas estructuras vorticales en las esquinas superior derecha e inferior izquierda. En este campo de velocidades se puede identificar un punto de estancamiento en la región central de la cavidad y una simetría aproximada alrededor de la línea diagonal que va del extremo superior izquierdo al extremo inferior derecho. Este patrón de movimiento coincide cualitativamente con el reportado por Müller et al. [1], ver figura 3.9. El campo de velocidades mostrado en la columna V- de la figura 3.11, tiene características análogas a las descritas anteriormente, pero con el punto de estancamiento desplazado hacia la pared derecha y ligeramente hacia abajo. En este campo de velocidades no se observa la simetría diagonal descrita para el campo de velocidades central, sin embargo, se puede observar que los flujos en el corte  $D/4$  es similar al corte en  $-D/4$ , si se rotara  $180^\circ$  en los ejes  $\theta$  y  $r$ .

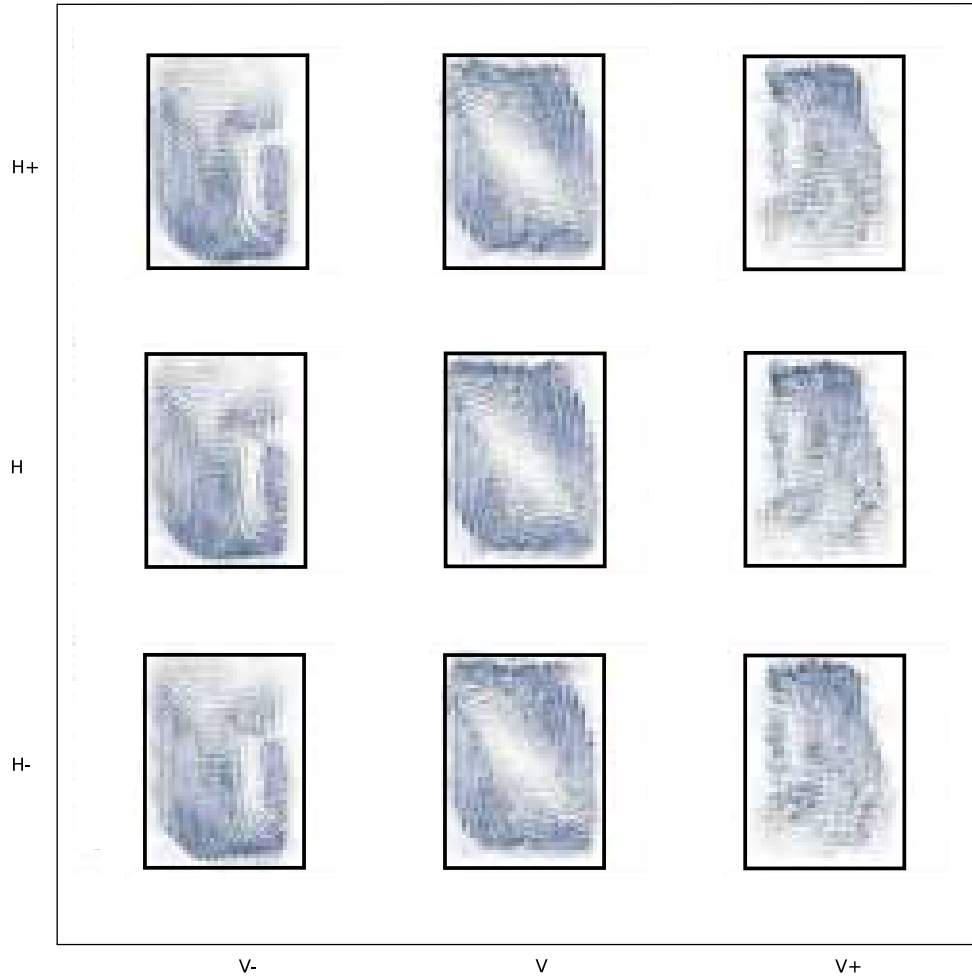


Figura 3.11: Campos de velocidad de los cortes verticales obtenidos en las posiciones  $(-D/4, 0)$  y  $(D/4, 0)$  de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades, indicadas en la figura 2.4.

De manera análoga a los cortes verticales, para los cortes horizontales se obtuvieron nueve campos, tres por cada estación en los cortes  $h/4, 0$  y  $-h/4$  del cilindro, donde  $h$  es la altura total. En estos cortes se utilizó la misma metodología para la obtención de los campos de velocidades verticales. Los resultados se muestran en la figura 3.12. Como se puede observar, los campos obtenidos por corte presentan un flujo similar y al igual que en los cortes verticales, los flujos son diferentes en cada corte vertical del cilindro. En el corte H- se observa que el campo de velocidades tiene un flujo dominante en la dirección inferior derecha mientras que en el corte H+ la dirección dominante es superior izquierda. El flujo en el corte H presenta un flujo similar al corte H-, aunque con velocidades de menor magnitud.

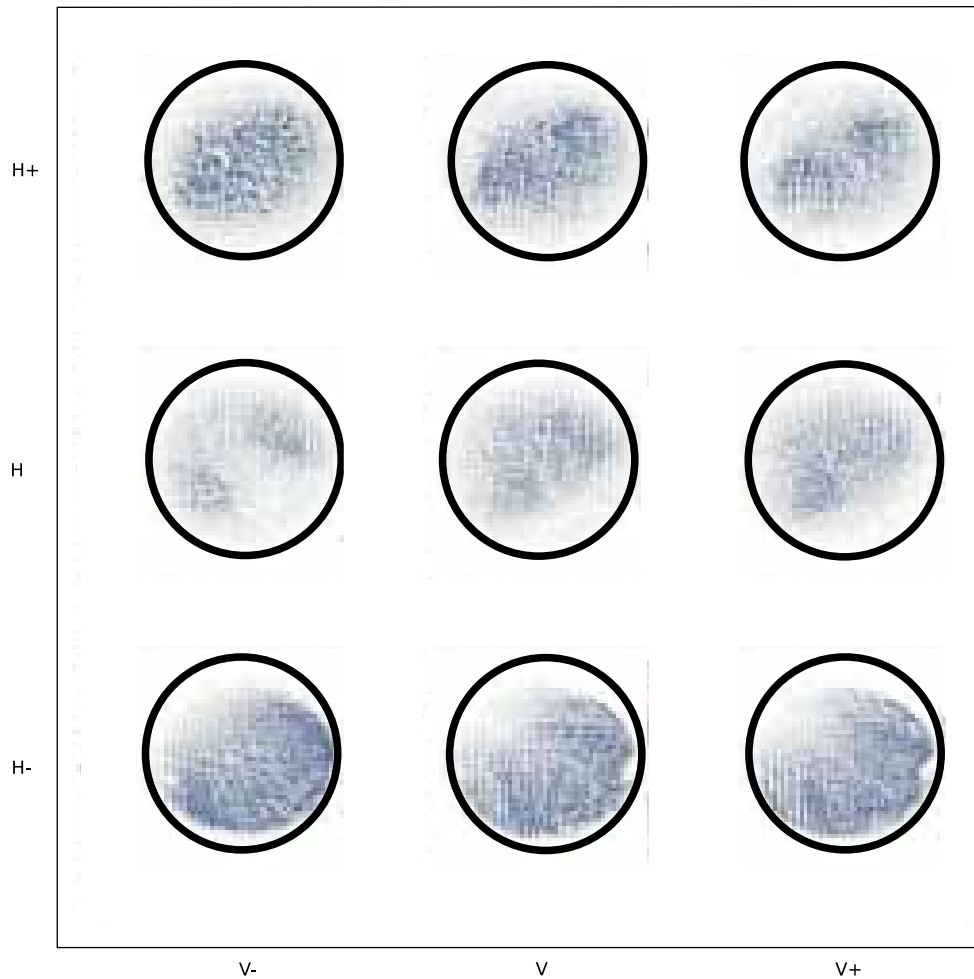


Figura 3.12: Campos vectoriales de los cortes horizontales obtenidos en las posiciones  $(-h/4, 0)$  y  $(h/4, 0)$  de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades, indicadas en la figura 2.4.

### Consistencia de la Componente Común de Velocidad

El sistema experimental es capaz de hacer la toma de un plano vertical y uno horizontal simultáneamente. Por simplificar la descripción, en esta sección usaremos un sistema de coordenadas cartesianas orientado de tal manera que su eje  $z$  coincida con el correspondiente de las coordenadas polares. El plano horizontal contiene componentes del vector velocidad  $(u, v)$  en las direcciones  $x$  y  $y$ , mientras que el plano vertical contiene las componentes  $(u, w)$  en las direcciones  $x$  y  $z$ . Ahora bien, en la línea donde se intersectan ambos planos, se obtiene la distribución de la componente  $u$  usando dos sistemas PIV totalmente independientes. Por tanto, la coincidencia de la distribución de la componente común de la velocidad constituye una prueba de consistencia de los



datos obtenidos con nuestro sistema experimental.

En la figura 3.13 se muestran las distribuciones de la componente común para las nueve intersecciones del experimento. Los resultados indican una coincidencia cualitativa entre las distribuciones en todos los casos, y cuantitativa en todos los casos excepto en (V-, H+) y (V-, H). El origen de la discrepancia en estos dos últimos casos reside principalmente en que las imágenes que se usan para el análisis PIV están fuera de foco. Esto nos indica una limitante en nuestro equipo.

Dada la coincidencia de la información obtenida con los dos sistemas PIV, se puede concluir que los campos bidimensionales son consistentes entre ellos.

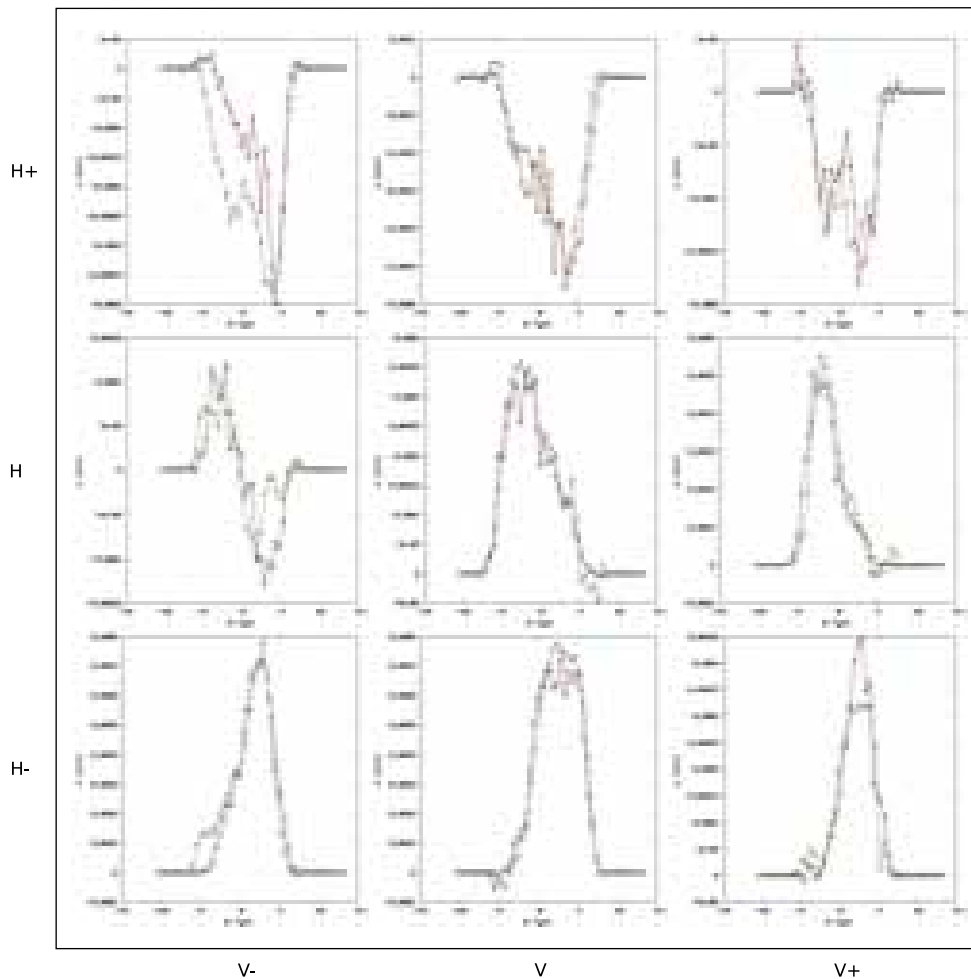


Figura 3.13: Componente de la velocidad en la dirección  $u$  en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para  $Ra = 3.36 \times 10^5$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4.

### Observaciones en los planos verticales

Debido a que algunos aspectos de la técnica que se propone en esta tesis dependen de que el tiempo característico de la adquisición de datos sea mucho menor que el tiempo característico del flujo, es indispensable contar con un criterio que permita determinar si se cumple esta condición. El tiempo característico de la adquisición de datos está determinado por el equipo experimental, mientras que el tiempo característico del flujo es una variable observada. En principio, en el ejemplo discutido en esta sección, el flujo se encuentra en estado permanente, pero observaciones experimentales revelan que hay pequeñas variaciones en el campo de velocidades como función del tiempo. En esta sección proponemos una metodología para determinar cuantitativamente la diferencia entre dos campos de velocidad bidimensional basada en la comparación de algunas de sus propiedades. Estrictamente hablando, los campos vectoriales bidimensionales presentados en la sección 3.2.1 son registrados a diferente tiempo para cada uno de los tres planos del cilindro (V, H-), (V, H) y (V, H+). La diferencia de tiempo entre cada uno de ellos es del orden tres segundos.

En la figura 3.14, se puede observar las distribuciones espaciales de las componentes vertical y horizontal de la velocidad como función de las coordenadas  $(x, z)$  del plano (V, H) en la figura 3.11. En esta figura se observa claramente la simetría que guardan las velocidades tanto en magnitud como distribución.

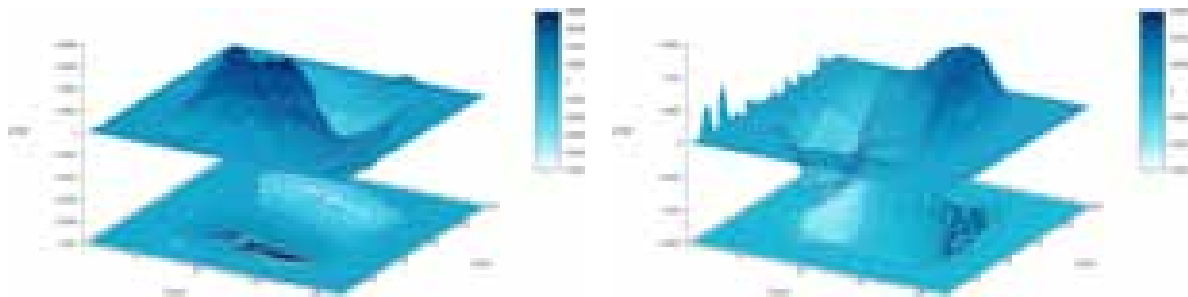


Figura 3.14: Componente horizontal (panel izquierdo) y componente vertical (panel derecho) de la velocidad como función de las coordenadas  $(x, z)$  en el plano central de la cavidad.

En la figura 3.15 se muestran los mapas de contornos para las componentes  $(u, w)$ , aquí podemos observar como los puntos de mayor velocidad de  $u$  (panel izquierdo), se concentran en zonas relativamente pequeñas ubicadas en la zona inferior y superior izquierda de la cavidad. En el caso de la componente  $w$  (panel derecho), los puntos de mayor velocidad se ubican en los costados de la cavidad manteniendo una cierta uniformidad. El comportamiento de estas velocidades visto en el mapa de contornos, da una idea de como el flujo mantiene un movimiento uniforme dentro de la cavidad.

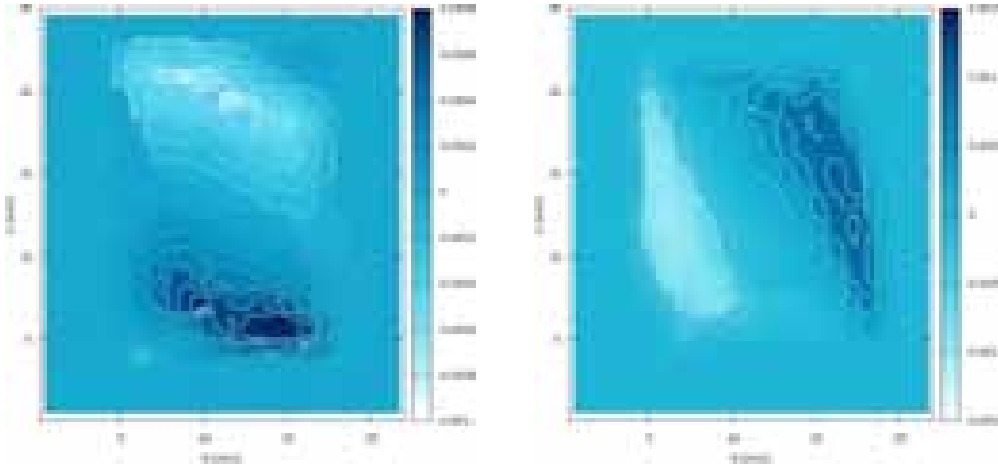


Figura 3.15: Mapa de contornos de la componente horizontal (panel izquierdo) y componente vertical (panel derecho) de la velocidad como función de las coordenadas  $(R, z)$  en el plano central de la cavidad.

En la figura 3.16 se muestra la energía cinética del campo  $(V, H)$  de la figura 3.11, aquí podemos observar que las zonas de mayor concentración de energía se encuentran en la esquina inferior izquierda y esquina superior derecha.

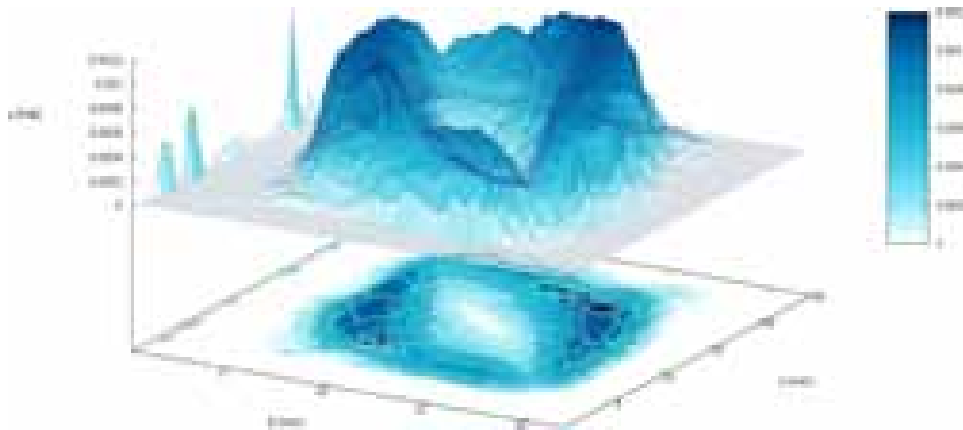


Figura 3.16: Energía cinética  $ec = \sqrt{u^2 + v^2}$  como función de las coordenadas  $(R, z)$  en el plano central de la cavidad.

Asimismo, el mapa de contornos de la distribución de la energía cinética mostrado en la figura 3.17, se puede observar que en el centro de la cavidad la energía cinética es cero. Una característica de la región de energía cinética pequeña, es que tiene una forma oval inclinada hacia su lado izquierdo.

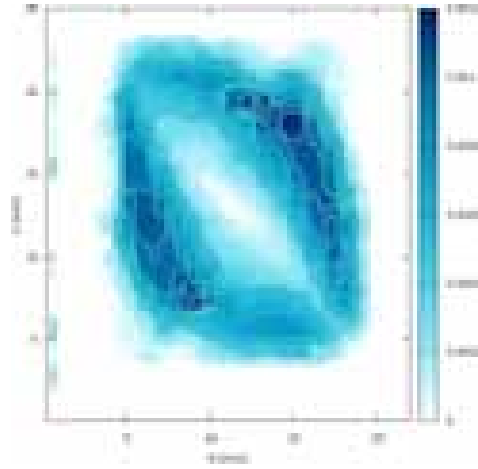


Figura 3.17: Mapa de contornos de la distribución de la energía cinética como función de las coordenadas  $(R, z)$  en el plano central de la cavidad.

Para asegurar que el flujo no cambia con el tiempo y así hacer una reconstrucción tridimensional del flujo con el método propuesto, se propone evaluar la magnitud normalizada de la diferencia entre la energía cinética obtenida para los planos  $(V, H+)$  y  $(V, H-)$ . Cuando la resta entre la energía cinética en estos dos planos se aproxima a cero, se considera que los campos son comparables. Este resultado normalizado con el promedio de la energía cinética de los campos de velocidad en sus dos imágenes  $|(\text{ec}(V, H+) + \text{ec}(V, H-))/2|$  se muestra en la figura 3.18.

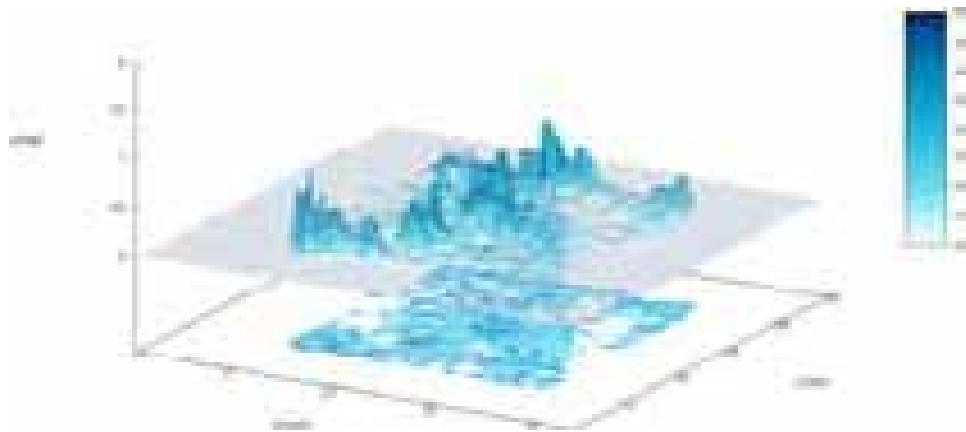


Figura 3.18: Valor absoluto de la diferencia entre la energía cinética de los planos  $(V, H+)$  y  $(V, H-)$ , normalizada por  $|(\text{ec}(V, H+) + \text{ec}(V, H-))/2|$ .

En el mapa de contornos del valor absoluto de la resta de la energía cinética mostra-

do en la figura 3.19, se puede evaluar cuantitativamente la magnitud de la diferencia entre los dos campos. Como puede observarse, la diferencia máxima es de 0.75 y la distribución es aproximadamente uniforme en toda el área con un valor promedio de 0.11. Estos resultados sugieren que en el tiempo que se realizó el experimento el flujo no cambió cualitativamente y permiten suponer que el flujo tiene un comportamiento independiente del tiempo. Estos resultados indican que es posible hacer una reconstrucción tridimensional con los datos obtenidos.

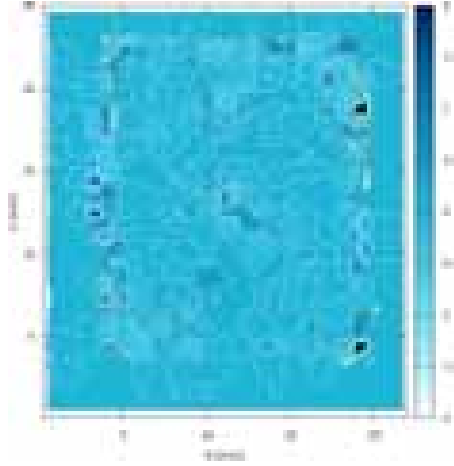


Figura 3.19: Mapa de contornos del valor absoluto de la resta de la energía cinética entre los planos (V, H+) y (V, H-), normalizada por  $|(ec(V, H+) + ec(V, H-))/2|$ .

Los resultados anteriores nos llevan a concluir, que el flujo es independiente del tiempo para los parámetros usados en este experimento y por tanto coincide con la descripción sugerida por la gráfica de Müller et al. en la figura 3.9.

### 3.2.2. Experimento 2 ( $Ra = 3.50 \times 10^5$ )

Este experimento fue realizado con un gradiente de  $2.5\text{ }^\circ\text{C}$  entre las tapas inferior y superior de la cavidad. El objetivo principal de este experimento es comprobar la repetitividad del experimento 3.2.1, por lo que se intentó usar el mismo gradiente térmico. A continuación se muestran únicamente algunas de las observaciones experimentales que incluyen la consistencia de la componente  $u$  para las nueve intersecciones. Para llevar a cabo una comparación cuantitativa se muestran distribuciones de la componente  $u$  de la velocidad en ambos experimentos.

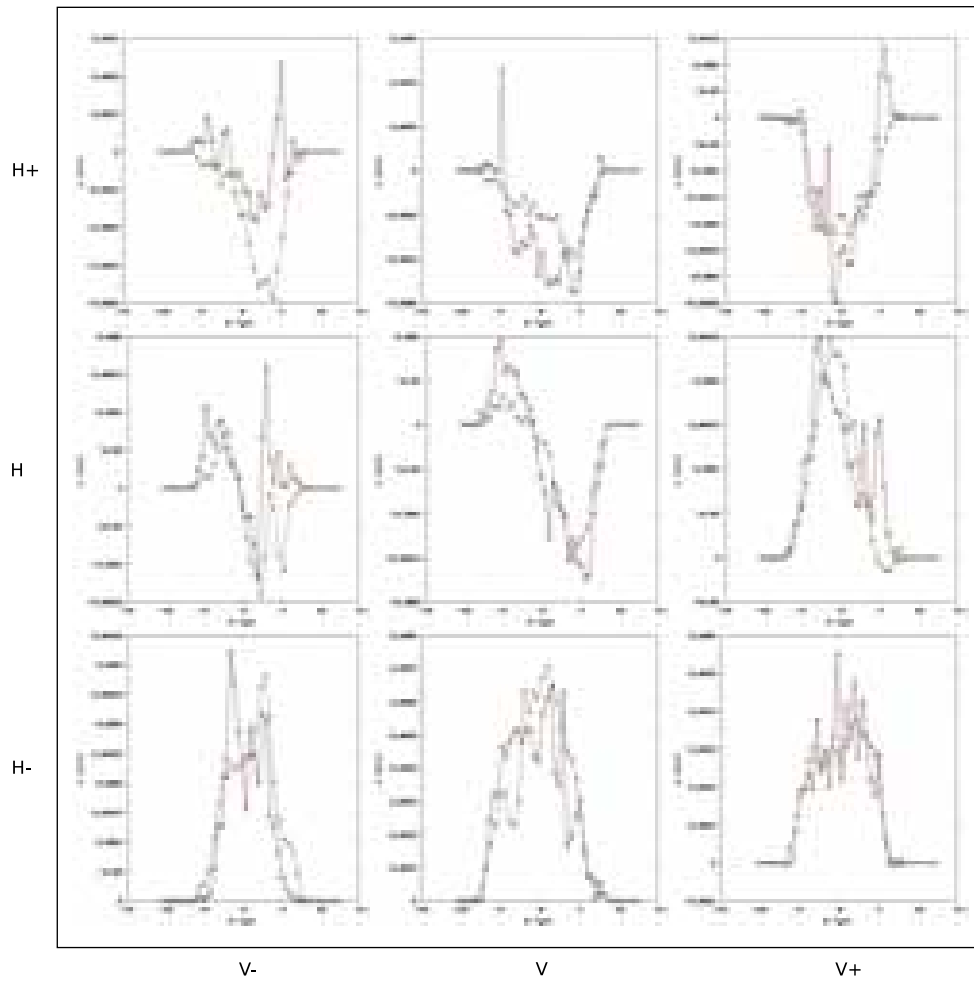


Figura 3.20: Componente de la velocidad en dirección  $u$  en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para  $Ra = 3.50 \times 10^5$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4.

En la figura 3.21 se muestra la comparación entre los experimentos 3.2.1 y 3.2.2. Para hacer esta comparación se tomó el plano central (V, H) de los planos verticales de ambos experimentos y se eligió una altura  $h/6$  para ambos planos y se graficó  $u$  como función de  $R$ . Lo que se observa en esta figura es que las magnitudes de la velocidad y su distribución coinciden en la mayoría de los puntos, a pesar de que el gradiente térmico no es estrictamente igual.

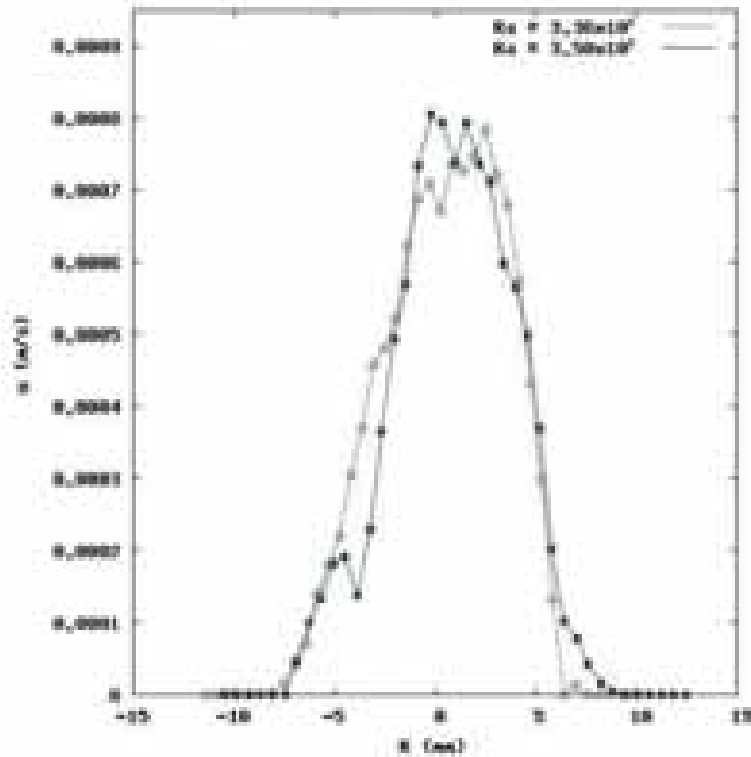


Figura 3.21: Componente de la velocidad en dirección  $u$  en la posición  $(R, 0, h/6)$ , para los experimentos con número de Rayleigh  $Ra = 3.36 \times 10^5$ , subsección 3.2.1 y  $Ra = 3.50 \times 10^5$ , subsección 3.2.2.

Con los resultados expuestos en la figura 3.21, se muestra que la repetitibilidad del experimento y nos da confianza en la manera de ejecutarlos. Los experimentos discutidos anteriormente fueron realizados en un intervalo de tiempo. Como conclusión de esta comparación tenemos que el equipo es capaz de repetir el mismo experimento aún con intervalos largos de tiempo.

### 3.2.3. Experimento 3 ( $Ra = 5.60 \times 10^5$ )

Este experimento fue realizado con un gradiente de  $4\text{ }^\circ\text{C}$  entre las tapas inferior y superior de la cavidad. Los parámetros  $A$  y  $Ra$ , ubican este experimento en la zona de estado permanente de la gráfica de Müller et al. (ver figura 3.9). Al aumentar el gradiente térmico entre las tapas es de esperarse un incremento en la velocidad del fluido en comparación con los experimentos 1 (subsección 3.2.1) y 2 (subsección 3.2.2). Sin embargo, como se observará más abajo, el patrón de flujo es similar con respecto a los experimentos anteriormente descritos.

### Temperatura dentro de la cavidad como función del tiempo

El comportamiento de la temperatura del sistema en función del tiempo se ilustra en la figura 3.22, para el experimento con un número de Rayleigh de  $Ra = 5.60 \times 10^5$ . Como podemos ver después de un periodo transitorio de aproximadamente 28 *min*, la temperatura alcanza un valor constante (con diferencias menores al error estadístico del termopar) y es en este momento en el que el experimento es realizado.

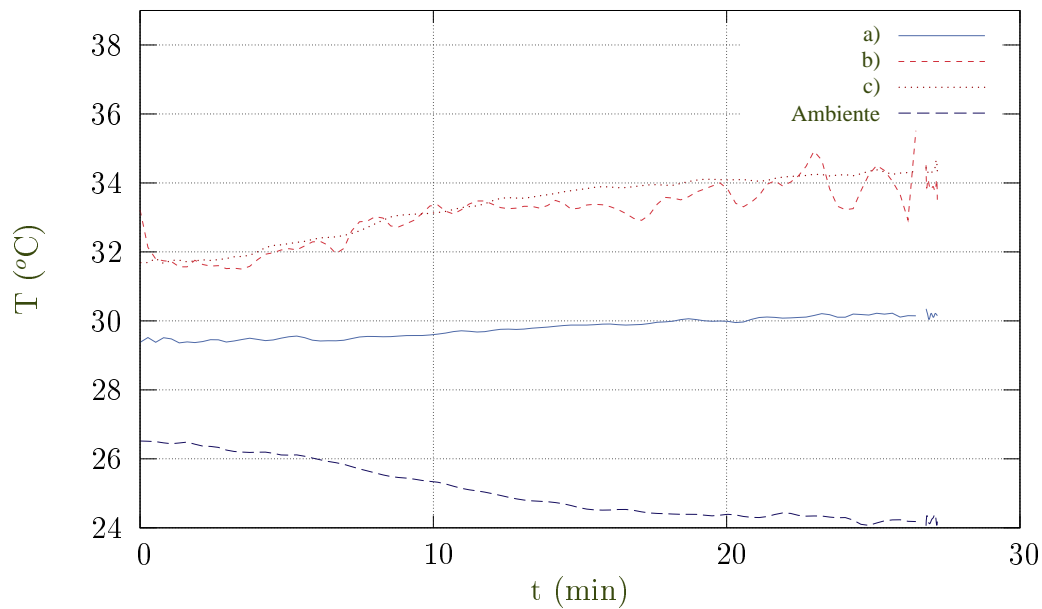


Figura 3.22: Temperatura como función del tiempo durante la ejecución del experimento. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6. El comportamiento irregular en la traza del termopar b) se debe a un problema electrónico en la tarjeta de adquisición de datos.

Al igual que en el experimento 3.2.1, se tomaron mediciones de la temperatura antes de realizar el experimento y justo después de haber terminado, estos datos son reportados en la figura 3.22. Dado que los valores de la temperatura coinciden antes y después del experimento se tiene la confianza de que el experimento fue efectuado en condiciones de temperatura constante en las tapas inferior y superior de la cavidad.



### Campos de Velocidad en Planos Verticales y Horizontales

Se obtuvieron nueve campos con cortes verticales, tres por cada estación en los cortes  $D/4$ ,  $0$  y  $-D/4$ , donde  $D$  es el diámetro del cilindro. El flujo que se observa en los campos vectoriales, para el corte vertical mostrados en 3.23, son muy similares a los del experimento 3.2.1, con la diferencia de que la magnitud de sus velocidades es mayor. Si ubicamos la estructura mostrada en este experimento en la zona reportada por Müller et al., observamos que esta coincide con el patrón de flujo esperado. Esto quiere decir que el flujo permanece en la zona de estado permanente, por lo que el patrón tridimensional del flujo en este experimento puede ser reconstruido con el método propuesto en esta tesis.

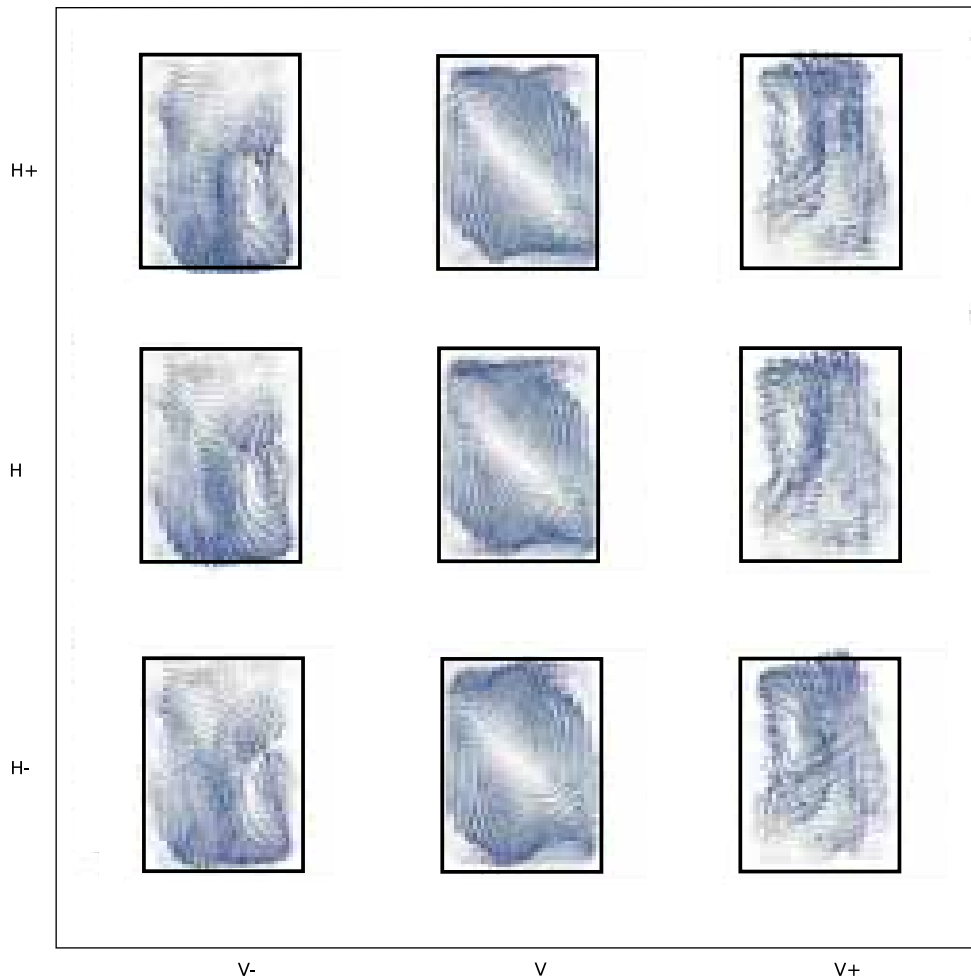


Figura 3.23: Campos vectoriales de los cortes verticales obtenidos en las posiciones ( $-D/4$ ,  $0$  y  $D/4$ ) de la cavidad. Las etiquetas  $V-$ ,  $V$ ,  $V+$ ,  $H-$ ,  $H$  y  $H+$  se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades indicadas en la figura 2.4.

Para los cortes horizontales se obtuvieron nueve campos, que representan tres por cada estación en los cortes  $-h/4$ ,  $0$  y  $h/4$  de la cavidad, donde  $h$  es la altura total. Los campos vectoriales observados en estos cortes son similares a los observados en el experimento 3.2.1. Con la ayuda de estos planos se observa nítidamente la dirección que tiene la celda principal del flujo. Véanse los planos situados en  $(V, H+)$ ,  $(V, H)$  y  $(V, H-)$  de la figura 3.24. En los planos superior e inferior  $((V, H+)$  y  $(V, H-))$  se identifican campos de velocidades con direcciones diagonales y en sentidos antiparalelos, indicando la dirección de la celda convectiva principal. En el plano central  $(V, H)$ , se puede observar la presencia de un punto silla en el que el flujo diagonal que va de la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha, converge hacia el centro geométrico del plano limitado por el círculo; el flujo diagonal que va de la esquina superior izquierda a la esquina inferior derecha diverge del punto central.

Debido a la calidad de esta observación experimental, este caso fue escogido para llevar a cabo la reconstrucción tridimensional de la sección 3.3.

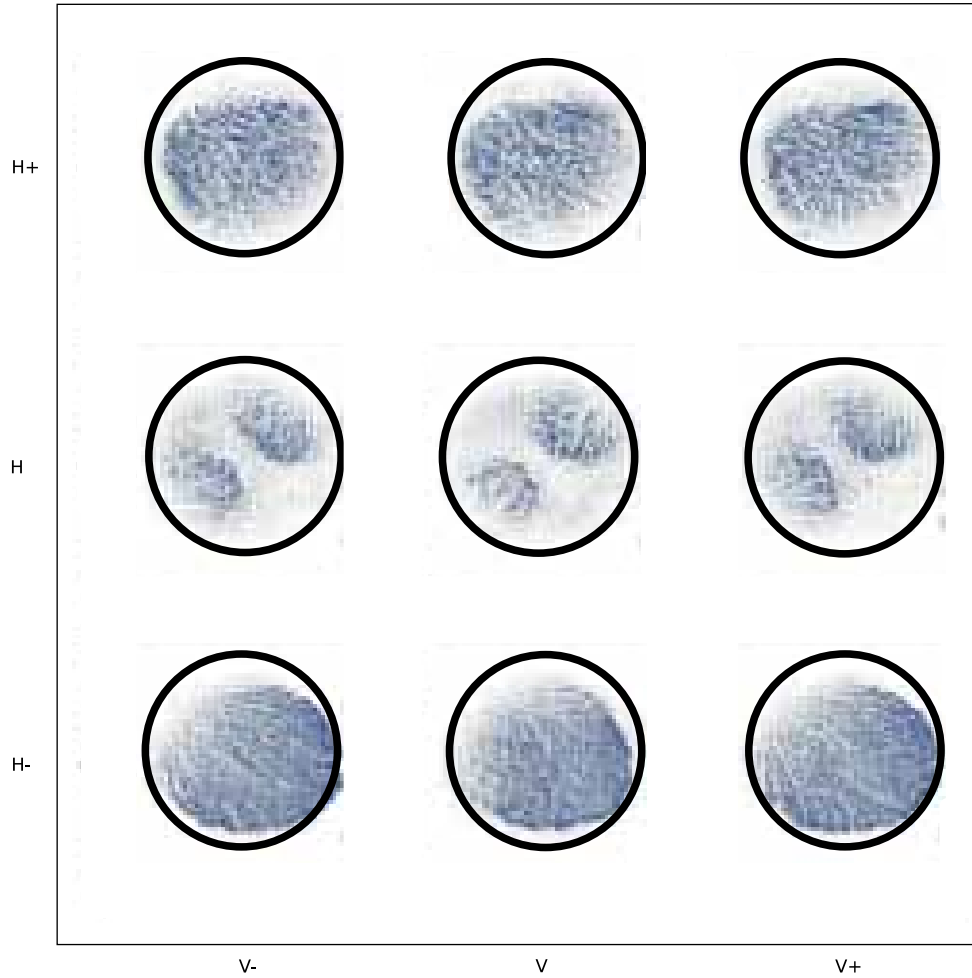


Figura 3.24: Campos vectoriales de los cortes horizontales ( $-h/4$ ,  $0$  y  $h/4$ ) de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades indicadas en la figura 2.4.

### Consistencia de la Componente Común de Velocidad

A continuación se muestra en la figura 3.25, la distribución de la componente común para las nueve intersecciones del experimento con número de Rayleigh  $Ra = 5.60 \times 10^5$ . La comparación de las componentes en las diferentes intersecciones fue satisfactoria ya que las nueve intersecciones muestran una consistencia entre sí. Cabe mencionar que en los datos expuestos en este estudio no se realizó ningún suavizamiento, eliminación o alguna otra modificación a los datos.

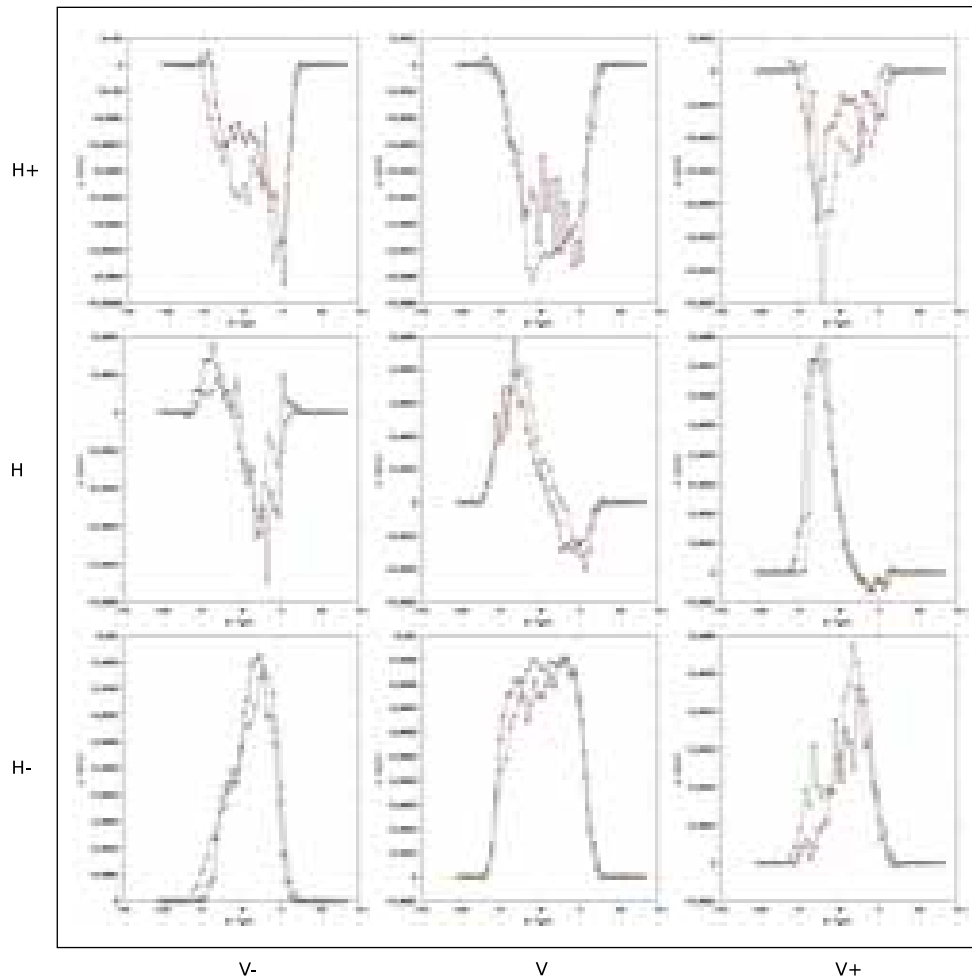


Figura 3.25: Componente de la velocidad en la dirección  $u$  en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para  $Ra = 5.60 \times 10^5$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4.

### 3.2.4. Experimento 4 ( $Ra = 1.59 \times 10^6$ )

Este experimento fue realizado con un gradiente de  $11.4 \text{ }^\circ\text{C}$  entre las tapas inferior y superior de la cavidad. Los parámetros  $A$  y  $Ra$ , ubican este experimento en una posición cercana pero por encima del Rayleigh crítico de la gráfica de Müller et al. mostrado en la figura 3.9, en donde el flujo cambia de estado permanente a un estado dependiente del tiempo. En este experimento se observa que el patrón del flujo cambia ligeramente en tiempos cortos (menores a 21 segundos). Por esta razón nuestro sistema no es capaz de registrar el mismo flujo en todas las tomas.

### Temperatura dentro de la cavidad como función del tiempo

El comportamiento de la temperatura del sistema en función del tiempo se ilustra en la figura 3.26, esta información mostrada es para el caso en el que el número de Rayleigh es de  $Ra = 1.59 \times 10^6$ . En esta gráfica de la temperatura como función del tiempo, observamos que hay una diferencia de temperaturas (del orden de  $2^\circ C$ ) entre el termopar situado en la posición b) y el termopar en la posición c) de la figura 2.6. Esta diferencia se debe principalmente al calor transportado de manera más eficiente a causa de que la velocidad del fluido es mayor que en los experimentos descritos anteriormente. También se observa que las trazas tienen una pequeña oscilación con una amplitud del orden de  $0.4^\circ C$  y una frecuencia aproximada de  $5 \text{ min}$ . Esto se debe probablemente a cambios en el patrón de movimiento.

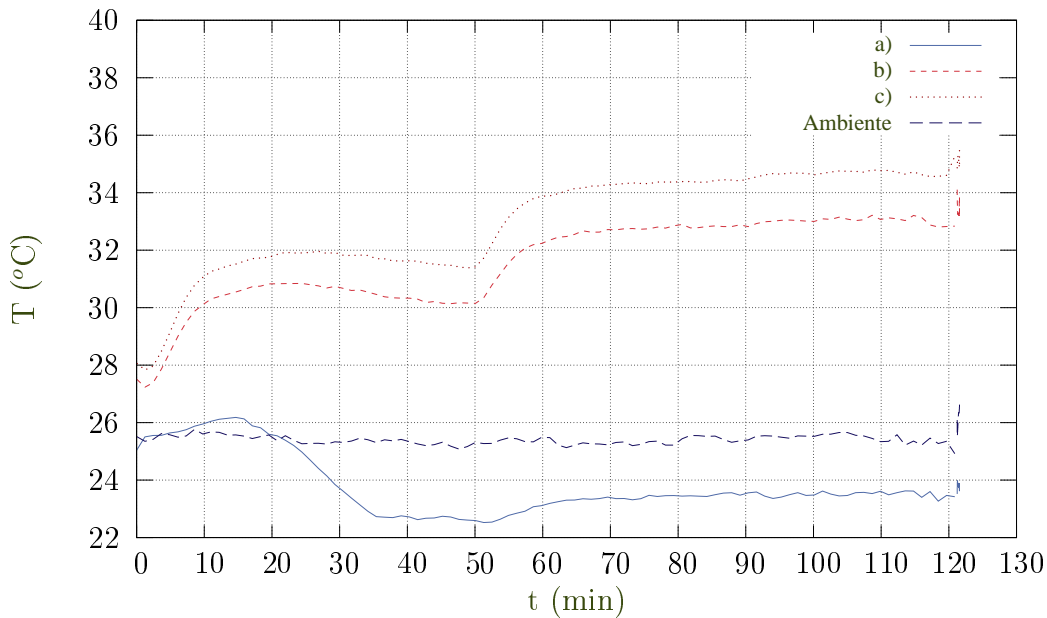


Figura 3.26: Temperatura como función del tiempo durante la ejecución del experimento. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6.

### Campos de Velocidad en Planos Verticales y Horizontales

Se obtuvieron nueve campos con cortes verticales, tres por cada estación en los cortes  $D/4$ ,  $0$  y  $-D/4$ , donde  $D$  es el diámetro del cilindro. El flujo que se observa en los campos vectoriales, para el corte vertical mostrados en 3.27 son diferentes a los observados en los experimentos anteriores. Aquí podemos ver como el flujo cambia su patrón entre planos tomados en el mismo experimento. Por ejemplo, si tomamos los planos (V, H) y (V, H-) de la figura 3.27 podemos observar como el flujo cambia su estructura. Esto es un indicador que el flujo cambia en periodos menores a tres segundos. En la gráfica de Müller et al. figura 1.1, este experimento se encuentra en la zona donde el flujo es dependiente del tiempo, y esto es precisamente lo que el experimento muestra.

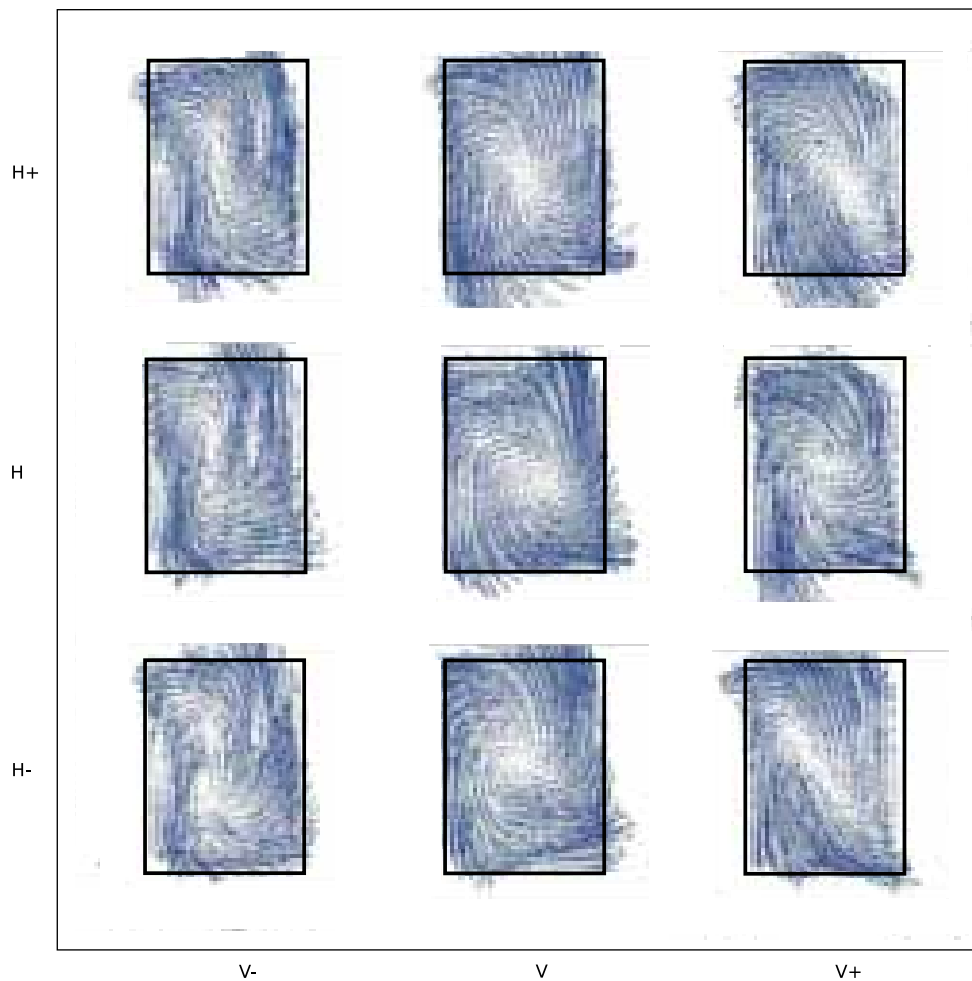


Figura 3.27: Campos vectoriales de los cortes verticales obtenidos en las posiciones ( $-D/4$ ,  $0$  y  $D/4$ ) de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades indicadas en la figura 2.4.

Para los cortes horizontales se obtuvieron nueve campos, que presentan tres por cada estación en los cortes  $-h/4$ ,  $0$  y  $h/4$  de la cavidad, donde  $h$  es la altura total. Aquí observamos que los campos tomados en un mismo corte no coinciden y este comportamiento es consistente con lo observado en los campos de velocidad de los cortes verticales. Esto confirma que el flujo es dependiente del tiempo y corrobora lo reportado por Müller et al.

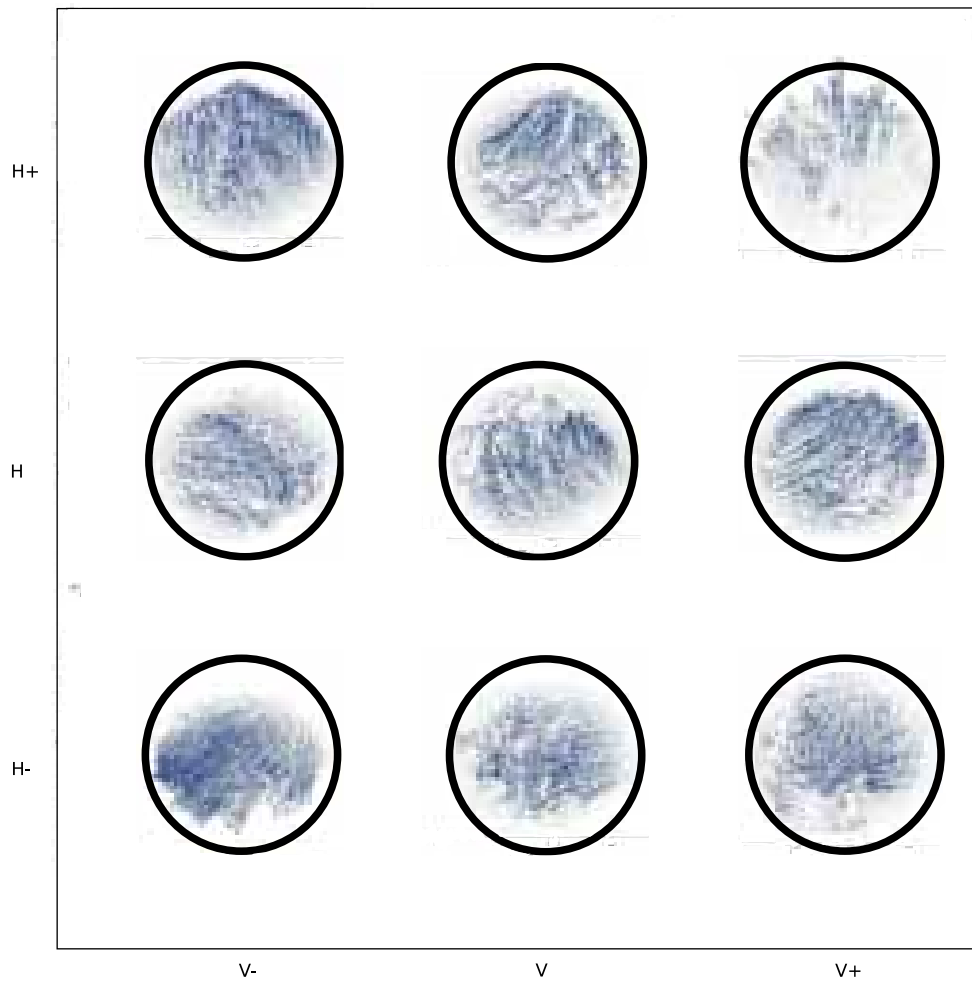


Figura 3.28: Campos vectoriales de los cortes horizontales ( $-h/4$ ,  $0$  y  $h/4$ ) de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones en las que se encontraban los planos de luz en el momento de obtener los campos de velocidades indicadas en la figura 2.4.

### Consistencia de la Componente Común de Velocidad

En la figura 3.29 se muestra la distribución de la componente común para las nueve intersecciones del experimento con número de Rayleigh  $Ra = 1.59 \times 10^6$ . En este experimento se intentó tener acceso a una zona de Rayleigh crítico propuesta por Müller et al., y con esto observar como el flujo cambia a un estado dependiente del tiempo. Los resultados de la consistencia de las componente común para este experimento, no fueron tan precisos como las reportados en los experimentos anteriores, pero aún así se observa que en algunos casos los campos obtenidos simultáneamente registran una consistencia satisfactoria en la componente común de la velocidad. En particular, obsérvese la coincidencia de las velocidades en los campos (V-, H+), (V, H+) y (V, H).

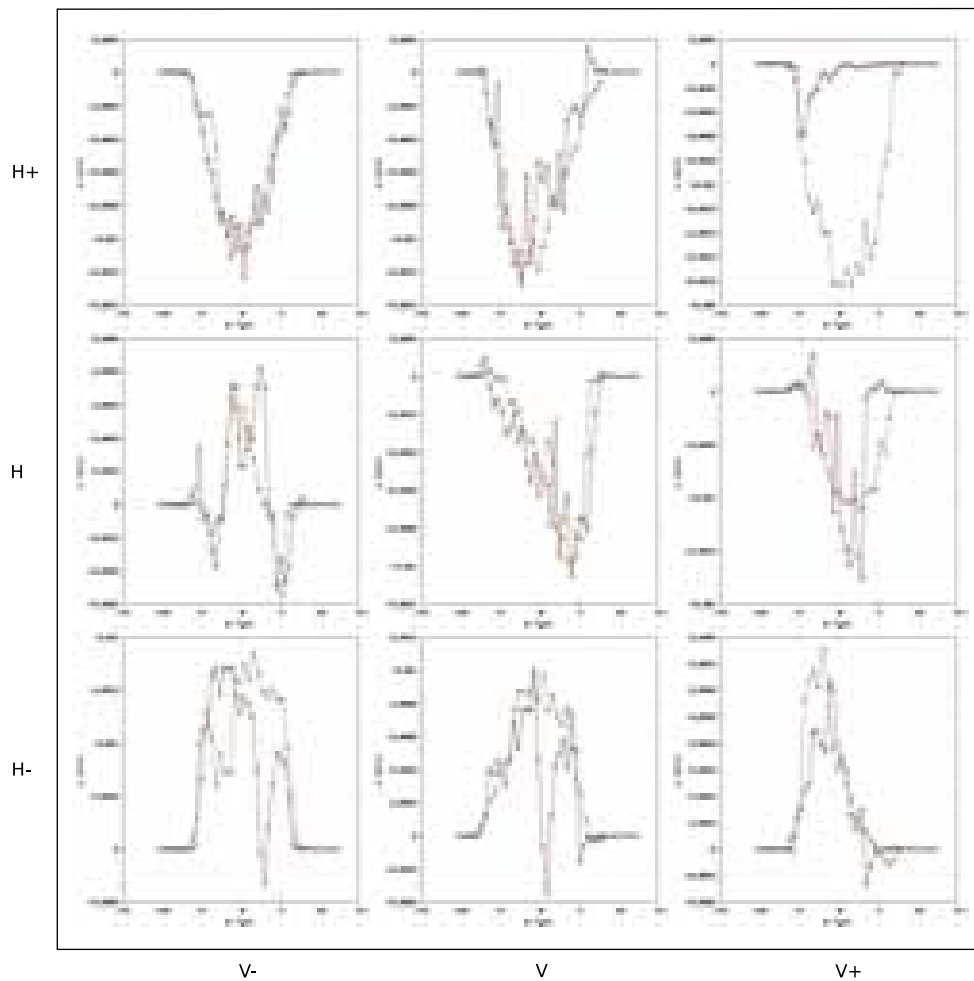


Figura 3.29: Componente de la velocidad en la dirección  $u$  en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para  $Ra = 1.4 \times 10^6$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4.



### Observaciones en los planos verticales

En la figura 3.30 se observa la velocidad vertical (panel derecho) y horizontal (panel izquierdo) como función de las coordenadas  $(R, z)$ , del plano  $(V, H)$  de la figura 3.27. En este experimento se observa que la magnitud de las velocidades es tres veces mayor que las reportadas en el experimento 3.2.1, pero aún así presentan una distribución simétrica respecto al eje central.

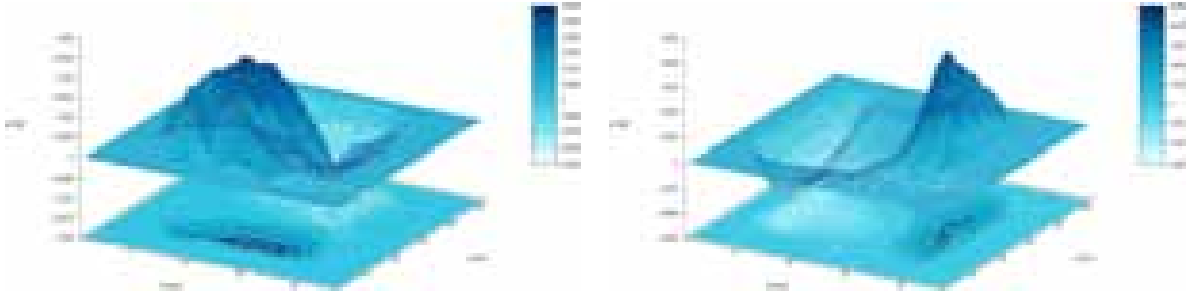


Figura 3.30: Componente horizontal (panel izquierdo) y componente vertical (panel derecho) de la velocidad como función de las coordenadas  $(R, z)$  en el plano central de la cavidad.

En la figura 3.31 se muestran los mapas de contornos para las componentes  $(u, w)$ . Aquí podemos observar como los valores extremos de ambas componentes de la velocidad se han desplazado hacia las paredes de la cavidad. Podemos notar que la estructura del flujo no se aleja mayormente del comportamiento observado en el experimento 3.2.3.

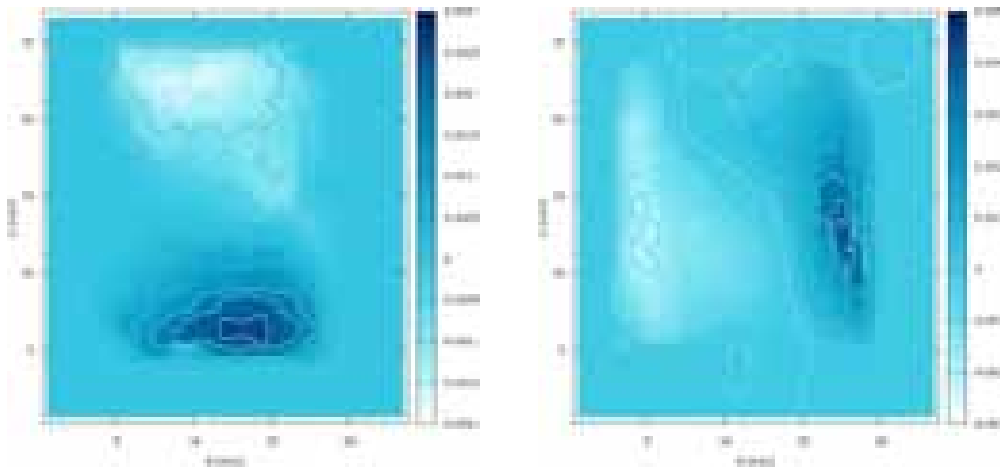


Figura 3.31: Mapa de contornos de la componente horizontal (panel izquierdo) y componente vertical (panel derecho) de la velocidad como función de las coordenadas  $(R, z)$  en el plano central de la cavidad.

En la figura 3.32 se observa la energía cinética del campo  $(V, H)$  de la figura 3.27. Se puede ver que el patrón de flujo ya no tiene una forma simétrica, aunque es probable que esto ocurra únicamente en este instante de observación. También se observa como la zona central de velocidad cero es más pequeña que el observado en los experimentos anteriores.

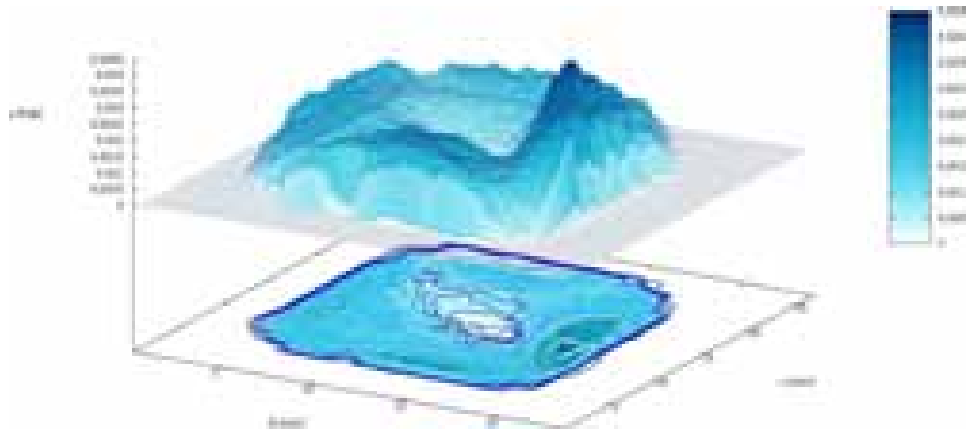


Figura 3.32: Energía cinética  $ec = \sqrt{u^2 + v^2}$  como función de las coordenadas  $(R, z)$  en el plano central de la cavidad.

En la figura 3.33 se muestra el mapa de contornos de la energía cinética, donde se observa claramente que el flujo con mayor velocidad se concentra en una zona cercana a la pared derecha de la cavidad.

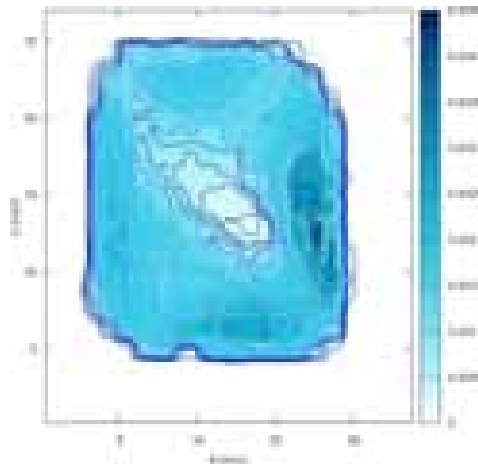


Figura 3.33: Mapa de contornos de la distribución de la energía cinética como función de las coordenadas  $(R, z)$  en el plano central de la cavidad.

En la figura 3.34 (panel derecho) se muestra la diferencia del valor absoluto de la energía cinética entre dos campos vectoriales normalizada con  $|(\text{ec}(\text{V}, \text{H}+) + \text{ec}(\text{V}, \text{H}-))/2|$ . Para este caso el promedio de la diferencia es cuatro veces mayor al obtenido en el caso del experimento uno descrito en la sección 3.2.1.

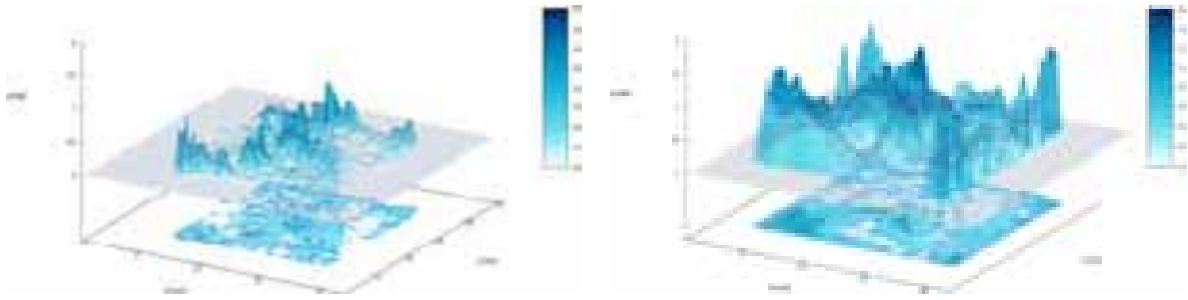


Figura 3.34: Valor absoluto de la resta de la energía cinética entre los planos (V, H+) y (V, H-), normalizada por  $|(\text{ec}(\text{V}, \text{H}+) + \text{ec}(\text{V}, \text{H}-))/2|$ . Para los experimentos 1 (panel izquierdo) y 4 (panel derecho).

En la figura 3.35, se observa que la resta mantiene un comportamiento no uniforme, comparado con el observado en el experimento 3.2.1.

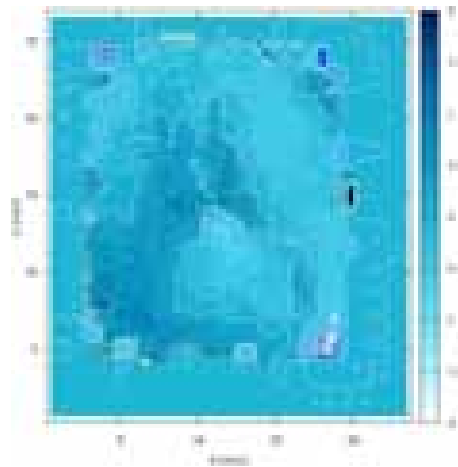


Figura 3.35: Mapa de contornos del valor absoluto de la resta de la energía cinética entre los planos (V,H+) y (V,H-) normalizada por  $|(\text{ec}(\text{V}, \text{H}+) + \text{ec}(\text{V}, \text{H}-))/2|$ .

### 3.2.5. Experimento 5 ( $Ra = 2.18 \times 10^6$ )

Este experimento fue con un gradiente de  $15.6\text{ }^\circ\text{C}$  entre las tapas inferior y superior de la cavidad. Estas condiciones corresponden a un número de Rayleigh de  $Ra = 2.18 \times 10^6$ . Los parámetros  $A$  y  $Ra$ , ubican a este experimento francamente dentro de la región de comportamiento dependiente del tiempo de la gráfica de Müller et al..

#### Temperatura dentro de la cavidad como función del tiempo

El comportamiento de la temperatura del sistema en función del tiempo se ilustra en la figura 3.36. Se observa que las trazas tienen una oscilación claramente identificable, con una amplitud de  $0.6\text{ }^\circ\text{C}$  y una frecuencia aproximada de  $5\text{ min}$ . Como en el caso del experimento 4, esto se debe probablemente a cambios en el patrón de movimiento.

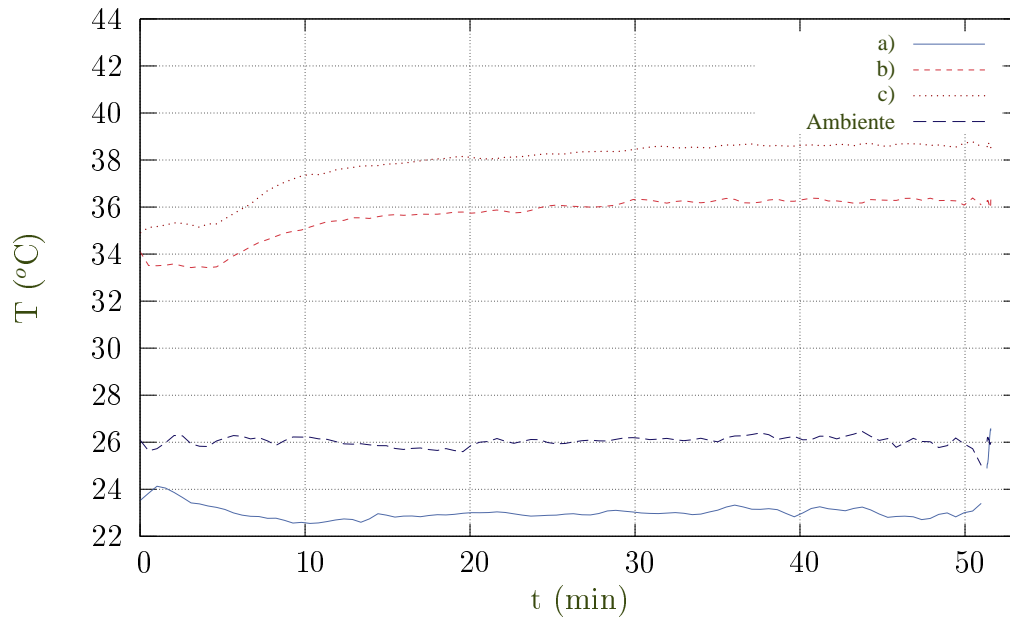


Figura 3.36: Temperatura como función del tiempo durante la ejecución del experimento. Se reporta la historia de la temperatura para los termopares colocados en la cavidad y el intercambiador de calor inferior. Las etiquetas en las curvas, corresponden a la posición en la que se encuentran los termopares mostrados en la figura 2.6.

### Campos de Velocidad en Planos Verticales y Horizontales

Se obtuvieron nueve campos con cortes verticales, tres por cada estación en los cortes  $D/4$ ,  $0$  y  $-D/4$ , donde  $D$  es el diámetro del cilindro. En esta parte pudimos ver como el comportamiento del flujo se vuelve completamente dependiente del tiempo, ya que ninguno de los campos observados son iguales entre sí. Una diferencia notable con respecto a los campos de velocidad equivalentes en los experimentos anteriores consiste en que ahora se distinguen con toda claridad, al menos dos puntos críticos en cada uno de los paneles de la figura 3.37. Esto indica un cambio cualitativo en el patrón de flujo respecto de las observaciones anteriores.

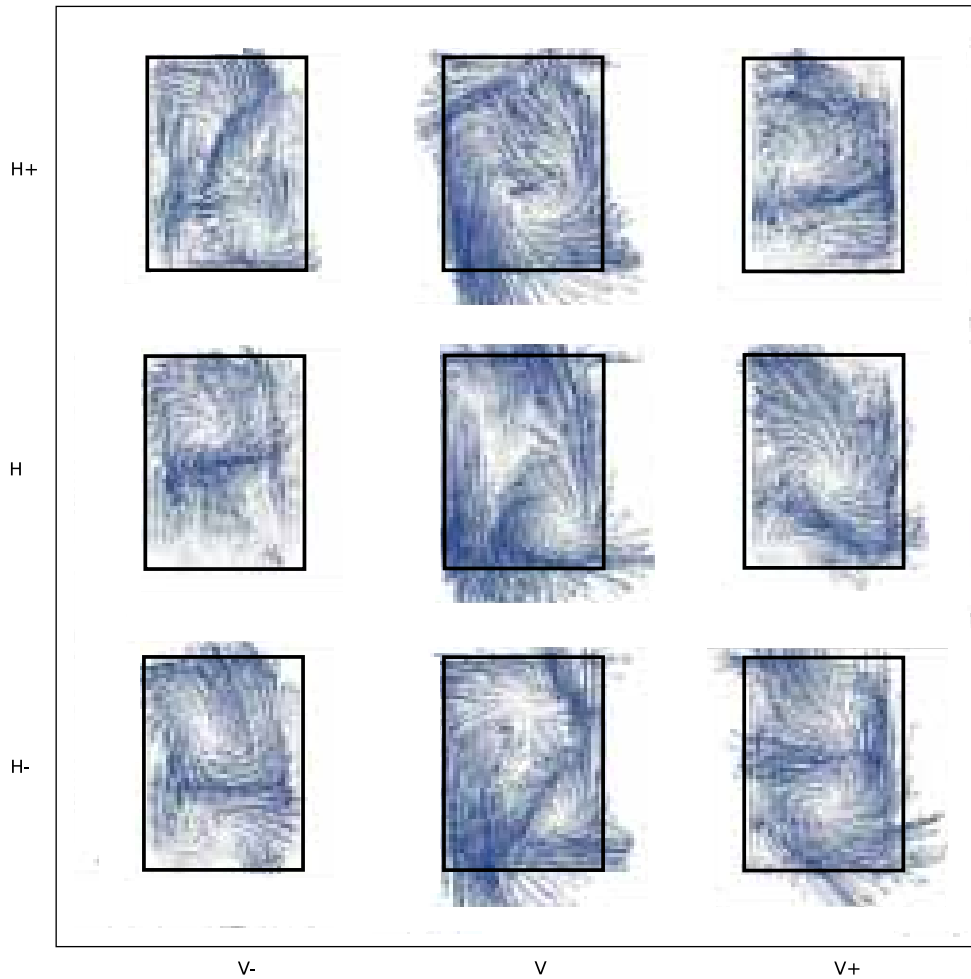


Figura 3.37: Campos vectoriales de los cortes verticales obtenidos en las posiciones ( $-D/4$ ,  $0$  y  $D/4$ ) de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4.

Para los cortes horizontales se obtuvieron nueve campos, que presentan tres por cada estación en los cortes  $-h/4$ ,  $0$  y  $h/4$ , donde  $h$  es la altura total. Aquí observamos que flujo es fuertemente dependiente del tiempo, de manera similar a lo observado para los campos verticales. En este caso no es posible aplicar la técnica de reconstrucción tridimensional propuesta en los capítulos anteriores.

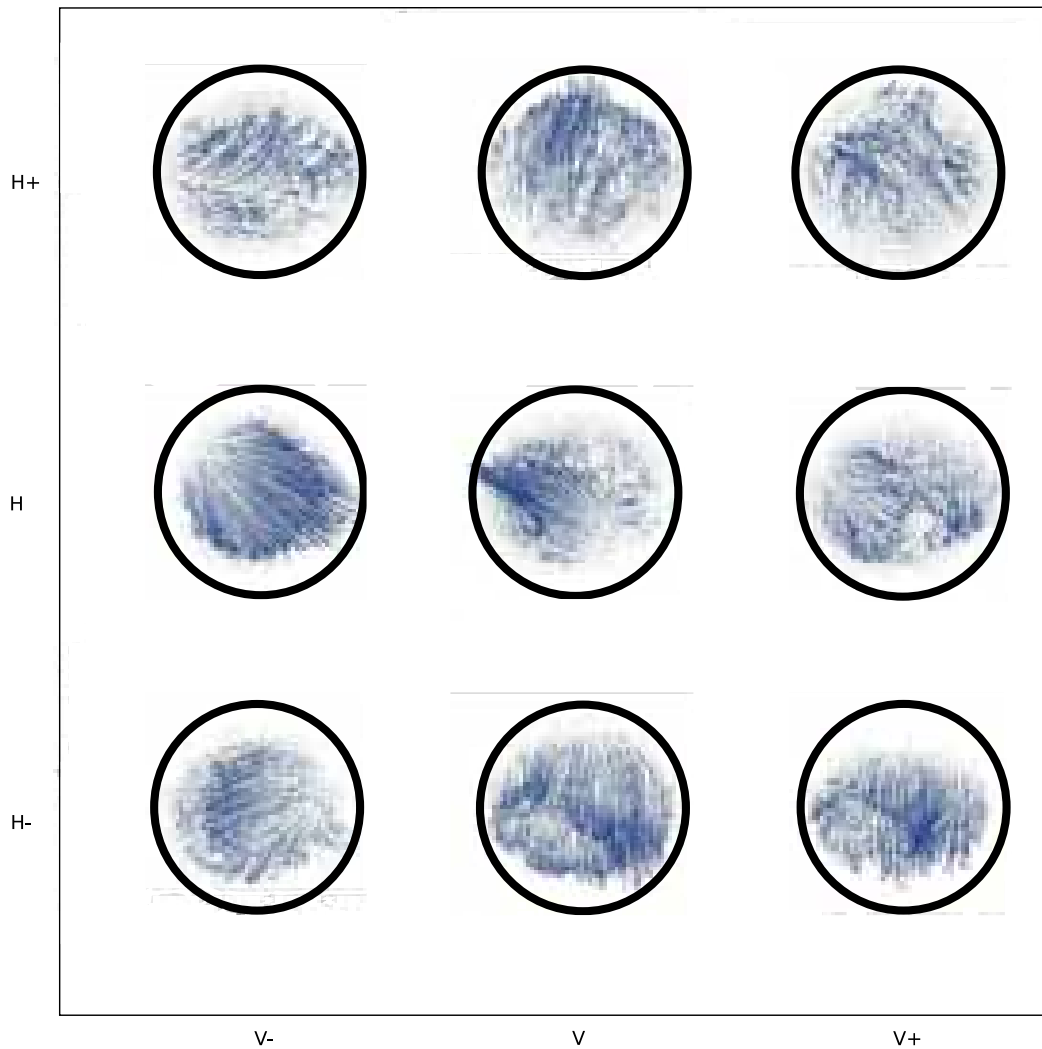


Figura 3.38: Campos vectoriales de los cortes horizontales ( $-h/4$ ,  $0$  y  $h/4$ ) de la cavidad. Las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4.

### Consistencia de la Componente Común de Velocidad

En la figura 3.39 se muestra la distribución de la componente común para las nueve intersecciones del experimento con número de Rayleigh  $Ra = 2.18 \times 10^6$ . En este experi-

mento se tuvo acceso a la zona de flujo inestable reportada por Müller et al. Aún cuando el flujo se comporto de manera inestable la consistencia de las componentes entre los planos fue para la mayoría de los casos aceptable. Pero al igual que en el experimento 3.2.4, este experimento no es candidato para hacer una reconstrucción tridimensional del flujo.

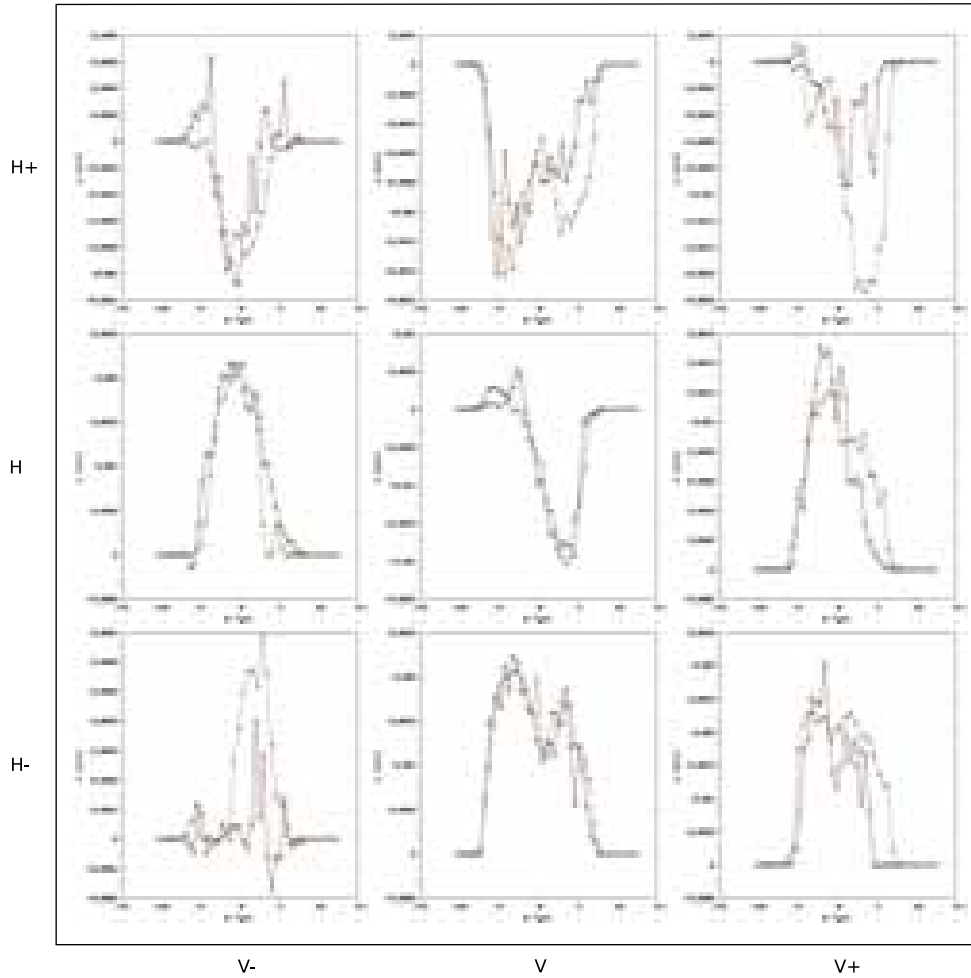


Figura 3.39: Componente de la velocidad en la dirección  $u$  en las posiciones de las intersecciones de los planos verticales y horizontales para  $Ra = 2.18 \times 10^6$ . Las posiciones de cada uno de los planos están indicadas en los ejes, y las etiquetas V-, V, V+, H-, H y H+ se refieren a las posiciones indicadas en la figura 2.4.

### 3.2.6. Estimación de la Velocidad Máxima en Función del Número de Rayleigh

En el caso en el que las paredes de la cavidad no tienen influencia alguna sobre la dinámica del flujo, se puede hacer una estimación de la velocidad característica que tendría el movimiento. Esto se hace, igualando la fuerza de inercia con la fuerza de flotación, esto es:

$$w \frac{\partial w}{\partial z} \sim g\beta\Delta T_0 \quad (3.1)$$

considerando que la escala característica para la distancia es  $z \sim h$ , se puede escribir la expresión anterior, como:

$$w^2 \sim g\beta\Delta T_0 h \quad (3.2)$$

Tomando como velocidad característica a la velocidad difusiva;  $w^* = \frac{w}{\sqrt{\frac{\alpha\nu}{h^2}}}$  obtenemos

$$w^* = \frac{wh}{\sqrt{\alpha\nu}} = Ra^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

El número de Rayleigh fue definido en la sección 1.1. De acuerdo a esta expresión, las velocidades características en ausencia de fricción por las paredes está en el rango de 579 a 1477.

En las observaciones experimentales podemos obtener las velocidades directamente de las mediciones PIV, el resultado expresado adimensionalmente de acuerdo a la definición de la ecuación 3.3 está mostrado en la figura 3.40. Como puede observarse la influencia de las paredes cercanas tiene como consecuencia que la velocidad se reduzca en un factor de aproximadamente 10. Además, la dependencia de la velocidad con el número de Rayleigh de acuerdo a los resultados experimentales, es lineal y no como potencia 1/2, como lo indica la ecuación (3.3).



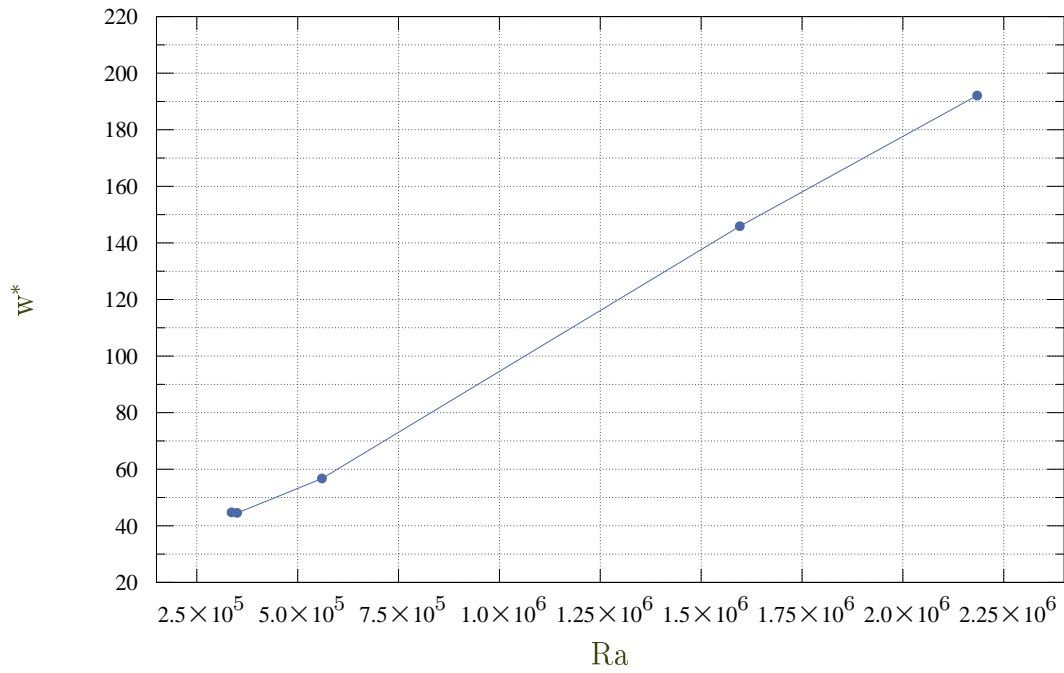


Figura 3.40: Velocidad en función del número de Rayleigh para los experimentos presentados en esta tesis  $w^* = \frac{w}{\sqrt{\frac{\alpha V}{h^2}}}$ .

### 3.3. Reconstrucción Tridimensional

Los resultados obtenidos en los experimentos descritos anteriormente se usarán para proponer una distribución tridimensional del campo de velocidades en el caso con número de Rayleigh igual a  $Ra = 5.60 \times 10^5$ . Recordemos que sólo se cuenta con las tres componentes del campo tridimensional de velocidades en las nueve líneas de intersección de los campos bidimensionales. Aunque es claro que esta información no es suficiente para hacer una reconstrucción detallada, se pueden identificar propiedades geométricas relevantes y se puede obtener una idea cualitativa del movimiento global dentro de la celda.

Para visualizar como se comporta el flujo de manera tridimensional, uno de los primeros pasos fue graficar los nueve planos bidimensionales en una sola figura, conservando la posición que tienen en el interior de la celda, como se muestra en la figura 3.41. Aunque toda la información está vertida en la misma figura, es obvio que la estructura tridimensional es difícil de visualizar.

El siguiente paso fue graficar en una figura, la vista isométrica de dos planos y el campo de velocidad tridimensional en su intersección, esto se muestra en la figura 3.42. Los vectores que parten de la línea de intersección fueron escalados para enfatizar su tridimensionalidad. Cuando el punto de vista es ortogonal a los planos, los campos de velocidad tridimensional se proyectan de manera indistinguible sobre los campos bidimensionales. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 3.43. Nótese que en el plano horizontal (panel izquierdo) los dos campos denotados con vectores rojos y azules se sobreponen correctamente, pero en el plano vertical (panel derecho) hay una pequeña discrepancia debido a que la posición en cada uno de los planos donde se cuenta con información, no coincide con precisión.

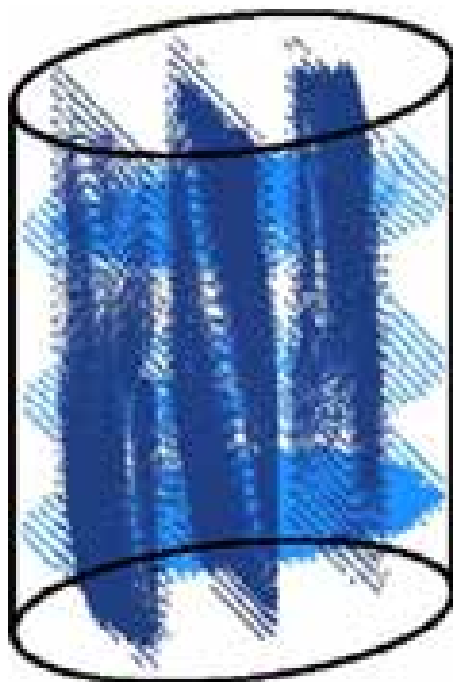


Figura 3.41: Planos bidimensionales registrados por los dos sistemas PIV y graficados en el espacio tridimensional que les corresponde en una vista isométrica.

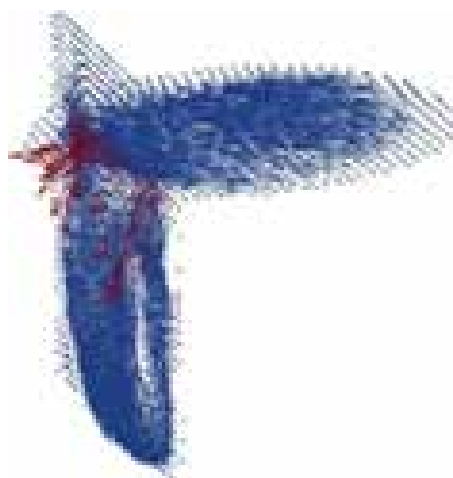


Figura 3.42: Intersección de los planos bidimensionales (V-, H+) del experimento 3.2.3, junto con la línea de vectores tridimensionales construidos apartir de estos planos.

En estas figuras mostramos en color rojo los vectores tridimensionales ya reconstruidos.

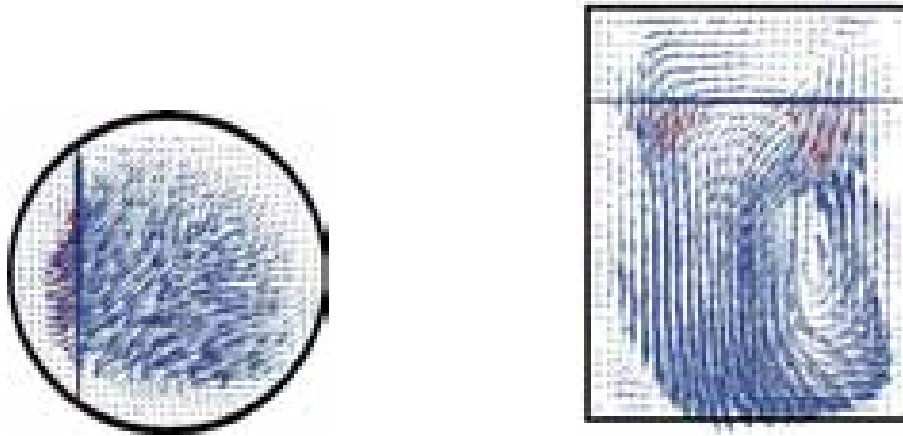


Figura 3.43: Plano horizontal (panel izquierdo) del campo de velocidades mostrando la intersección de los dos planos situados en  $V^-$  y en  $H^+$  de la figura 3.24. Plano vertical (panel derecho) del campo de velocidades mostrando la intersección de los dos planos situados en  $V^-$  y en  $H^+$  de la figura 3.23. Los datos fueron obtenidos para  $Ra = 5.60 \times 10^5$  (experimento 3.2.3). Las flechas rojas indican la proyección del campo tridimensional.

Podemos decir que la reconstrucción coincide con ambos planos lo que nos da seguridad que en las intersecciones los vectores tridimensionales siguen el movimiento del fluido.

Se realizó esta misma visualización para la intersección de los planos en  $(V, H^+)$  y se muestra en las siguientes figuras.

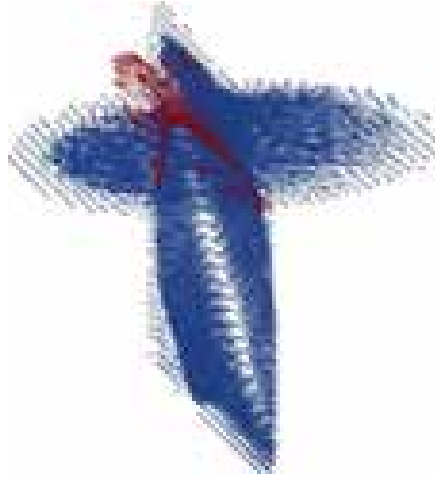


Figura 3.44: Intersección de los planos bidimensionales (V, H+) del experimento 3.2.3, junto con la línea de vectores tridimensionales construidos apartir de estos planos.

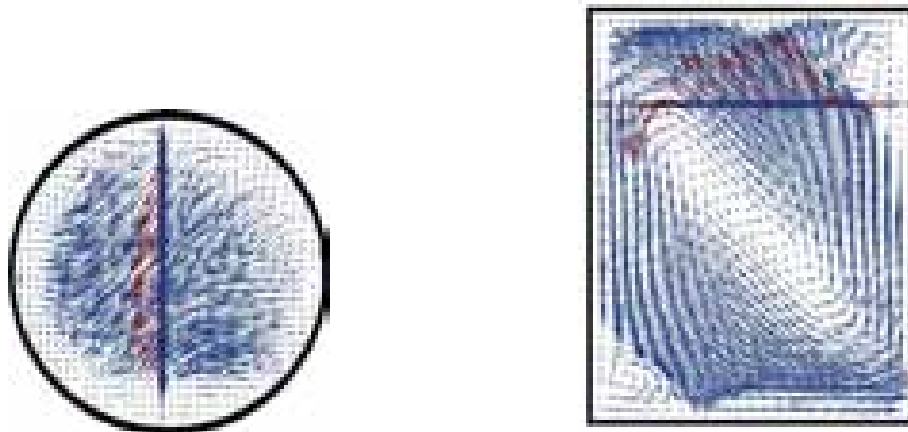


Figura 3.45: Vista horizontal (panel izquierdo) del campo de velocidades mostrando la intersección de los dos planos situados en V y en H+ de la figura 3.24. Vista vertical (panel derecho) del campo de velocidades mostrando la intersección de los dos planos situados en V y en H+ de la figura 3.23. Los datos fueron obtenidos para  $Ra = 5.60 \times 10^5$  (experimento 3.2.3). Las flechas rojas indican la proyección del campo tridimensional.

Otra manera de visualizar la estructura tridimensional del flujo es graficar solo las líneas en las que se conocen las tres componentes de la velocidad, e ir rotándolo para darnos una mejor idea del comportamiento. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 3.46.

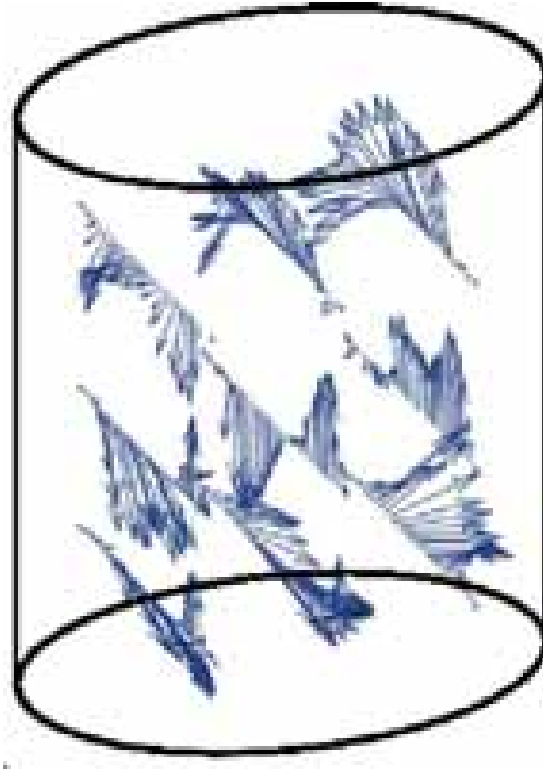


Figura 3.46: Construcción de las nueve líneas de intersección presentadas en la figura 2.4. Cada línea contiene los vectores tridimensionales construidos a partir de los dos sistemas PIV.

La estrategia de graficación que consideramos más ilustrativa consiste en lo siguiente. Los campos de velocidad bidimensionales se grafican en gris, mientras que los vectores tridimensionales se grafican con color, distinguiendo los vectores que se originan en diferentes líneas. Así obtenemos el campo tridimensional mostrado en la figura 3.47. Se observa claramente una celda convectiva no axisimétrica de geometría similar a la observada en el plano vertical central (V, H) de la figura 3.23. Por la distribución de los campos de velocidades se considera que esta es la estructura principal del flujo.

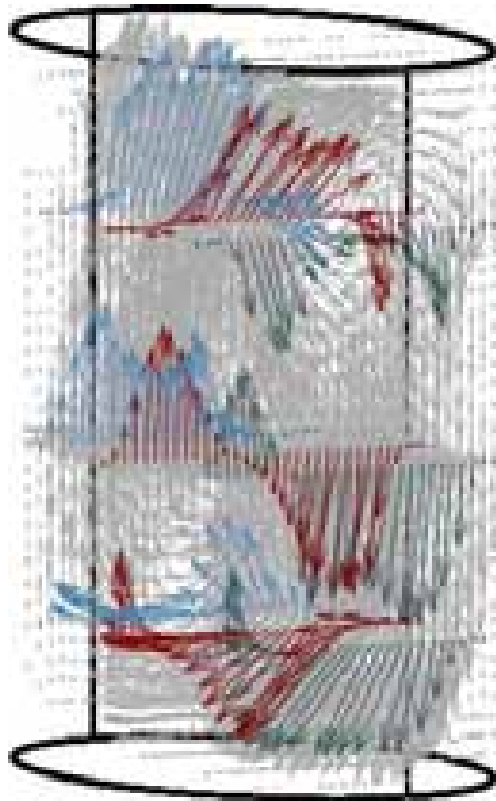


Figura 3.47: Vista de las nueve líneas de vectores tridimensionales, junto con seis de los dieciocho planos bidimensionales. Los seis planos corresponden a cada uno de los cortes en la cavidad.

A pesar de que es difícil concebir la estructura global del flujo con la información disponible y con las herramientas de graficación estáticas; la figura 3.47 da una idea aproximada del patrón de movimiento. La imagen global del flujo se mejora sustancialmente cuando esta información se presenta de manera animada mostrando el campo de velocidades desde diversos ángulos, pues la percepción humana integra la información. Este análisis se puede observar en el sitio <http://www.cie.unam.mx/~erm/~miloc>

# Capítulo 4

## Conclusiones

Para hacer un análisis tridimensional del movimiento de un fluido, es necesario registrar las tres componentes de la velocidad en todos los puntos del volumen ocupado por el fluido. En este trabajo presentamos un equipo que cuenta con dos sistemas PIV capaz de registrar el campo de velocidad bidimensional en dos planos mutuamente perpendiculares. En la línea de intersección de dos planos donde se conoce el campo de velocidades, se cuenta con las tres componentes de la velocidad y desplazando los planos convenientemente se puede adquirir información sobre la distribución tridimensional de la velocidad en varias líneas específicas dentro del volumen ocupado por el fluido. El equipo puede obtener líneas con vectores tridimensionales, aunque en general esto no garantiza que con esta información podamos hacer una visualización tridimensional completa, pues en algunos casos en los que el patrón del movimiento es complejo, la información tridimensional en líneas puede resultar incompleta. La reconstrucción tridimensional del campo de velocidades, sólo es posible hacerse si el tiempo característico del flujo es mucho mayor al tiempo máximo de auscultación del sistema. Este criterio se cumple siempre para los flujos en estado permanente. La posibilidad de obtener una reconstrucción tridimensional depende de la complejidad del patrón de movimiento. Es importante enfatizar que la certeza en la determinación de la línea de intersección y la simultaneidad de las mediciones son fundamentales para la correcta interpretación de los datos experimentales.

Las observaciones experimentales efectuadas en este trabajo fueron confiables ya que los resultados registrados por los dos sistemas PIV totalmente independientes, son coherentes entre sí. En este trabajo se desarrolló un método para verificar la consistencia de las observaciones, que compara la información redundante obtenida por los dos sistemas de PIV. El ejercicio de validación requiere de ajustes en la determinación de la posición de los planos donde se obtienen los datos de ambos sistemas y esto permite tener una mayor confianza al hacer la reconstrucción tridimensional. Aunque los parámetros experimentales (razón de aspecto y número de Rayleigh) usados en este



trabajo no coinciden con los parámetros de las observaciones específicas de Müller et al. [1], es importante notar que el comportamiento cualitativo de las observaciones están en total acuerdo con el mapa de estabilidad publicado por estos autores.

En el análisis del flujo de convección natural en una cavidad cilíndrica con razón de aspecto pequeña, se registró el comportamiento tridimensional de algunas líneas del flujo. De manera esquemática se graficaron los seis planos bidimensionales con las nueve líneas tridimensionales, con el objetivo de entender cualitativamente el comportamiento del flujo dentro de la cavidad. Aunque se lograron construir estos vectores tridimensionales, se concluye que el flujo presenta una enorme complejidad en su movimiento tridimensional, por lo que no fue posible ofrecer una imagen del comportamiento completo del flujo.

Las observaciones que se hicieron en los experimentos en donde el flujo se encontraba en estado permanente (experimentos 1 (3.2.1), 2 (3.2.2) y 3 (3.2.3)), mostraron que el comportamiento cualitativo del flujo entre estos era similar. Al alejarnos del estado permanente y situarnos en la zona cercana al Rayleigh crítico, en donde el flujo cambia su estructura de estado permanente a un estado marginalmente dependiente del tiempo (3.2.4), se observó como el comportamiento cualitativo del flujo para este experimento aún conservaba el mismo patrón de movimiento mostrado por los experimentos 1 (3.2.1), 2 (3.2.2) y 3 (3.2.3). En la zona de estado dependiente del tiempo, como se mostró en el experimento 5 (3.2.5), pudimos observar que el flujo rompe completamente el patrón de movimiento mostrado en el experimento 4 (3.2.4). El complejo comportamiento del sistema bajo estas condiciones nos impide hacer un bosquejo del patrón de movimiento, pues este sistema viola la condición que indica que el tiempo característico del flujo debe ser mucho menor al tiempo total del protocolo de movimiento de los planos.

El registro del flujo al que tuvimos acceso no fue suficiente para realizar una reconstrucción tridimensional. Para hacer la reconstrucción completa, es necesario hacer algún tipo de interpolación con los datos obtenidos de los experimentos. Una posibilidad realista para llevar a cabo esta tarea, es hacer una simulación numérica en la que los datos registrados experimentalmente se usen como correctores del modelo, usando la técnica de asimilación de datos. Lo que consideramos importante es que ahora contamos con el registro de las velocidades de manera tridimensional. Dado que actualmente existen modelos numéricos capaces de simular un flujo bajo condiciones similares, podemos entonces agregar los datos experimentales en puntos estratégicos dentro de la cavidad y mediante la unificación de estas dos técnicas será posible la reconstrucción total del campo de velocidades tridimensional. Esta labor será tema de una investigación futura.

# Bibliografía

- [1] Müller G., Neumann G., and Weber W. Natural convection in vertical Bridgman configuration. *J. Crystal Growth*, 70:78–82, 1984.
- [2] Leong S. S. Numerical study of Rayleigh-Bénard convection in a cylinder. *Numerical Heat Transfer*, 41:673–683, 2002.
- [3] Inc. Semiconductor Technology Research. Cristalización. [En línea], consultado en diciembre 2007. <http://www.semitech.us>.
- [4] Baird D. C. *Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*. Prentice Hall, 1962.
- [5] Getling Alexander V. *Rayleigh-Bénard Convection: Structures and Dynamics*. World Scientific, 1998.
- [6] Chandrasekhar S. *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*. Dover, 1981.
- [7] Schlichting H. and Gersten K. *Boundary Layer Theory*. Springer, 2000.
- [8] Charlson G.S. and Sani R.L. Finite amplitude axisymmetric thermoconvective flows in a bounded cylindrical layer of fluid. *J. Fluid Mech.*, 71(2):231–240, 1975.
- [9] Rosenblat S. Thermal convection in a vertical circular cylinder. *J. Fluid Mech.*, 122:395–410, 1982.
- [10] Vargas M. *Convección Natural en Sistemas Rotatorios*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.
- [11] Neumann G. Three-dimensional numerical simulation of buoyancy-driven convection in vertical cylinders heated from below. *Fluid Mech.*, 214:559–578, 1990.
- [12] Kalpakjian S. and Schmid S.R. and. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Pearson, 2002.
- [13] Raffel M., Willert C. E., and Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer, 1998.

- [14] THECNE. Baño térmico. [En línea]. <http://www.techneusa.com>.
- [15] Bid-Service. Baño térmico. [En línea]. <http://www.bidservice.com>.
- [16] Liévanos C. Automatización de un posicionamiento, adquisición de datos e imágenes. Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Zacatepec.
- [17] Hernández-Cruz G., Liévanos R. C., Rodríguez M., Vargas M., and Ramos E. Posicionador de precisión de dos grados de libertad. *Congreso de la Sociedad Mexicana de Instrumentación (SOMI)*, 2004.
- [18] Omega. Propiedades de los termopares. [En línea], consultado en diciembre 2007. <http://www.omega.com/techref/colorcodes.html>.
- [19] National Instruments. Tarjeta de adquisición de temperaturas. [En línea], consultado en diciembre 2007. <http://www.ni.com>.
- [20] Ruiz E. Ejecución de aplicaciones en paralelo utilizando labview en una computadora de dos procesadores. Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Zacatepec.