



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio de la convección natural
en cavidades con paredes
semiconductoras para un fluido
*pseudoplástico***

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A (N)

Ernesto Santiago Méndez Illescas

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Melesio Sánchez Huerta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi padre y mi madre, Ernesto e Hilda, por su apoyo incondicional en mis sueños y proyectos y siempre confiar en mí y mis decisiones.

A mi hermana Hilda por su escucha generosa, su apoyo y sus sabios consejos.

Al Dr. José Melesio Sánchez Huerta por todo su apoyo y paciencia durante este proyecto de tesis y por ser un gran amigo.

A todo el servicio social del Dr. Melesio a quienes puedo llamar mis amigos por su apoyo durante este proceso.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ofrecerme una formación integra y completa como ingeniero y ser humano.

A todos mis amigos con los que compartí este proceso.

Índice

1	Introducción	2
1.1	Justificación	3
2	Antecedentes	4
2.1	Trabajos previos	8
2.1.1	Trabajos numéricos	8
2.1.2	Trabajos experimentales	19
2.2	Descripción del problema	24
3	Experimentos	26
3.1	Diseño y construcción del equipo	26
3.2	Metodología experimental.	35
3.3	Calor de advección	35
4	Resultados	37
4.1	Calor de advección y transferencia de calor	49
4.2	Distribución de temperaturas en muros	52
5	Conclusiones	55

Capítulo 1

Introducción

En general en la literatura se presentan una gran variedad de trabajos relacionados con el estudio de la transferencia de calor con convección para fluidos newtonianos. Sin embargo en diversos procesos industriales están presentes los fluidos no-newtonianos por lo que la información reportada en la literatura es limitada, esto es aún más marcado para trabajos experimentales. El presente trabajo forma parte de un proyecto relacionado con la influencia del índice de comportamiento en la transferencia de calor. En este sentido esta tesis se enfoca en el estudio de la transferencia de calor en una cavidad cúbica, el estudio es experimental por lo que su aportación es importante a la investigación básica.

El presente trabajo está integrado por cinco capítulos. En el primer capítulo "Introducción" se da una breve descripción del trabajo. En el segundo capítulo "Antecedentes" se presenta una revisión de los trabajos publicados en la literatura especializada. En el tercer capítulo se realiza una descripción del dispositivo empleado para la investigación y además, una explicación de la metodología experimental. En el capítulo cuatro "Resultados" se muestran de manera gráfica los resultados más importantes obtenidos de la experimentación, las gráficas muestran los perfiles de temperatura en la cavidad con lo que se puede inferir el movimiento del fluido, además, se presenta una curva para el número de Nusselt en función del Rayleigh. Finalmente en el capítulo cinco se dan las conclusiones derivadas de los resultados experimentales.

1.1 Justificación

Debido a la poca información relacionada con trabajos experimentales y dado que la mayoría de los estudios relacionados con la convección natural en cavidades cerradas para fluidos no Newtonianos, son abordados desde el punto de vista teórico. El presente trabajo ofrece una aportación a la investigación experimental básica relacionada con la transferencia de calor en cavidades. Los resultados de esta tesis forman parte de un proyecto de mayor alcance donde se pretende observar la influencia del índice de comportamiento en la transferencia de calor.

Capítulo 2

Antecedentes

El estudio de la transferencia de calor en fluidos No-Newtonianos se ha convertido en un tema de gran interés por su presencia en diferentes procesos industriales como el procesamiento de alimentos, extracción de petróleo, materiales poliméricos, sistemas geofísicos, entre otros.

En general un fluido es aquel material que se deforma de manera continua bajo la acción de un esfuerzo cortante [1]. Los fluidos se clasifican en dos grandes grupos: newtonianos y no-newtonianos. La diferencia entre ambos es que los fluidos newtonianos cumplen con la ley de viscosidad de Newton:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

Donde μ [$\frac{kg}{m \cdot s}$] es la viscosidad dinámica, τ [$\frac{N}{m^2}$] es el esfuerzo cortante y dv/dy [$\frac{1}{s}$] es la velocidad de corte. Esta ley nos relaciona la viscosidad de un fluido con el esfuerzo cortante.

En el caso de los fluidos No-newtonianos, el comportamiento de la viscosidad se puede describir con la ley de potencia, la cual tiene la siguiente forma

$$\mu = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n-1} \quad (2.2)$$

Donde K es el coeficiente de congruencia dimensional y n es el índice de comportamiento. A partir de la ley de viscosidad de Newton y la ley de potencia se puede obtener la siguiente expresión para el esfuerzo cortante en un fluido no Newtoniano

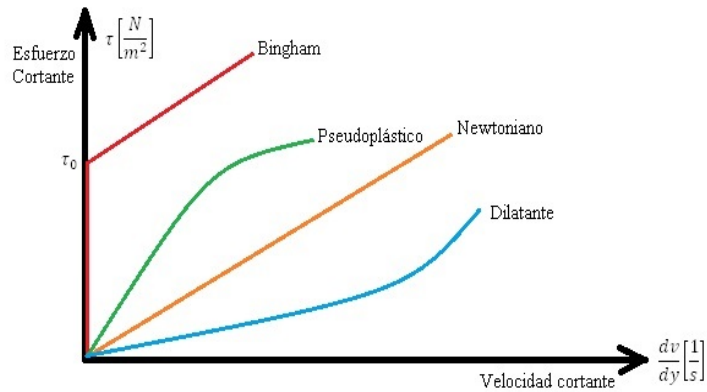


Figura 2-1: Clasificación de los fluidos según su índice de comportamiento

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (2.3)$$

En la figura 2-1 se muestran los diferentes comportamientos de los fluidos no Newtonianos basados en la ecuación 2.3.

Según el valor de n en la ley de potencia será el comportamiento del fluido.

Si n es menor a 1 se comporta como un fluido Pseudoplástico.

Si n es igual a 1 se comporta como un fluido newtoniano y la K es la viscosidad.

Si n es mayor a 1 el fluido se comporta como un Dilatante.

En el caso del fluido de Bingham la ley de viscosidad de newton se modifica y queda de la forma:

$$\tau = \tau_0 + K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (2.4)$$

Donde τ_0 [$\frac{N}{m^2}$] es un esfuerzo necesario para que el fluido se empiece a desplazar. Por la similitud con la ecuación 2.3 los valores de n indican si el fluido es Bingham dilatante o pseudoplástico.

Los fluidos pseudoplástico se caracterizan por que su viscosidad baja con un esfuerzo cortante alto. Si es mayor el esfuerzo, la viscosidad baja y permite el flujo con mayor facilidad. Ejemplos

de estos fluidos son mostaza, ketchup, pinturas, etc.

En cambio los fluidos dilatantes aumenta su viscosidad entre mayor es el esfuerzo cortante. Ejemplos de fluidos dilatantes son las soluciones de harina de maíz con agua, la arena mojada, dióxido de titanio, etc.

Por otra parte la transferencia de calor se presenta por tres mecanismos: conducción, radiación y convección.

La conducción se presenta en sólidos o fluidos estáticos y es cuando una partícula del material vibra por la energía que tiene debido a un incremento en su temperatura y empieza a chocar con las partículas vecinas generando que las vibraciones se propaguen en todo el material transfiriendo energía. La ecuación que representa el fenómeno es la ley de Fourier.

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

Donde q'' [$\frac{W}{m^2}$] es el flujo de calor por unidad de área, k [$\frac{W}{m \cdot K}$] la conductividad térmica del material o fluido y $\frac{dT}{dx}$ [$\frac{K}{m}$] el gradiente de temperaturas.

La radiación es la energía emitida por la materia con una temperatura finita. Esta se emite por medio de ondas. Toda materia con temperatura mayor al cero absoluto emite radiación térmica. Donde el calor transferido se puede determinar mediante la siguiente expresión

$$q'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (2.6)$$

Donde ε emisividad del cuerpo donde $0 \leq \varepsilon \leq 1$, σ es la constante de Stefan-Boltzmann donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ [$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$], T_s [K] la temperatura de la superficie y T_{amb} [K] la temperatura del ambiente.

La convección es el tema principal de este trabajo y se compone dos mecanismos, el primero es debido al movimiento aleatorio de las partículas y el segundo es por el movimiento global de estas. Este movimiento global de las partículas se presenta cuando hay un cambio en la densidad del fluido por la diferencia de temperaturas. El fluido caliente tiende a ser más ligero y sube. Se le llama advección al transporte de energía debido al movimiento global de las partículas y convección cuando también se toma en cuenta el movimiento aleatorio de las partículas. El

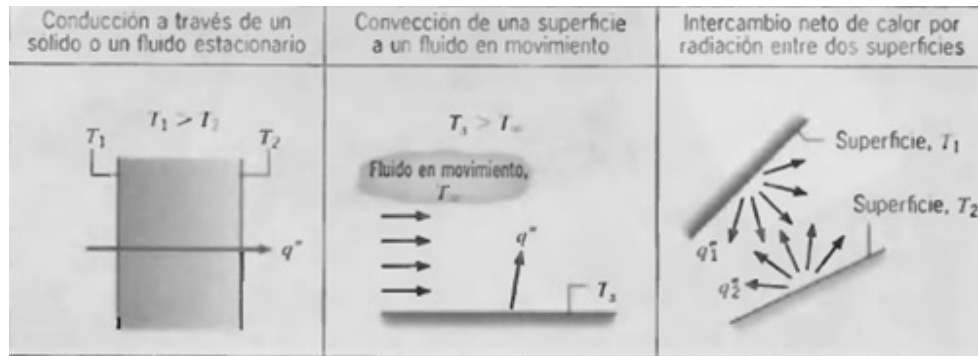


Figura 2-2: Esquema de los mecanismos de transferencia de calor [2]

modelo matemático que lo representa es:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.7)$$

Donde $h \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ es el coeficiente convectivo y $T_\infty [K]$ la temperatura de la corriente libre. En la figura 2-2 se muestran ejemplos de cada mecanismo de transferencia de calor.

El estudio de la transferencia de calor por convección se apoya en números adimensionales. El más importante es el número de Nusselt (Nu) que es el coeficiente adimensional de transferencia de calor.

El número Nu compara la transferencia de calor por convección contra la conducción. Representa una comparación entre la transferencia de calor por convección contra la transferencia de calor por conducción y tiene la siguiente forma:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2.8)$$

Donde $L [m]$ es una longitud característica y k es la conductividad térmica del fluido.

La convección se clasifica según el origen del flujo. Cuando el flujo es inducido por algún medio externo se le llama convección forzada. La convección mixta se presenta cuando hay una combinación de natural y la forzada.

La convección natural o libre se origina por fuerzas de flotación las cuales son generadas por un cambio en la densidad del fluido por efectos de un gradiente de temperaturas. En particular

el estudio de convección natural en cavidades tiene una gran variedad de aplicaciones como pueden ser en reactores nucleares, ventanas de doble cristal, paredes huecas, circuitos eléctricos por mencionar algunas.

Para caracterizar la convección natural se utiliza el número de Rayleigh (Ra). Este parámetro compara las fuerzas de flotación contra las viscosas.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{v\alpha} \quad (2.9)$$

Donde g [$\frac{m}{s^2}$] es gravedad, β [$\frac{1}{K}$] es el coeficiente de expansión térmica, T_s [K] la temperatura de la placa, T_∞ [K] temperatura de la corriente libre, v [$\frac{m^2}{s}$] viscosidad cinemática del fluido, α [$\frac{m^2}{s}$] coeficiente de difusión térmica y L [m] es una longitud característica.

Cuando las fuerzas de flotación superan a las inerciales es cuando se empieza a presentar la transferencia de calor por convección natural. Uno de los patrones de flujo que se presentan en la convección natural son las llamadas celdas de Benard. Estas celdas convectivas se muestran en la figura 2-3, las cuales aparecen para valores del Rayleigh (Ra) mayores a 1708 para placas infinitas.

2.1 Trabajos previos

En la presente sección se muestra una revisión de la bibliografía especializada relacionada con el tema. Se divide en simulaciones numéricas y trabajos experimentales.

2.1.1 Trabajos numéricos

El trabajo de Pellew y Southwell encontró un valor crítico de $Ra=1708$ para que se empiecen a presentar las celdas convectivas. Este valor crítico es en el caso de un fluido entre dos placas horizontales infinitas calentado desde abajo. Entre mayor es este valor el sistema es más inestable y puede llegar a presentar un flujo turbulento.[3]

Los estudios más actuales de este fenómeno están enfocados en la convección en nano fluidos y generación de entropía. También hay investigaciones que se hacen con simulaciones numéricas como es en el estudio realizado por Gabanov [4] que busca encontrar los patrones de flujo y la

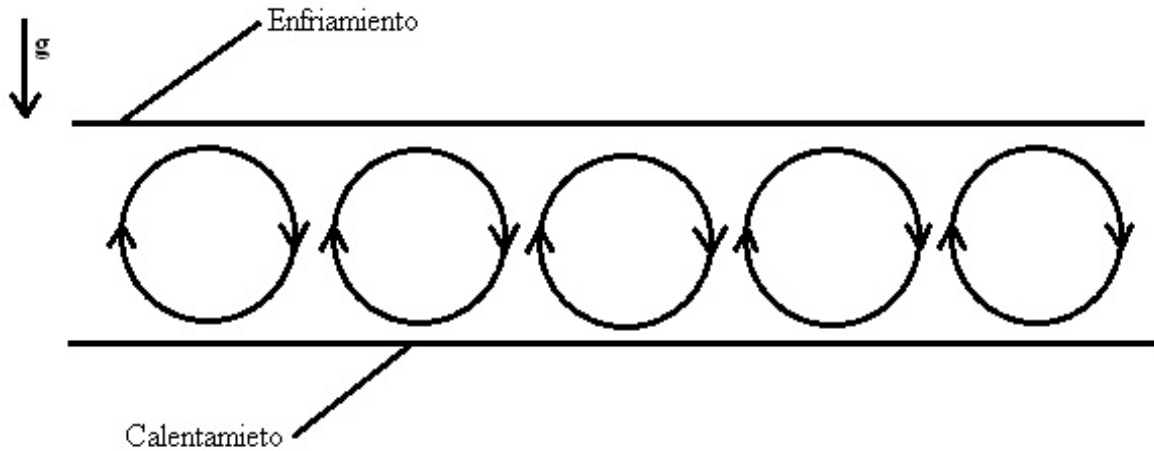


Figura 2-3: Celdas de Benard[3]

transferencia de calor en una cavidad cúbica con una fuente de calor de geometría variable. El autor propone cinco diferentes geometrías como fuente de calor.

Las geometrías propuestas se pueden observar en la figura 2-4. En la parte izquierda de las imágenes se ve la distribución de las isoterms y en el lado derecho las líneas de flujo del fluido.

Los resultados obtenidos muestran que entre mayor sea el número de Rayleigh y la fuente tenga una geometría más parecida al rectángulo, la transferencia de calor es mejor extrayendo el calor de la fuente.

Dentro de los estudios realizados por medio de la simulación numérica está la investigación de Z. Alloui & P. Vasseur [5]. La investigación es sobre la convección natural de un fluido no-newtoniano con el modelo Carreau-Yasuda 2.10 para la viscosidad. Este modelo tiene la forma:

$$\eta = (\eta_0 - \eta_\infty) [1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{n}} + \eta_\infty \quad (2.10)$$

Donde η_0 es la viscosidad newtoniana para velocidades de deformación bajos, η_∞ es la viscosidad newtoniana para velocidades de deformación altos, λ es una constante de tiempo, n es el índice de comportamiento y a constante adimensional. El modelo pretende predecir de mejor manera el comportamiento de la viscosidad respecto a la ley de potencia.

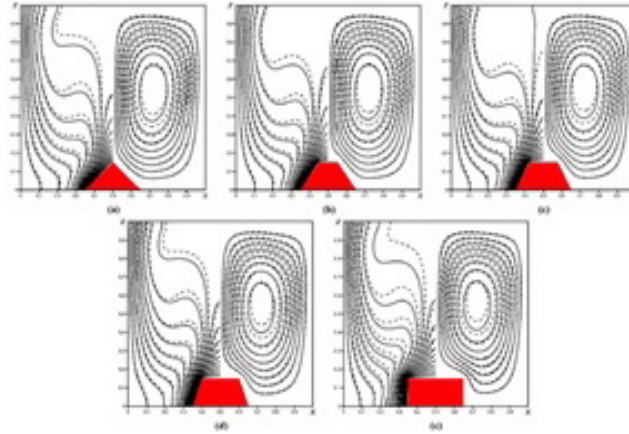


Figura 2-4: Geometrías de la fuente de calor. [4]

La investigación es sobre convección natural en una cavidad rectangular vertical. En la figura 2-5 se puede observar de manera esquemática la cavidad rectangular, la pared derecha es la de mayor temperatura y la izquierda de menor temperatura. Las paredes superiores e inferiores son adiabáticas.

La simulación numérica fue hecha variando los valores de n y a del modelo Carreau-Yasuda y con diferencias de temperatura muy pequeñas de aproximadamente 1°C . Los valores de n tomados son en su mayoría para fluidos pseudoplástico. En la figura 2-6 se muestran parte de las soluciones obtenidas en las simulaciones. En el lado derecho de las imágenes están las líneas de flujo y del lado izquierdo la distribución de temperaturas. Estos tres resultados mostrados fueron en fluidos pseudoplástico.

El trabajo realizado por Habbachi[6] es de convección natural en una cavidad cúbica con un medio poroso conductor en el centro de la cavidad. Realizo una simulación numérica para determinar cómo afecta a la transferencia de calor el medio poroso.

En la figura 2-7 se observa que el gradiente de temperatura es horizontal tomando el resto de los muros como adiabáticos. Se varió el tamaño del medio poroso como la conductividad térmica del material y se mantuvo constante el número de Raleigh.

El tamaño del medio poroso se mantuvo en una relación de $\eta = \frac{e}{H}$ donde η permanecía entre 0% y 100%. La conductividad del material se varió de 1 a 100.

La figura 2-8 muestra una parte de los resultados obtenidos por la simulación numérica a

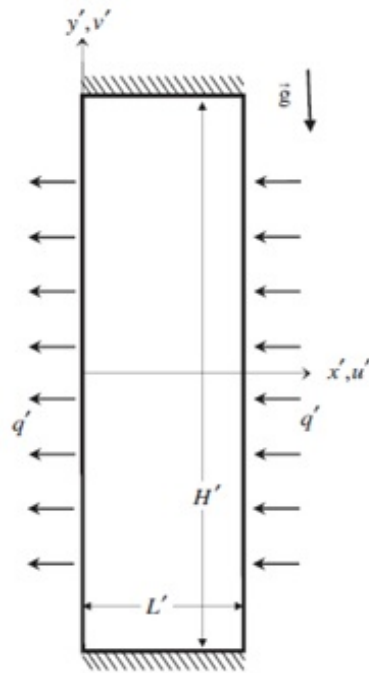


Figura 2-5: Esquema del sistema [5]

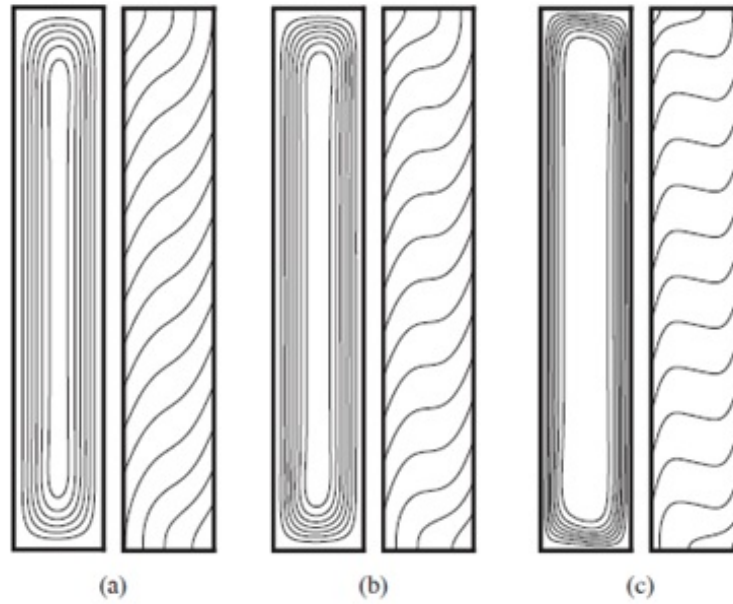


Figura 2-6: Resultados de las simulaciones [5]

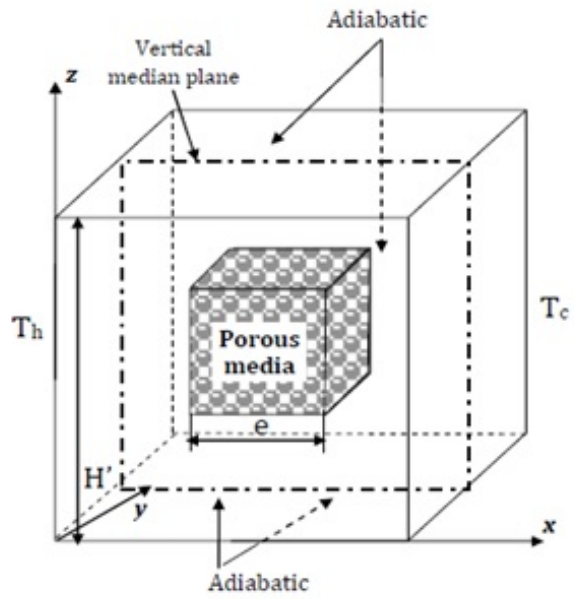


Figura 2-7: Esquema del modelo a estudiar.[6]

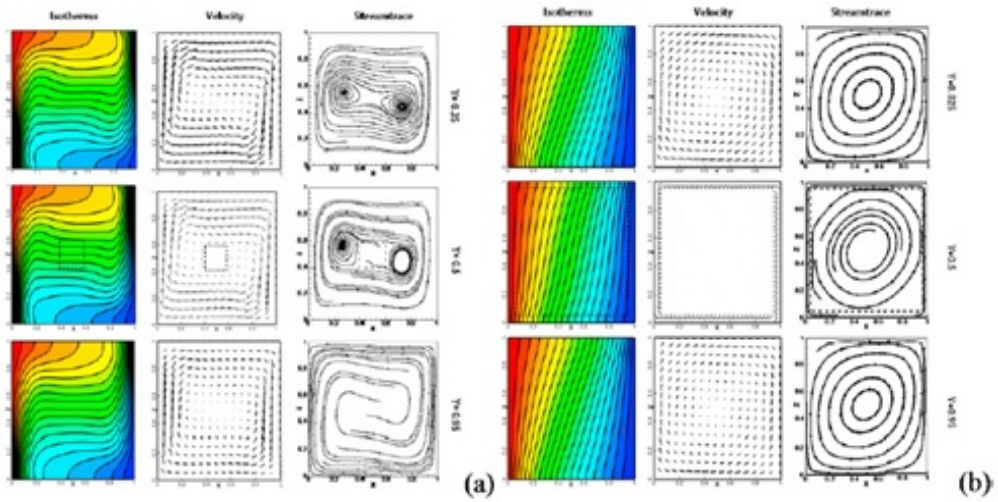


Figura 2-8: Isotermas, Campo de velocidad y patrón de flujo con (a)=20% y (b)=80% [6]

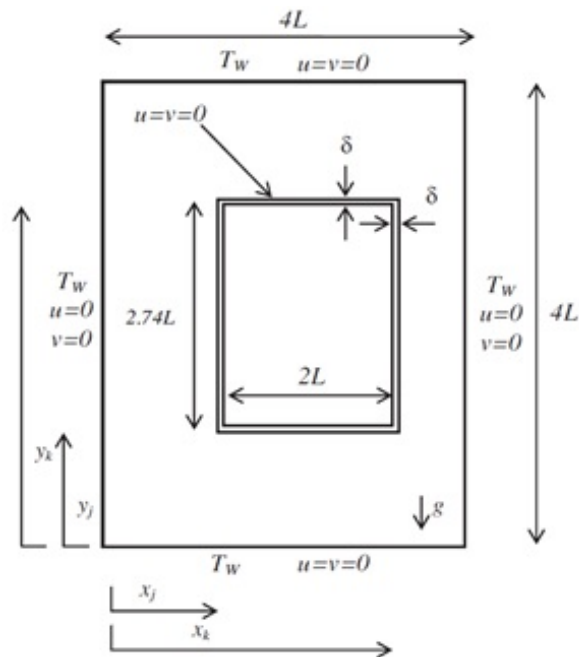


Figura 2-9: Esquema utilizado en la simulación. [7]

diferentes cortes sobre el eje Y. Se observa una diferencia significativa entre los patrones de flujo de ambos casos y las isotermas. Donde se encuentra el medio poroso más grande se observa conducción pura.

Los resultados obtenidos llevan a la conclusión de que el número de Nusselt no se va tan afectado por la presencia del cubo o por su tamaño. La variación de este es más significativo cuando cambia la conductividad térmica de este.

La investigación de Lemus-Mondaca[7] compara la convección natural en una cavidad cubica con diferentes tipos de fluido. El estudio está enfocado en procesos con alimentos. En la figura 2-9 se puede observar el esquema que se utilizó para realizar la simulación.

Este trabajo tiene la particularidad de hacer el estudio en la cavidad central y general el gradiente de temperatura con otro fluido en la parte exterior. Se realizó el análisis del flujo y transferencia del calor en ambas cavidades.

El fluido exterior e interior se probaron fluidos dilatantes, pseudoplástico y newtonianos. Para hacer la simulación numérica se consideró el fenómeno en 2D y se utilizó la ley de potencia.

La figura 2-10 muestra la evolución en el tiempo de la distribución de temperaturas para

diferentes tipos de fluidos. El fluido interior es con $n=1$ mientras que el fluido exterior varía entre 0.6, 1 y 1.4. Se puede observar que el comportamiento es muy similar entre $n=1$ y $n=1.4$. Cuando $n=0.6$ la parte fría del fluido se concentra en la parte inferior.

Los resultados obtenidos llegan a la conclusión que con un fluido pseudoplástico en la parte exterior la transferencia de calor aumenta debido al movimiento de este en comparación con los casos del fluido newtoniano y dilatante.

En la rama de los nanofluidos también se estudia la convección natural en fluidos no-newtonianos. La investigación de Meng-He Sun [8] es una simulación numérica. En esta se utiliza agua con partículas sólidas de óxido de aluminio de 30nm de diámetro.

El estudio fue sobre una cavidad rectangular con relaciones de H/L de 0.25 a 4. La placa inferior se consideró con una temperatura mayor a la superior. Los muros laterales son adiabáticos. Esto genera un gradiente de temperatura vertical. En la figura 2-11 se muestra el esquema de modelo.

La concentración de las partículas vario entre 0-5%. Con cada valor de concentración se usaron diferentes valores de K y n de la ley de potencia. La relación de H/L se varió entre los valores 0.25, 0.5, 2 y 4. Se realizaron diferentes números de Rayleigh que fueron 10^3 , 5×10^3 , 10^4 , 5×10^4 , 10^5 , 5×10^5 .

En las figuras 2-13 y 2-12 se muestran los resultados obtenidos con una cavidad rectangular (H/L=0.5) y una cúbica (H/L=1). La Φ muestra el porcentaje de concentración de las partículas en el fluido. La V indica el campo de velocidades y la T el campo de temperaturas. Se puede observar la como la complejidad de los patrones de flujo están asociadods con la cantidad de partículas dispersas en el fluido.

Las conclusiones obtenidas nos dicen que el patrón de flujo dentro de la cavidad es más complejo mientras el Ra aumenta y más significativamente con una mayor concentración de partículas.

La transferencia de calor es muy afectada por el patrón de flujo. El número de Nusselt aumenta con una mayor concentración de las partículas. Comparando los modelos Newtoniano y No-Newtoniano se encuentra que el Nu para el segundo es 1.5 veces mayor que el primero.

La simulación numérica realizada por Yu-Peng Hu&You-Rong Li[9] se realizó sobre el la convección natural en una cavidad rectangular. Los investigadores abordaron el problema en

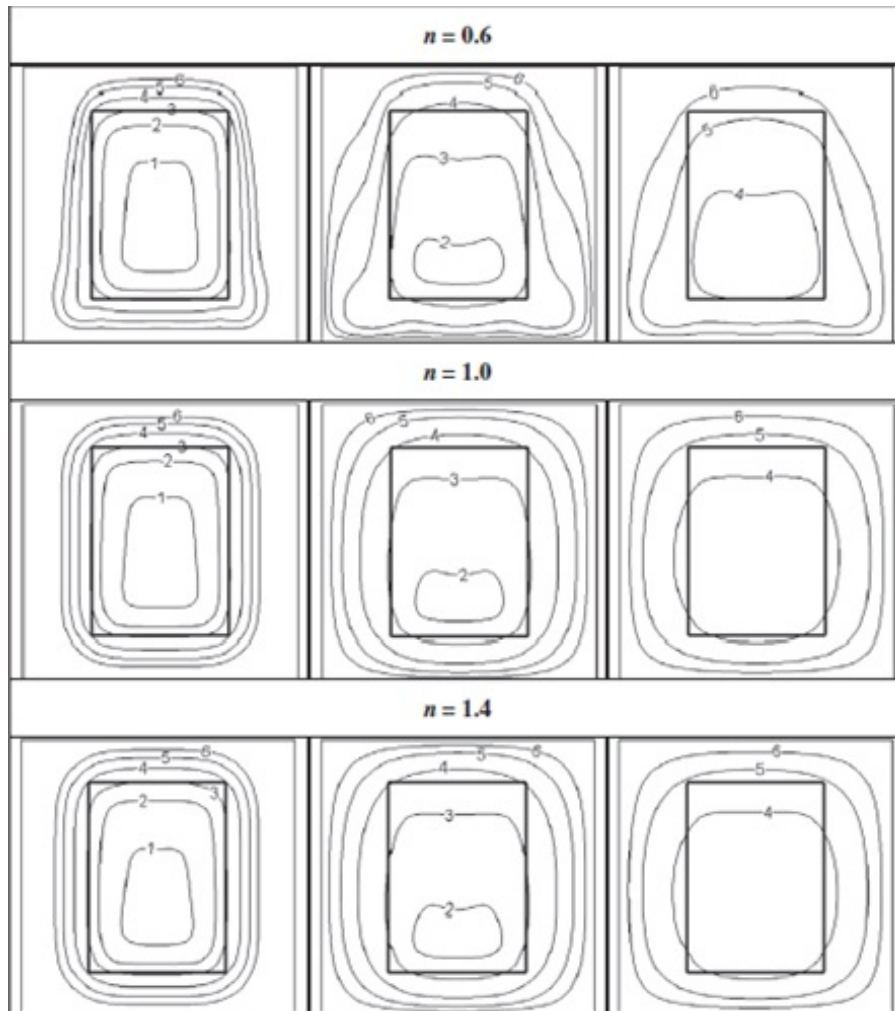


Figura 2-10: Evolución en el tiempo de la distribución de temperaturas [7]

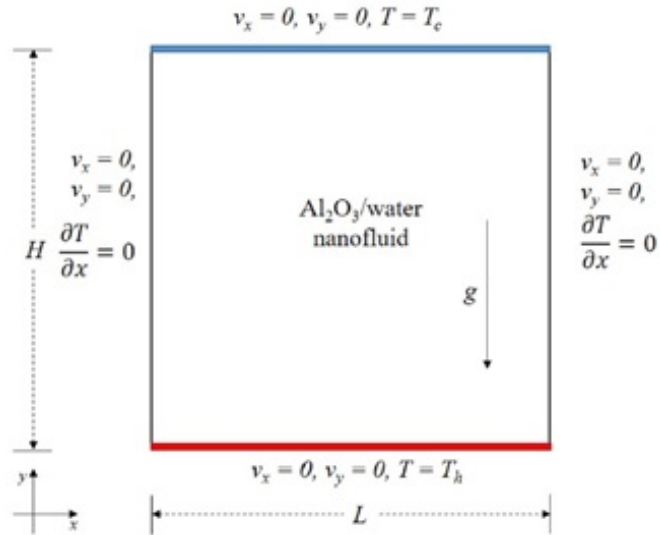


Figura 2-11: Esquema de la cavidad usado en la simulación.[8]

AR = 0.5				AR = 1.0			
Ra	φ			Ra	φ		
	1%	2%	3%		1%	2%	3%
10 ³	Cond.	Cond.	Cond.	10 ³	Cond.	Cond.	Cond.
5 × 10 ³	B1	B3	B1	5 × 10 ³	C1	C1	C1
10 ⁴	B1	B2	B2	10 ⁴	C1	C1	C2
5 × 10 ⁴	B1	B2	B2	5 × 10 ⁴	C1	C1	C2
10 ⁵	B4	B2	×	10 ⁵	C2	C2	C2
5 × 10 ⁵	×	×	×	5 × 10 ⁵	C2	C2	C3

Figura 2-12: Resultados obtenidos de la simulación numérica[8]

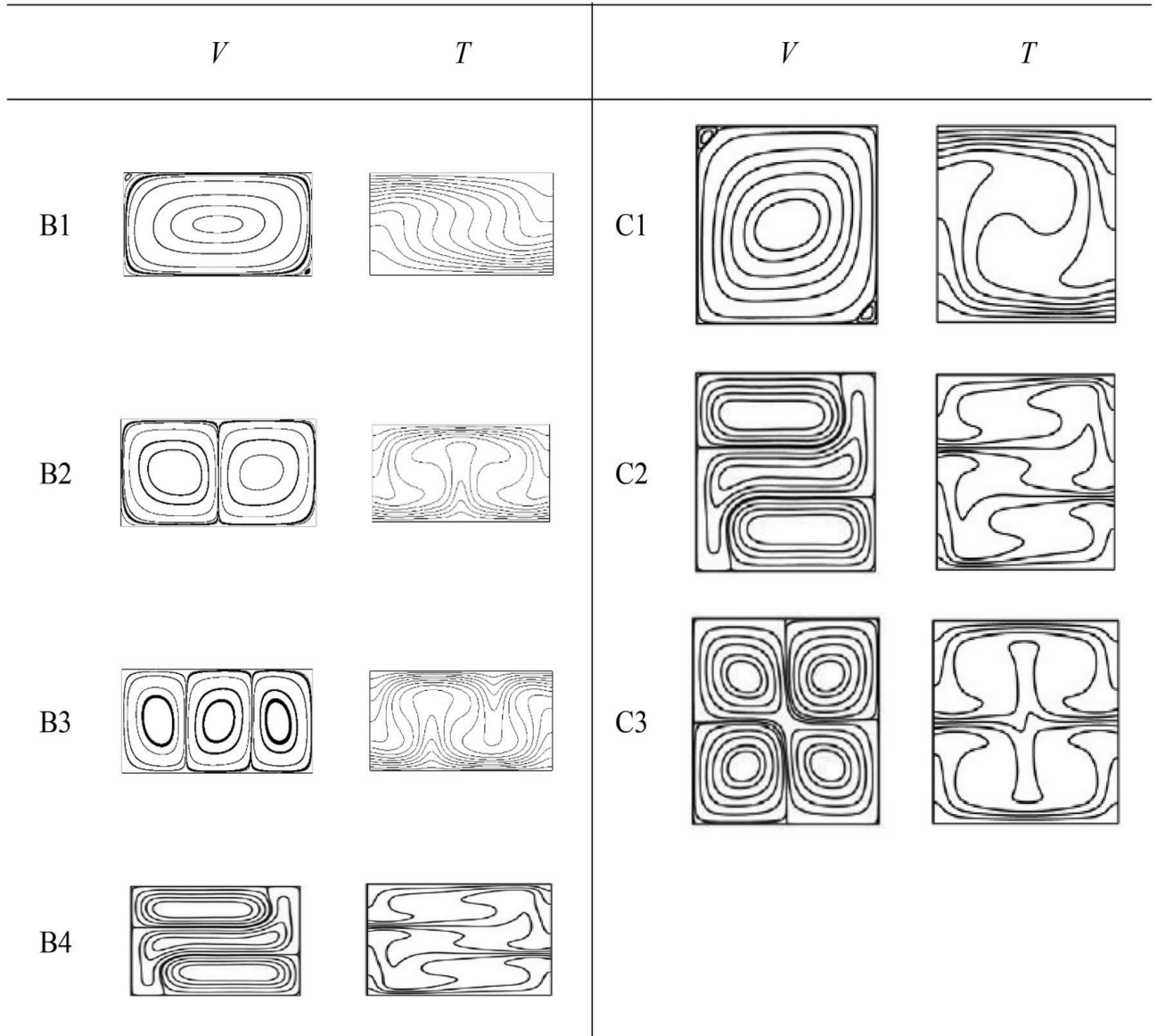


Figura 2-13: Resultados obtenidos de la simulación numérica[8]

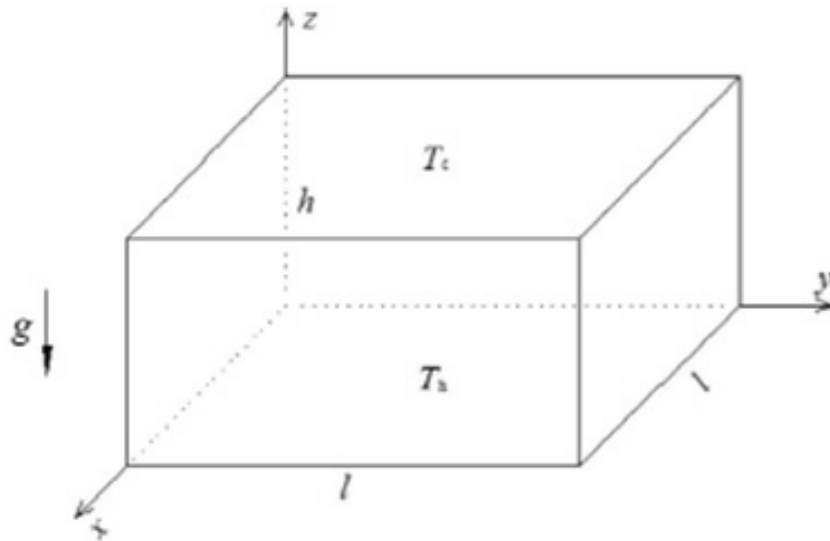


Figura 2-14: Geometría del problema[9]

tres dimensiones. En la figura 2-14 se muestra que el gradiente de temperaturas es vertical teniendo la temperatura mayor en la parte inferior. La tapa superior es cuadrada y las laterales son rectangulares. La relación utilizada es $\frac{l}{h} = 2$.

La simulación se realizó con diferentes números de Ra , considerando que la densidad del agua es muy alta y la variación de esta no es lineal. En la figura 2-15 se muestra patrones de flujo que son resultados de la simulación.

Los resultados obtenidos muestran que el Ra crítico para presentarse el flujo convectivo es menor que en una cavidad cúbica. Los patrones de flujo obtenidos son más variados y tienen diferentes formas a los presentados en una cavidad cúbica. El Nu local dentro de la cavidad se ve muy afectado según el patrón de flujo que este presente.

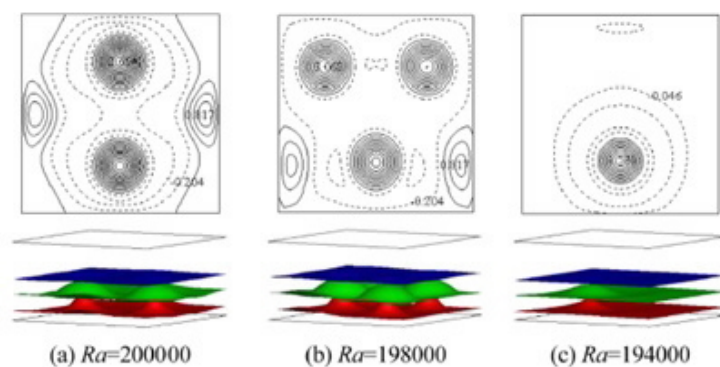


Figura 2-15: Patrones de flujo[9]

2.1.2 Trabajos experimentales

El experimento realizado por Naiyan Zhan[10] estudia la convección natural en una cavidad rectangular cerrada. Este estudio está enfocado en la refrigeración de componentes eléctricos.

El método experimental utilizado fue con tecnología holográfica de interferencia. Este método consiste en introducir dentro de la cavidad humo el cual permite visualizar el flujo con ayuda de una luz que atraviesa la cavidad.

Las variantes que realizó son teniendo una o dos fuentes de calor dentro de la cavidad manteniendo las paredes a una temperatura menor constante. También fue variando la distancia entre ambas fuentes y realizó varias pruebas con diferentes números de Rayleigh.

En la figura 2-16 se muestra el modelo experimental usado para este estudio, ambos cubos son de las mismas dimensiones y la distancia que variaba es b . Las diferencias de temperatura usadas fueron de 5°C , 10°C , 15°C y 20°C .

Las ventajas de este método experimental es que permite el estudio de la convección en tres dimensiones y permite ver con claridad el patrón de flujo generado.

La figura 2-17 muestra resultados obtenidos con una distancia constante de $50[\text{mm}]$ entre ambas fuentes de calor y diferentes diferencias de temperatura. En las imágenes (a), (b) y (c) se puede observar un patrón de flujo similar entre ellas mientras en la imagen (d) no es tan clara la imagen.

Los resultados que se encontraron son:

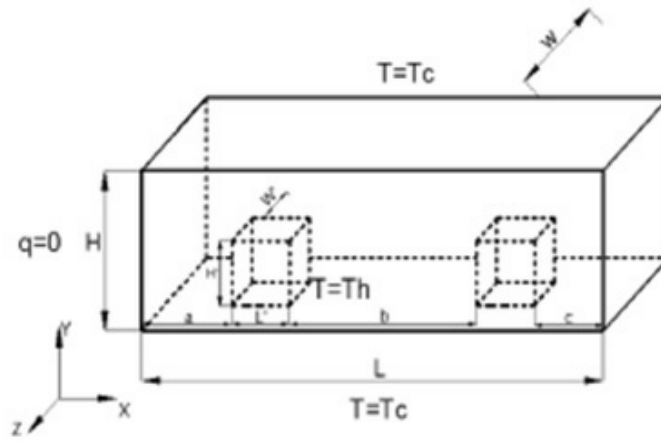


Figura 2-16: Modelo experimental de Naiyan Zhan[10]

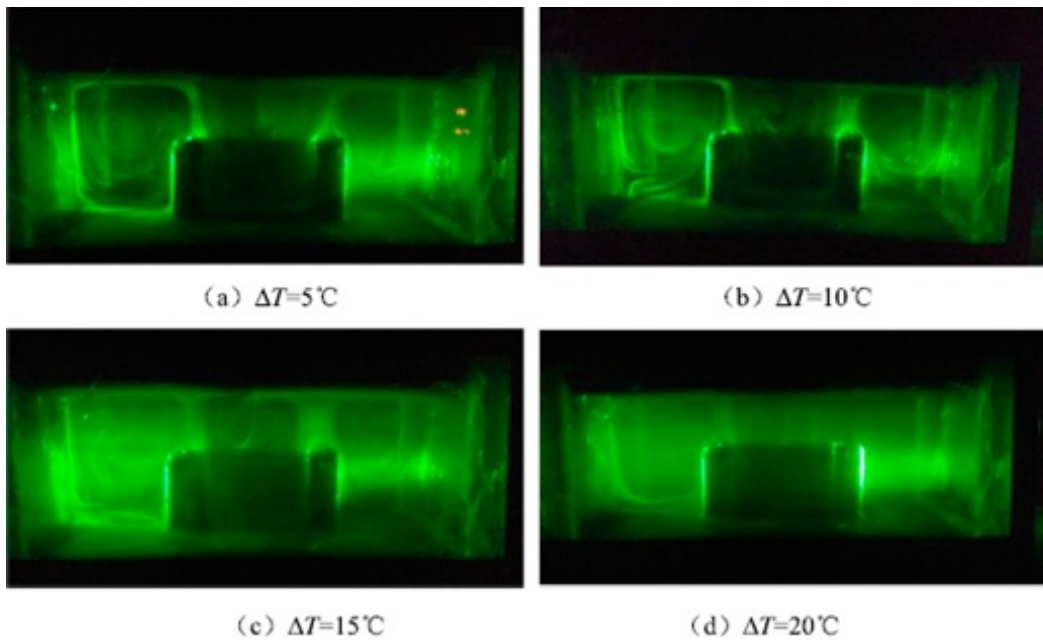


Figura 2-17: Resultados a diferentes diferencias de temperatura [10]

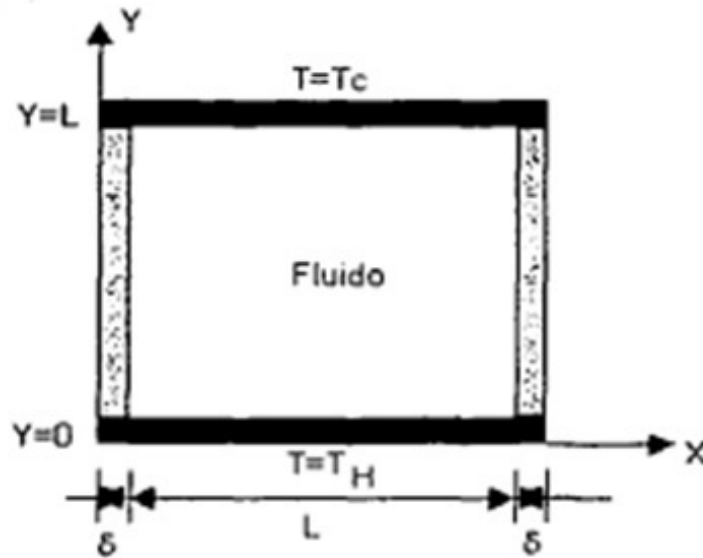


Figura 2-18: Cavidad cubica del experimento[11]

- Modificando el espacio entre las 2 fuentes de calor, la transferencia es incrementada y después debilitada dando como resultado una mejor transferencia a 50(mm) de separación.
- Entre el gradiente de temperaturas fue mayor se presentó una mejor transferencia de calor pero la diferencia de temperaturas más óptima para la aplicación es de 10°C.

La investigación experimental de Sánchez[11] fue sobre convección natural en una cavidad cúbica de paredes conductoras. El estudio fue realizado en una cavidad cerrada con glicerina como fluido de trabajo. En la figura 2-18 se puede ver un esquema la cavidad del experimento.

La cavidad fue calentada por la parte de abajo por medio de una resistencia eléctrica y por la parte superior fue enfriado con un serpentín por el que fluía agua a temperatura ambiente. Las paredes laterales conducían el calor y mantenían una condición de simetría.

El objetivo fue encontrar el campo de temperaturas para estimar como se comportaría el patrón de flujo de la glicerina. Las medidas fueron tomadas a diferentes números de Ra .

Los resultados obtenidos en los experimentos llevan a la siguiente conclusión. Entre mayor sea el número de Ra . La transferencia de calor es mayor y se detectaron tres diferentes configuraciones de flujo.

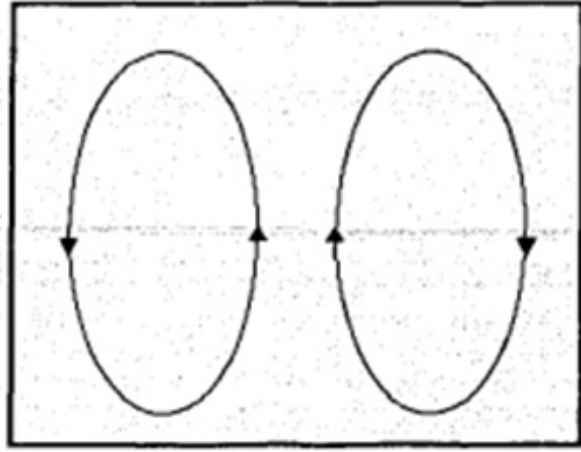


Figura 2-19: Celdas a un $Ra = 5.39 \times 10^4$ [11]

En la figura 2-19 se ve que para un número de Ra de 5.39×10^4 hay dos celdas que descienden por las paredes y suben por el centro de la cavidad. En la figura 2-20 las celdas cambian de sentido con un Ra de 6.49×10^4 . Por último en la figura 2-21 se forman cuatro celdas en la cavidad dos en la parte superior y dos en la inferior. Esto con una de Ra de 3.1×10^5 .

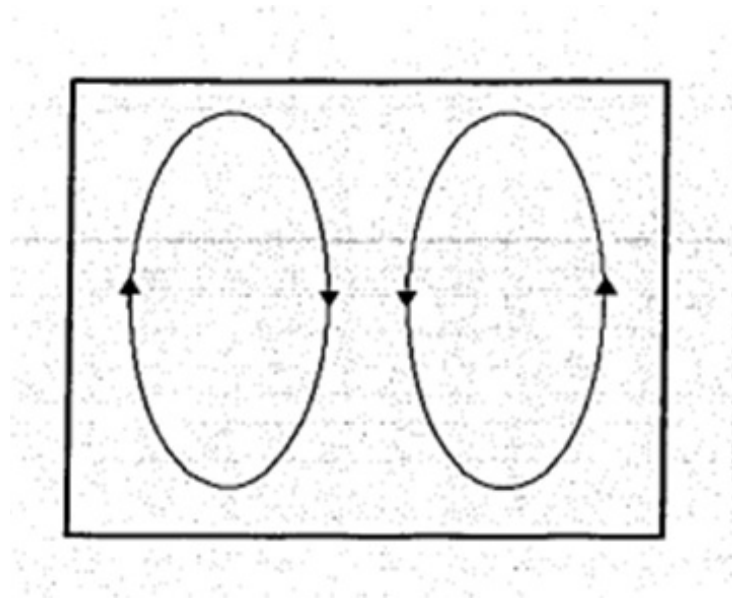


Figura 2-20: Celdas a un $Ra = 6.49 \times 10^4$ [11]

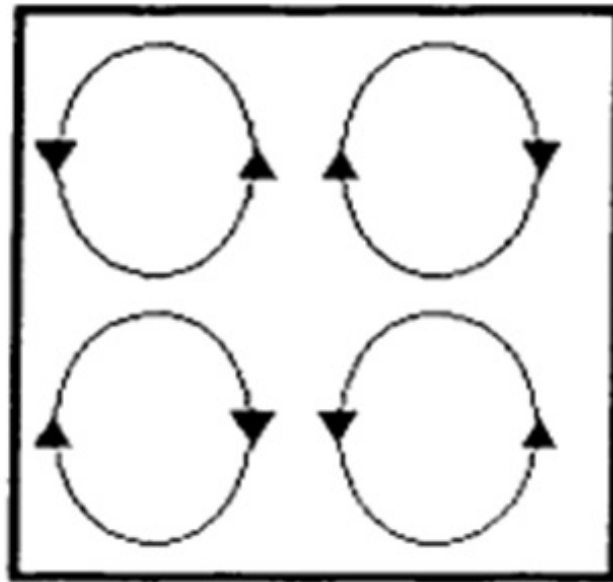


Figura 2-21: Celdas a un $Ra = 3.1 \times 10^5$ [11]



Figura 2-22: Representación esquemática del problema

2.2 Descripción del problema

El problema que se estudia en este trabajo es la transferencia de calor por convección natural en una cavidad cúbica sujeta a un gradiente de temperaturas $\Delta T = T_h - T_c$. La parte inferior de la cavidad se mantiene a temperatura constante T_h y la parte superior se mantiene a una temperatura T_c ; $T_h \gg T_c$. Ver figura 2-22. Las paredes laterales de la cavidad son semiconductoras.

El fluido de trabajo es un fluido pseudoplástico con índice de comportamiento $n = 0.56$ y $k = 0.447[Pa * s]$ [12]. El coeficiente de expansión térmica es tomado de la investigación de Ortega [13] y se muestra en la figura 2-23.

Debido al gradiente de temperaturas se presenta una convección natural por cambios en la densidad, por lo que el movimiento del fluido origina patrones de flujo dentro de la cavidad que favorece la transferencia de calor. Además de la estimación de la transferencia de calor se pretende determinar el campo de temperaturas y a partir de ellos poder inferir los patrones de flujo dentro de la cavidad.

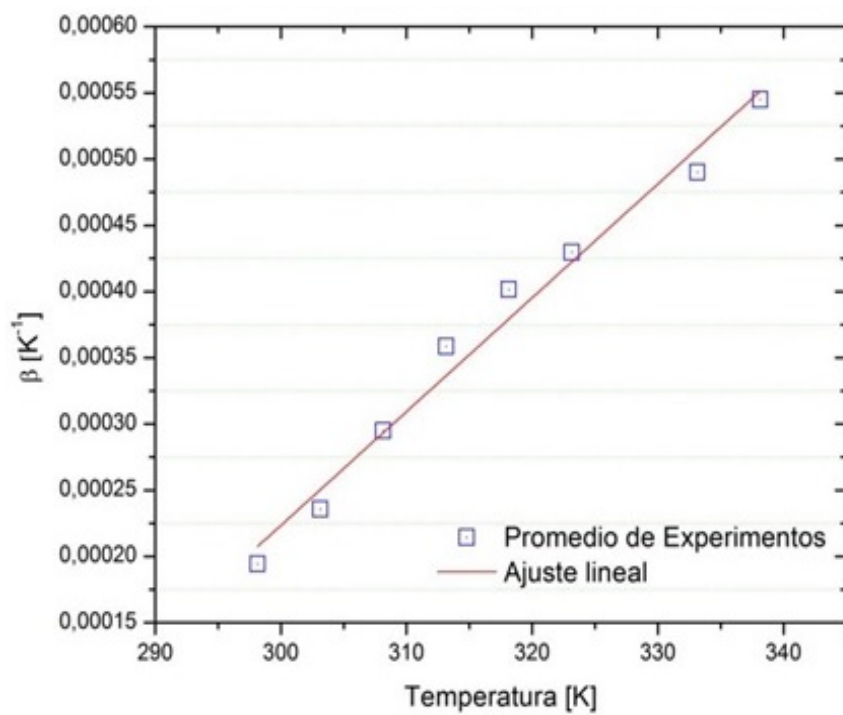


Figura 2-23: Gráfica de coeficiente de expansión térmica en función de la temperatura.[13]

Capítulo 3

Experimentos

En este capítulo se presentan los detalles del diseño y construcción del dispositivo experimental. Además se muestran imágenes del modelo físico y el equipo utilizado como el baño térmico, el termómetro y el transformador variable. También se explica tanto la metodología experimental como la instrumentación del dispositivo. La última sección del capítulo muestra cómo se realiza el cálculo del calor de advección de manera experimental.

3.1 Diseño y construcción del equipo

En la figura 3-1 se muestra el esquema del dispositivo. El equipo para realizar la experimentación de convección natural consta de tres cavidades cúbicas de $8[cm]$ por lado. Las paredes de las cavidades son de acrílico porque es un material semiconductor. Cuatro de las paredes tienen un espesor de $15[mm]$ para dar solidez a la estructura. Las dos restantes son de $3[mm]$ de espesor ya que se enfriara o calentara por ellas. Todas las cavidades van completamente cerradas. La figura 3-2 el modelo físico utilizado.

El dispositivo es enfriado por la parte superior y calentado por la parte inferior. El calentamiento se lleva a cabo con una resistencia eléctrica que es recubierta con yeso para un calentamiento uniforme. El yeso se coloca sobre una placa metálica y esta se coloca el acrílico de $3[mm]$ de espesor. El arreglo de la resistencia con el yeso se muestra en la figura 3-3. La figura 3-4 muestra el transformador variable con el cual se suministra el voltaje a la resistencia.

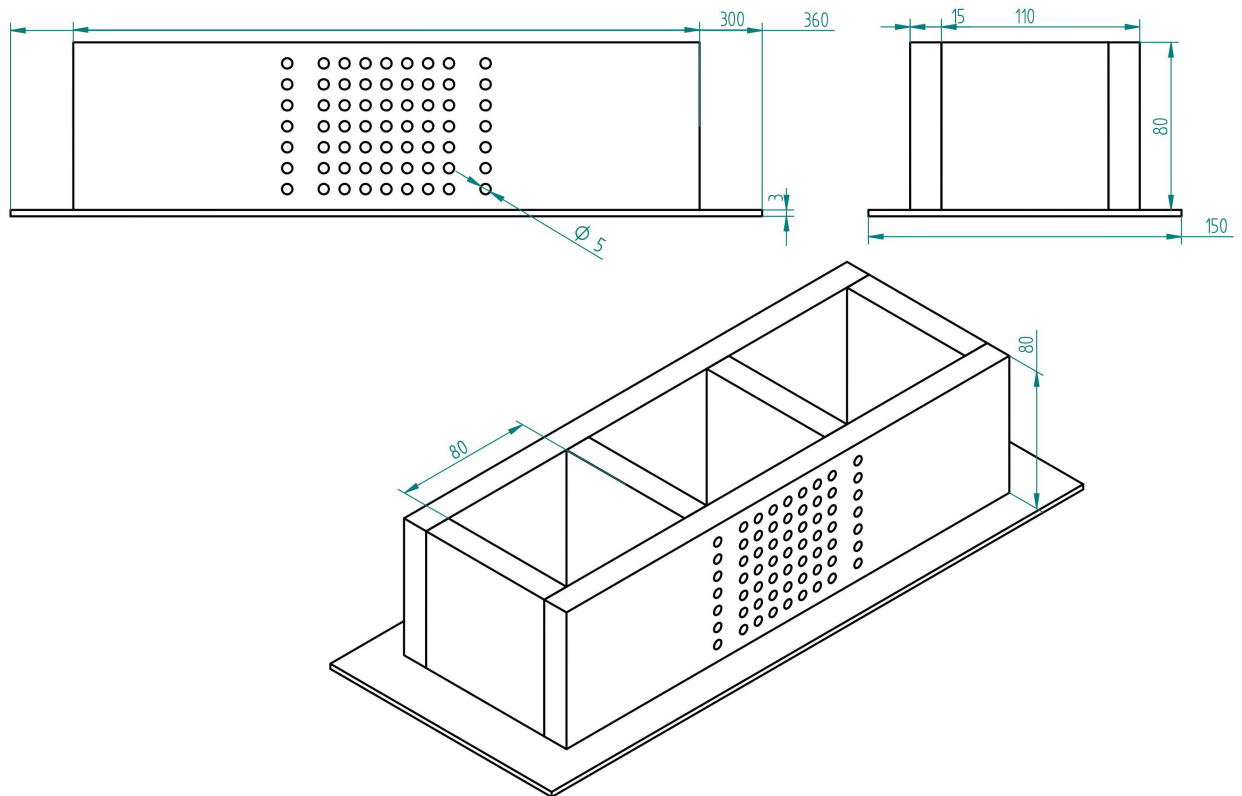


Figura 3-1: Esquema del equipo experimental (todas las medidas están en [mm])



Figura 3-2: Modelo Físico



Figura 3-3: Arreglo de yeso con la resistencia eléctrica

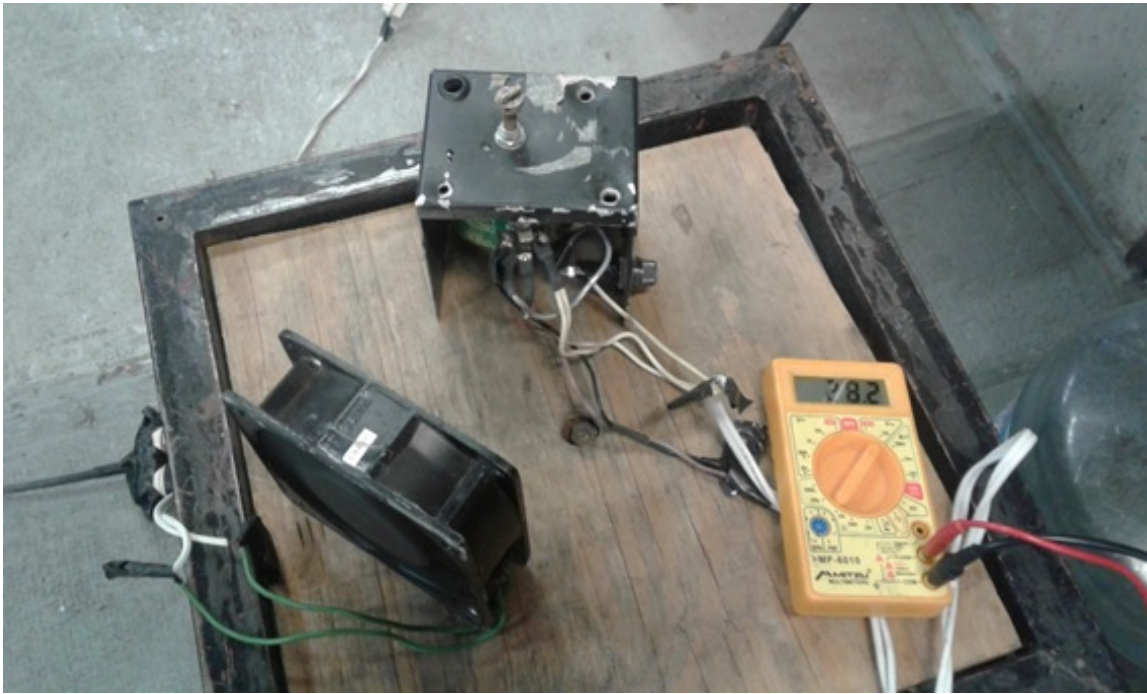


Figura 3-4: Transformador variable "variac" con un ventilador y un multímetro



Figura 3-5: Baño térmico

El enfriamiento se realiza por medio de un baño térmico. El agua se suministra a un canal rectangular a $20^{\circ}[C]$ que pasa por la parte superior del dispositivo experimental. En la figura 3-5 se muestra el baño térmico y en la figura 3-6 el canal de la parte superior del equipo.

En la parte posterior del dispositivo se realizan 63 barrenos de $5[mm]$ de diámetro sobre la cavidad central, 49 se encuentran dentro de la cavidad en contacto con el fluido y 14 son distribuidos en los muros laterales. En la figura 3-8 se muestran los barrenos en el modelo físico. En los orificios fueron colocados termopares tipo k, a un centímetro de profundidad como se muestra en la figura 3-9. El estudio se realiza en la cavidad central ya que se tiene una condición de simetría.

Los termopares cuentan con una punta soldada la cual censa le temperatura y está en



Figura 3-6: Canal en la parte superior del equipo

contacto con el fluido dentro de la cavidad. Ver figura 3-10. El otro extremo del sensor se colocó en un termómetro marca YEW Type 2572 Digital Thermometer que puede tener conectado hasta 30 termopares, se muestra en la figura 3-11.

El fluido de trabajo es una mezcla de agua con polvos CMC (Carboxi Metil Celulosa) con una concentración del 4% de peso. Para preparar el fluido se pesa 4[g] por litro de agua, se diluyen con ayuda de un batidor manual. Después se deja reposar por 24[hr] para que expulse las burbujas de aire. Ver figura 3-12. Las tres cavidades del dispositivo experimental se llenan completamente con el fluido de trabajo. Cada cuatro días se cambia el fluido ya que este se degrada y pierde sus propiedades físicas.

Para verificar que los termopares tengan un buen funcionamiento son colocados en hielo y después en agua hirviendo. En el primer caso marcaron $0^{\circ}[C]$ y en el segundo $93^{\circ}[C]$. Los termopares están en un rango de $\pm 0.3^{\circ}[C]$. Esto se realiza antes de colocarlos dentro de la cavidad.

La figura 3-7 muestra la numeración de los termopares dentro de la cavidad según como están colocados en el termómetro. De los 49 termopares colocados dentro de la cavidad solo se toman lecturas con 25.

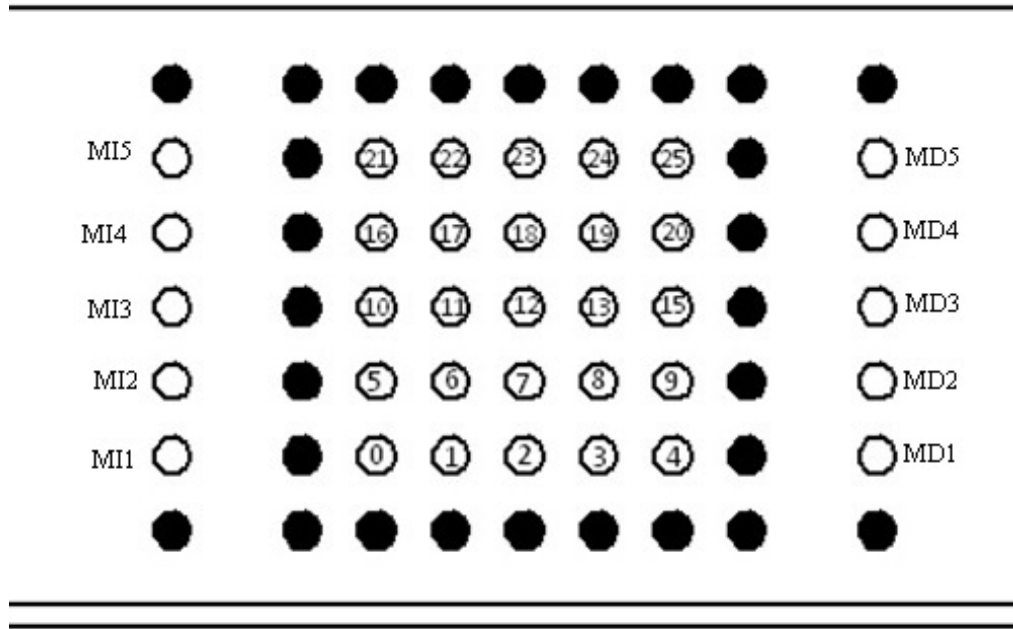


Figura 3-7: Numeración de los termopares en según su posición en la cavidad.



Figura 3-8: Barrenos en la cavidad central y los muros laterales

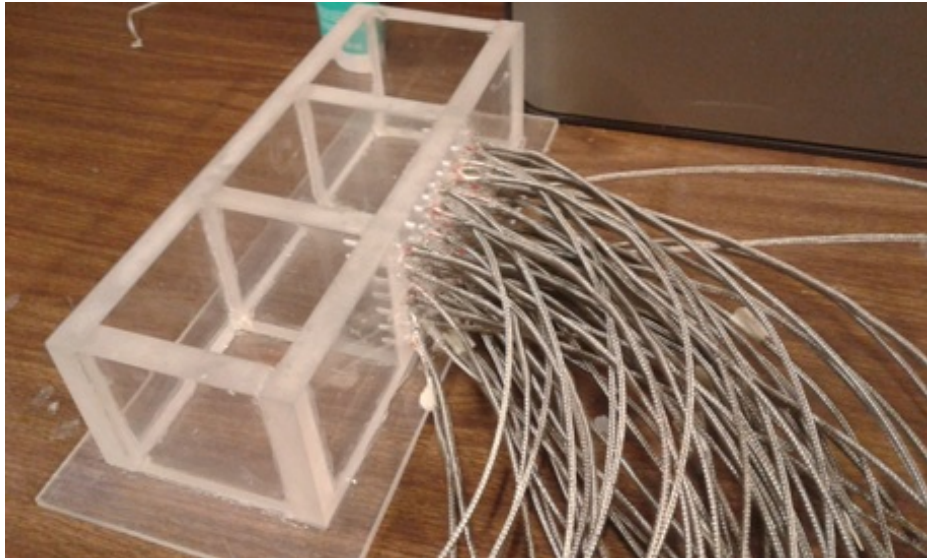


Figura 3-9: Termopares colocados en la cavidad.

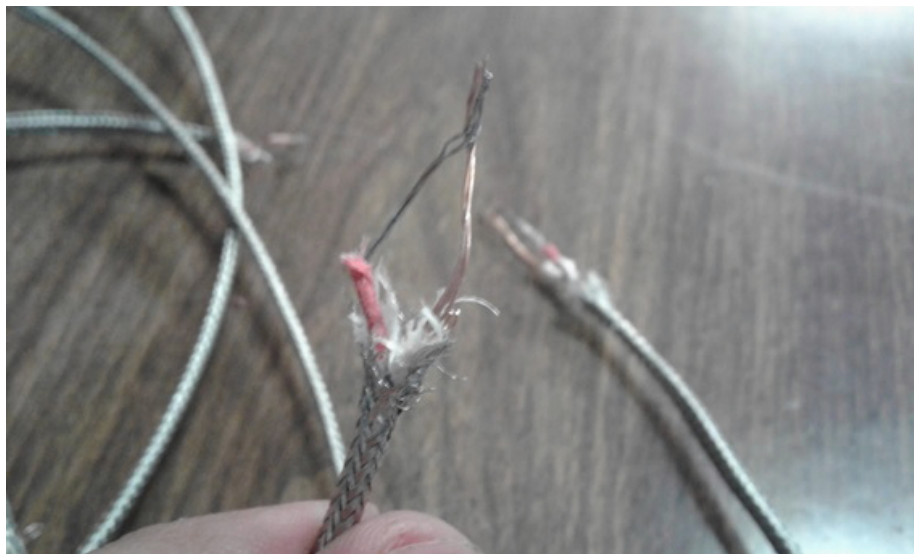


Figura 3-10: Extremo del termopar en contacto con el uído



Figura 3-11: Termómetro de 30 canales parte posterior



Figura 3-12: Herramientas para realizar hacer el fluido

3.2 Metodología experimental.

El primer paso para realizar los experimentos es fijar la temperatura del baño térmico que es $20^{\circ}[C]$. Después se fija un gradiente de temperaturas variando el voltaje de la resistencia. Cada gradiente de temperaturas está asociado a un número de Ra del cual se toman las lecturas de los termopares como del voltaje al momento que el sistema llega a un estado estable. En total se estudian 11 diferentes números de Ra con tres repeticiones cada uno dando un total de 33 experimentos. Al inicio y al final de cada experimento se tomó el valor de la resistencia eléctrica. El dispositivo experimental se deja funcionando $6[hr]$ para garantizar el estado permanente y se rectifica observando que la temperatura no varíe. En ese tiempo no se modifica ni el voltaje del “variac” ni la temperatura del agua.

3.3 Calor de advección

El calor de advección es determinado mediante un experimento con el mismo dispositivo usado anteriormente. En este caso el calentamiento es realizado por la parte superior y el enfriamiento por la parte inferior. Se fijan los mismos gradientes de temperatura que se estudiaron en el experimento de convección. Por las condiciones del experimento no se presenta flujo convectivo y se obtiene conducción pura.

Para obtener el calor por conducción se utiliza la fórmula

$$q_{co} = \frac{V_{co}^2}{R} \quad (3.1)$$

Donde V_{co} es el voltaje medido cuando el dispositivo es calentado por la parte superior y R el valor de la resistencia eléctrica.

Para determinar el calor suministrado en los experimentos de convección se utiliza la formula

$$q_c = \frac{V_c^2}{R} \quad (3.2)$$

Donde V_c es el voltaje medido cuando el dispositivo es calentado por la parte inferior.

El calor de advección queda determinado por

$$q_v = q_c - q_{co} \quad (3.3)$$

Con estos valores se determina el Nusselt de advección por medio de la ecuación

$$Nu_{av} = \frac{q_v L}{3A_F \Delta T K_F} \quad (3.4)$$

Donde L es la longitud de la cavidad, A_F es el área en contacto con el fluido en la cavidad central, ΔT es el gradiente de temperaturas y K_F es la conductividad térmica del fluido.

El valor del Nusselt está dado por la ecuación

$$Nu = 1 + Nu_{av} \quad (3.5)$$

El valor de 1 en la ecuación 3.5 se determina de un balance de energía y se presenta por el calor conducido por el fluido.

Capítulo 4

Resultados

Como se menciona en el capítulo anterior se tomaron lecturas con de los 25 termopares dentro de la cavidad y cinco en cada pared lateral. Los resultados fueron procesados en el programa de OriginPro8. En este programa se gráfico la distribución de temperaturas y las isoterms. En el apéndice A se muestran los datos obtenidos de los 33 experimentos realizados.

En las figuras 4-1 y 4-2 se muestran la distribución de temperaturas y las isoterms respectivamente. Se puede decir que se tienen dos celdas convectivas. El fluido frío baja por la parte central y el caliente pegado a los muros. Por la forma que tiene las isoterms se observa que la celda del lado izquierdo es mayor a la del lado derecho y están inclinadas.

En las figuras 4-3 y 4-4 se muestra la misma configuración que en el caso anterior, se continua viendo dos celdas convectivas inclinadas.

En las figuras 4-5 y 4-6 continúan mostrando dos celdas convectivas, ya no se observan inclinadas pero la celda del lado izquierdo es más grande que la del lado derecho.

A partir de $Ra = 2.8 \times 10^5$ hasta un $Ra = 4.9 \times 10^5$ se observan dos celdas convectivas verticales simétricas, donde el fluido caliente sube por los muros y el fluido frío baja por la parte central de la cavidad. Ver figuras 4-7, 4-8, 4-9, 4-10, 4-11, 4-12, 4-13, 4-14, 4-15 y 4-16.

Con un $Ra = 5.4 \times 10^5$ se observa en las figuras 4-17 y 4-18 una evolución en el patrón de flujo, en este caso la celda del lado derecho se dividió en dos celdas, teniendo un total de tres celdas convectivas dentro de la cavidad.

La siguiente configuración es diferente a la anterior. Se presentan cuatro celdas convectivas. La celda que se encontraba del lado izquierdo se dividió en dos. Las dos celdas que se encuentran

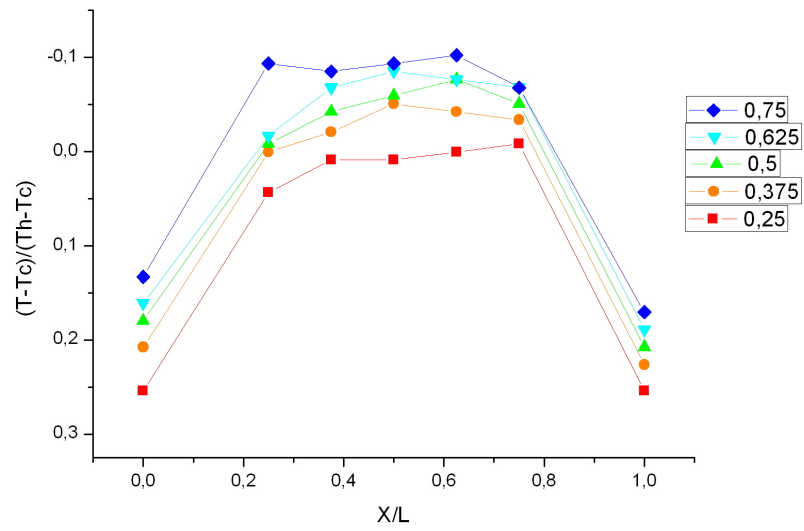


Figura 4-1: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 1.1 \times 10^5$

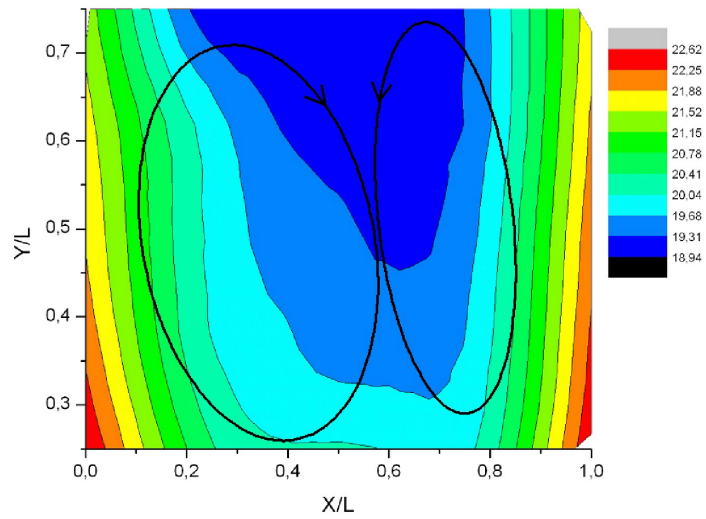


Figura 4-2: Isothermas dentro de la cavidad con $Ra = 1.1 \times 10^5$

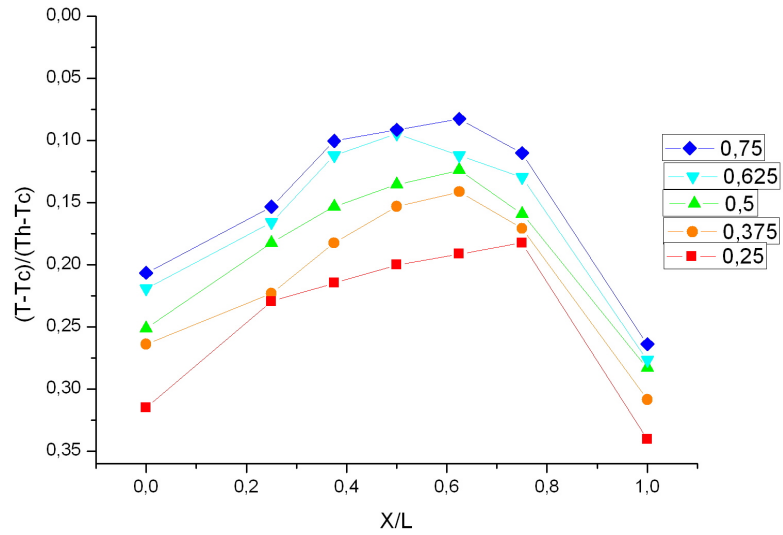


Figura 4-3: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 1.6 \times 10^5$

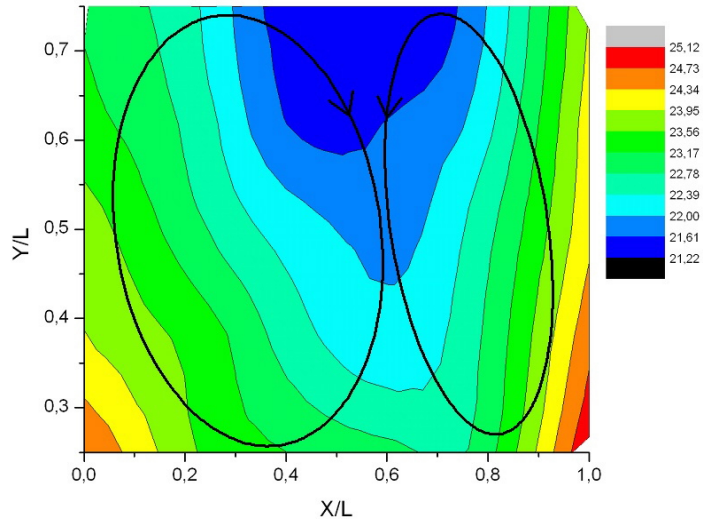


Figura 4-4: Isotermas dentro de la cavidad con $Ra = 1.6 \times 10^5$

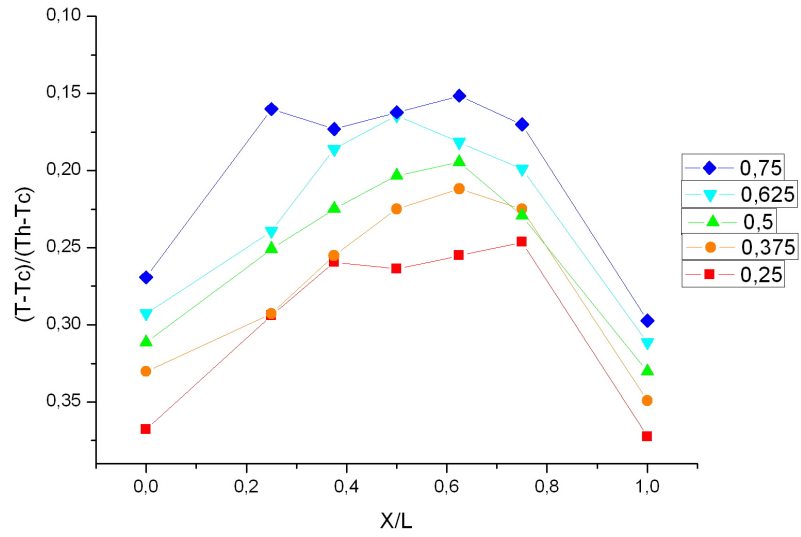


Figura 4-5: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 2.2 \times 10^5$

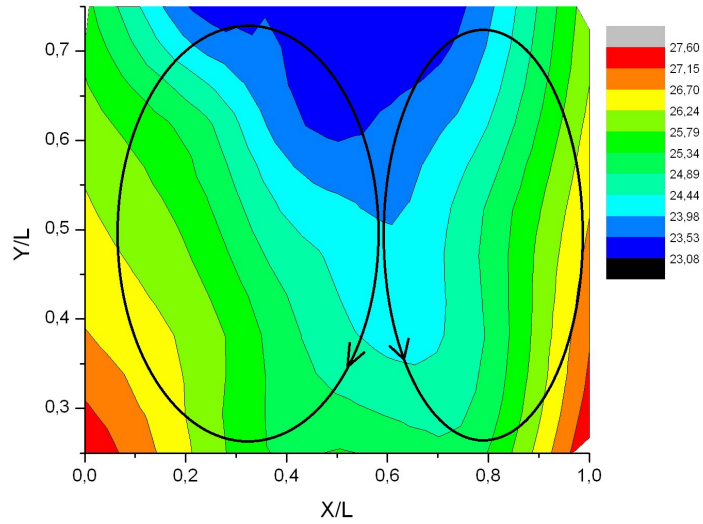


Figura 4-6: Isothermas dentro de la cavidad con $Ra = 2.2 \times 10^5$

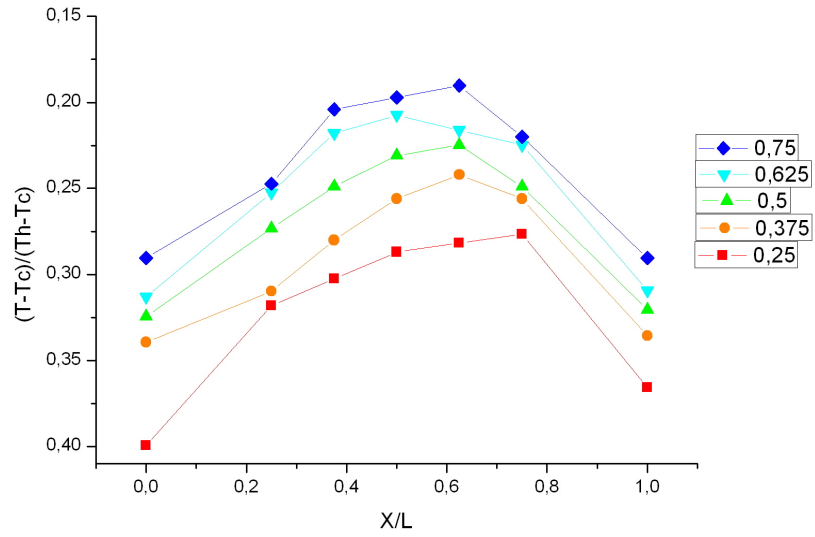


Figura 4-7: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 2.8 \times 10^5$

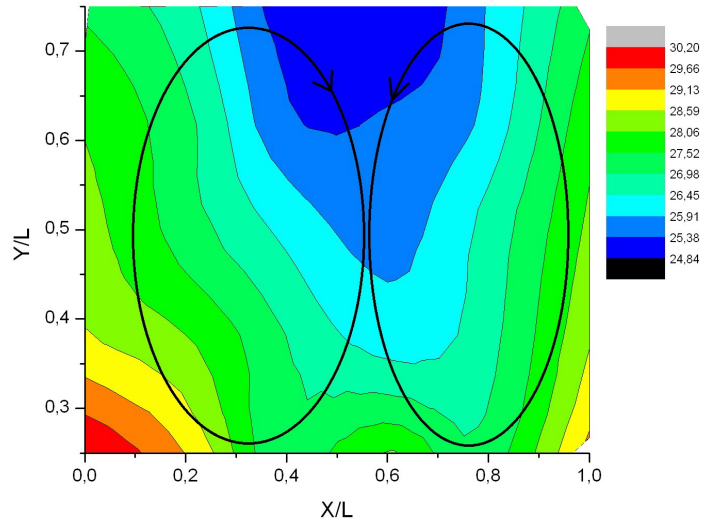


Figura 4-8: Isothermas dentro de la cavidad con $Ra = 2.9 \times 10^5$

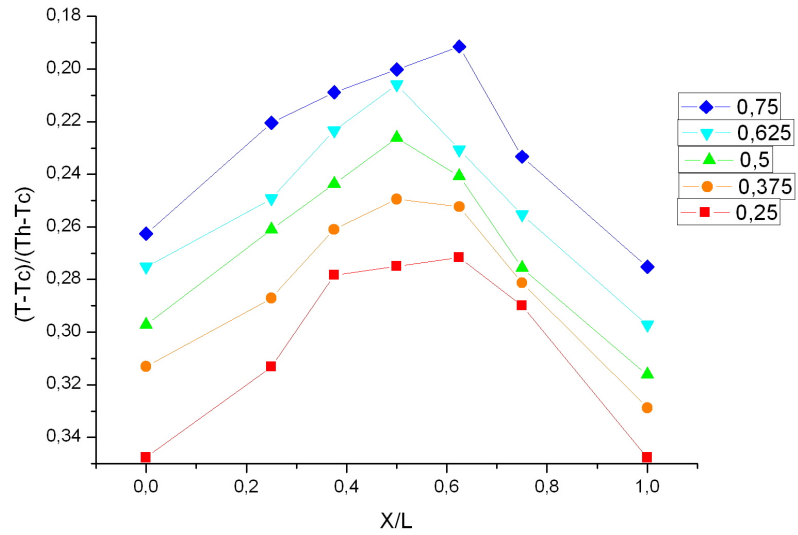


Figura 4-9: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 3.3 \times 10^5$

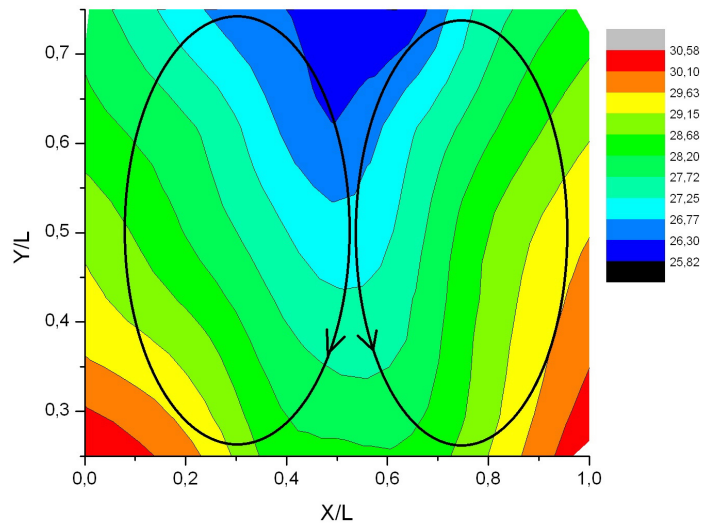


Figura 4-10: Isotermas dentro de la cavidad con $Ra = 3.3 \times 10^5$

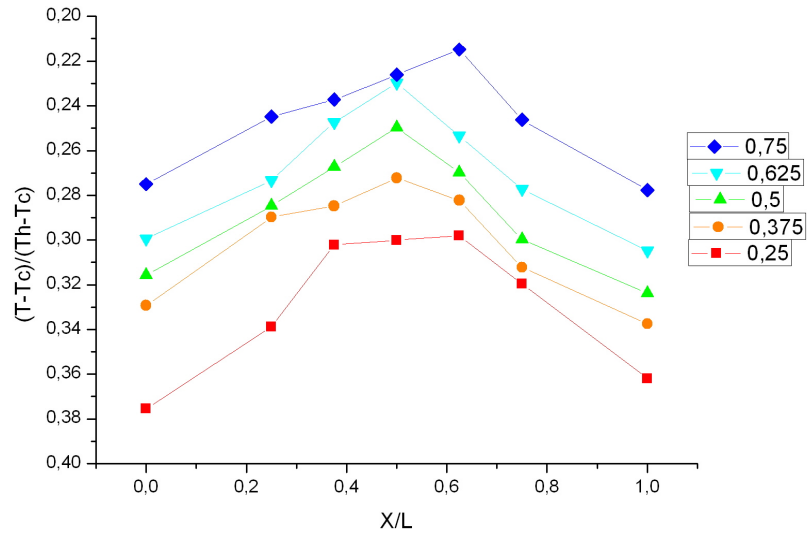


Figura 4-11: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 3.8 \times 10^5$

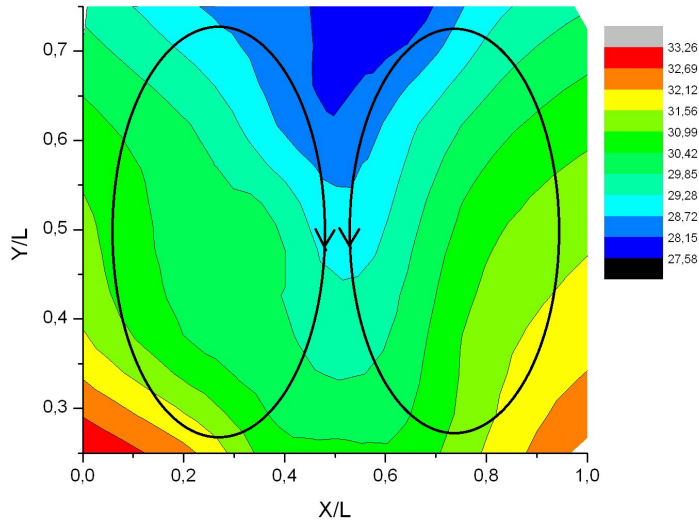


Figura 4-12: Isotermas dentro de la cavidad con $Ra = 3.8 \times 10^5$

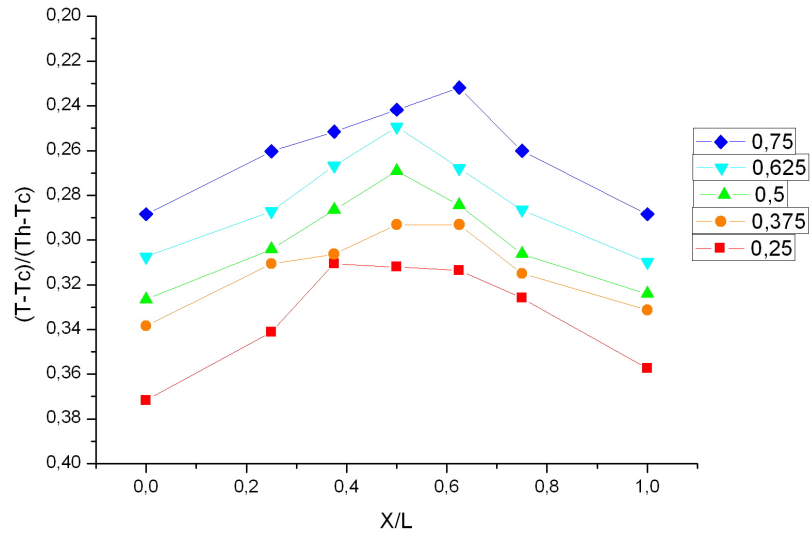


Figura 4-13: Distribución de temperaturas dentro la cavidad a $Ra = 4.3 \times 10^5$

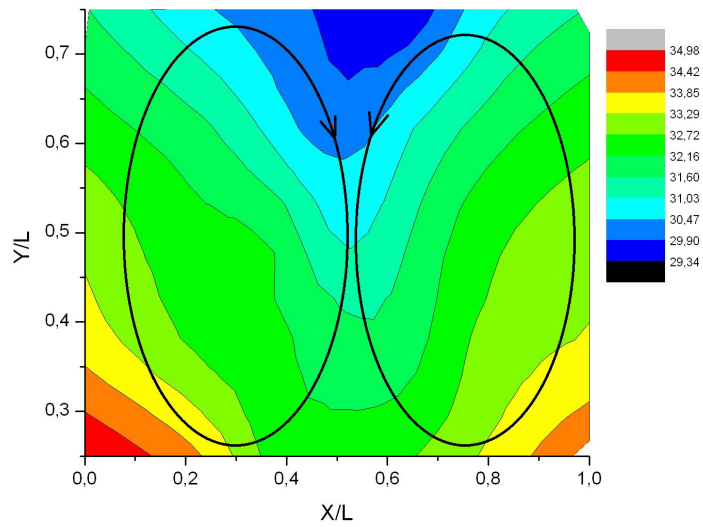


Figura 4-14: Isothermas dentro la cavidad con $Ra = 4.3 \times 10^5$

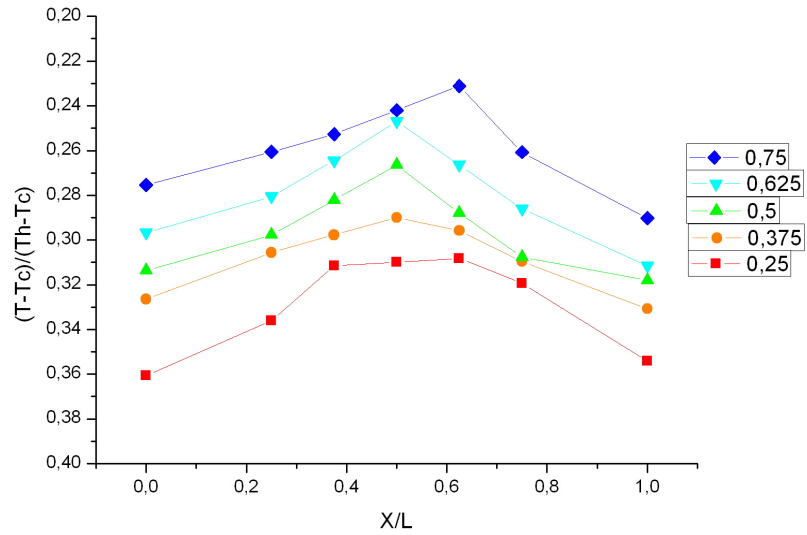


Figura 4-15: Distribución de temperaturas dentro la cavidad a $Ra = 4.9 \times 10^5$

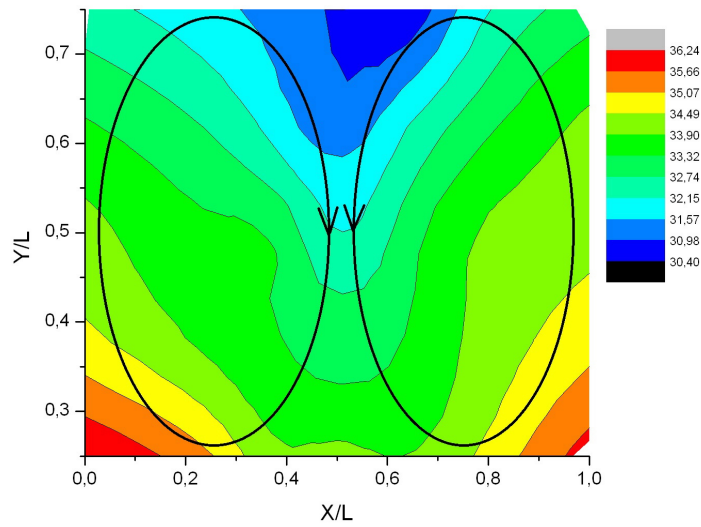


Figura 4-16: Isotermas dentro de la cavidad a $Ra = 4.9 \times 10^5$

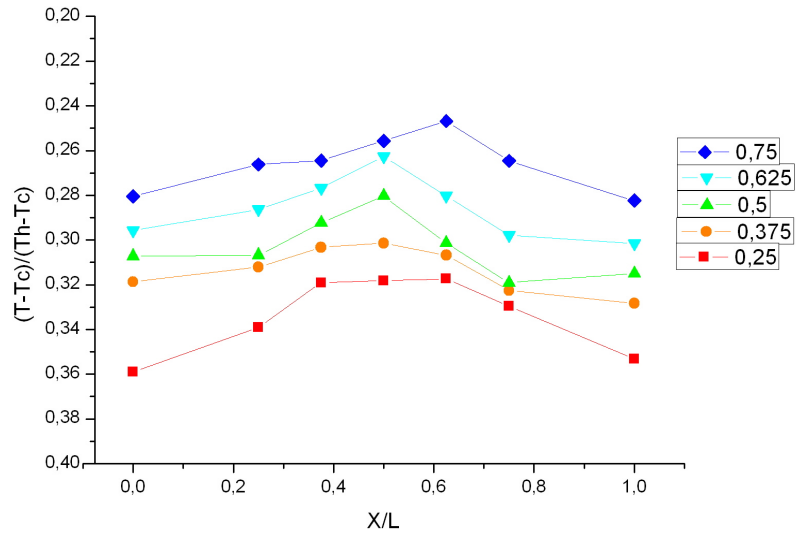


Figura 4-17: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 5.4 \times 10^5$

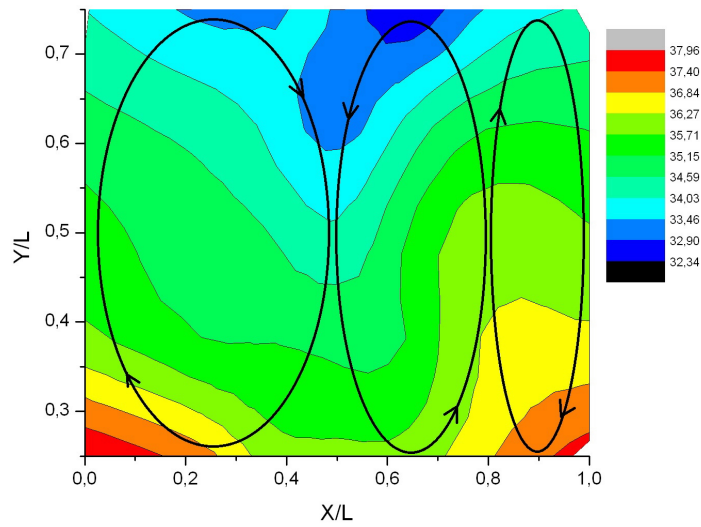


Figura 4-18: Isotermas dentro de la cavidad a $Ra = 5.4 \times 10^5$

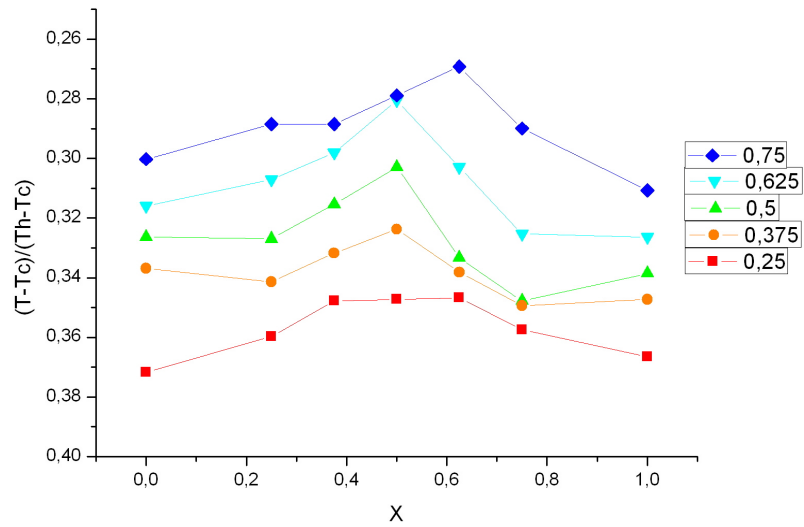


Figura 4-19: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 5.9 \times 10^5$

en la parte central son de tamaños similares y las que están en los extremos de la cavidad son más pequeñas. Esto se puede deber a un efecto tridimensional. Esto se observa en las figuras 4-19 y 4-20.

La última configuración que se observa son cuatro celdas convectivas del mismo tamaño. Las figuras 4-21 y 4-22 muestran la configuración.

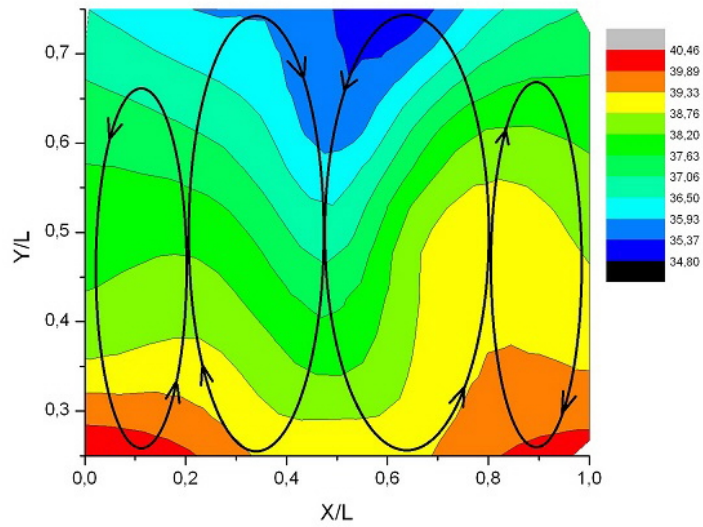


Figura 4-20: Isotermas dentro de la cavidad a $Ra = 5.9 \times 10^5$

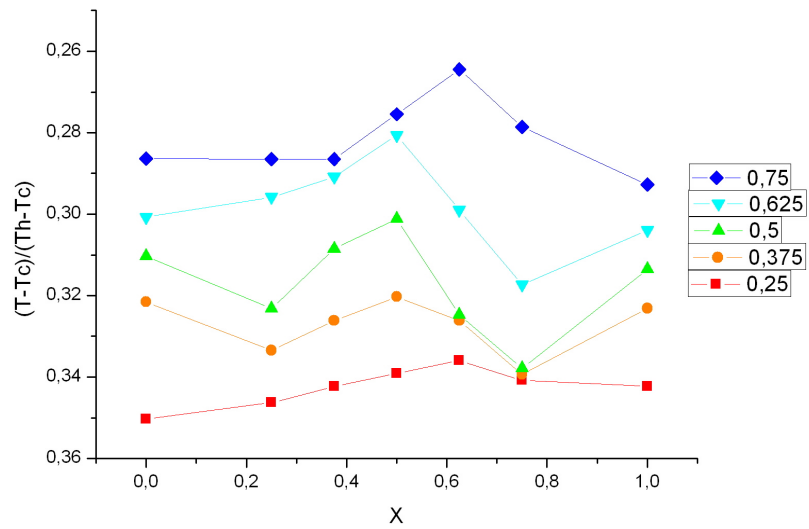


Figura 4-21: Distribución de temperaturas dentro de la cavidad con $Ra = 6.5 \times 10^4$

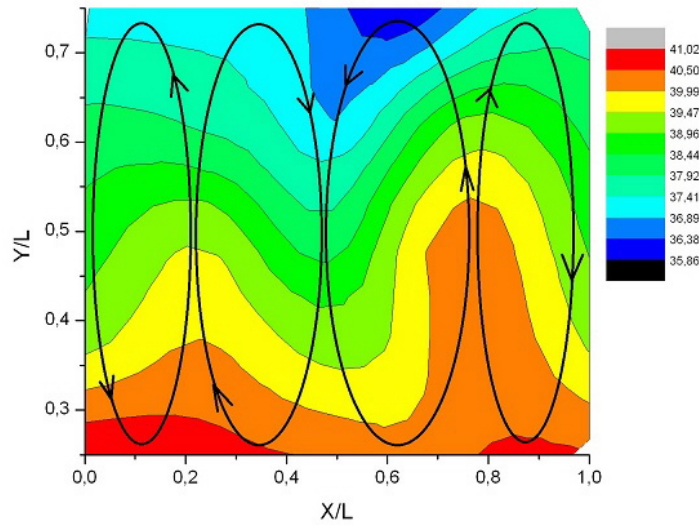


Figura 4-22: Isotermas dentro de la cavidad a $Ra = 6.5 \times 10^5$

4.1 Calor de advección y transferencia de calor

En la figura 4-23 gráfica se muestra la transferencia de calor en función del número de Ra . Por regresión lineal(4.2) el cálculo de la transferencia de calor se representa por la siguiente expresión:

$$Nu = 1.14 + (4.443 \times 10^{-7})Ra \quad (4.1)$$

Comparando la transferencia de calor entre el fluido pseudoplástico con el newtoniano se puede observar en la figura 4-24 como es mayor la transferencia de calor en el newtoniano.

En la figura 4-23 gráfica se muestra la transferencia de calor en función del número de Ra . Por regresión lineal(4.2) el cálculo de la transferencia de calor se representa por la siguiente expresión:

$$Nu = 1.14 + (4.443 \times 10^{-7})Ra \quad (4.2)$$

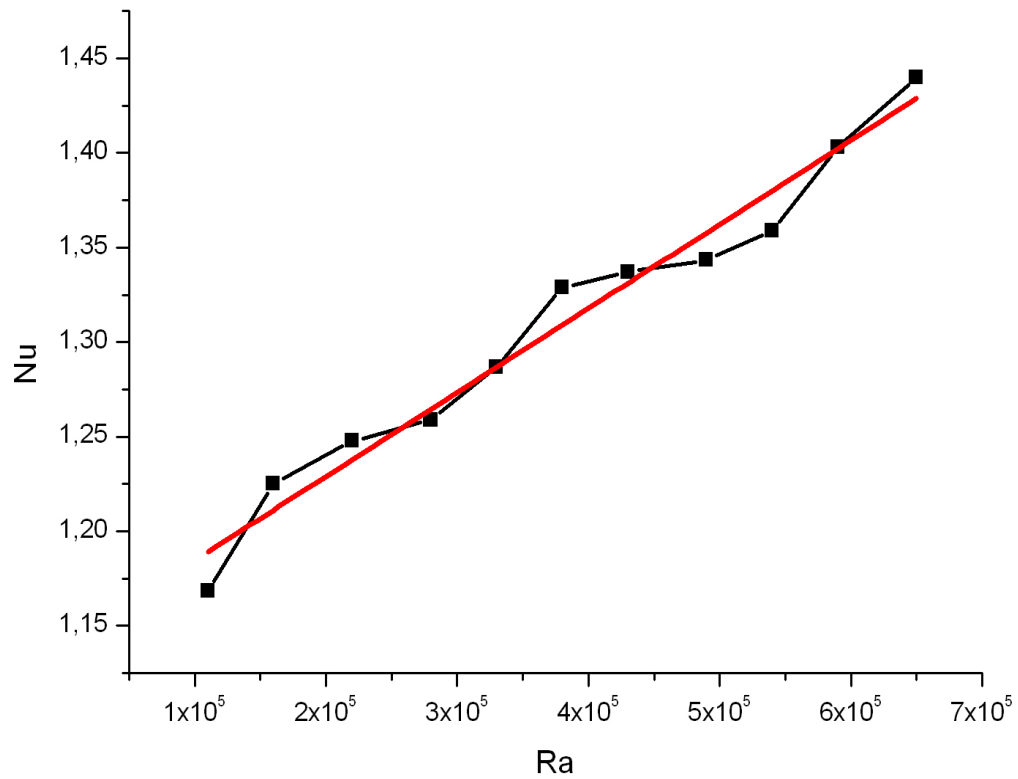


Figura 4-23: Gráfica del número de Nu contra Ra

Comparando la transferencia de calor entre el fluido no newtoniano con el newtoniano se puede observar en la figura 4-24 como es mayor la transferencia de calor en el newtoniano.

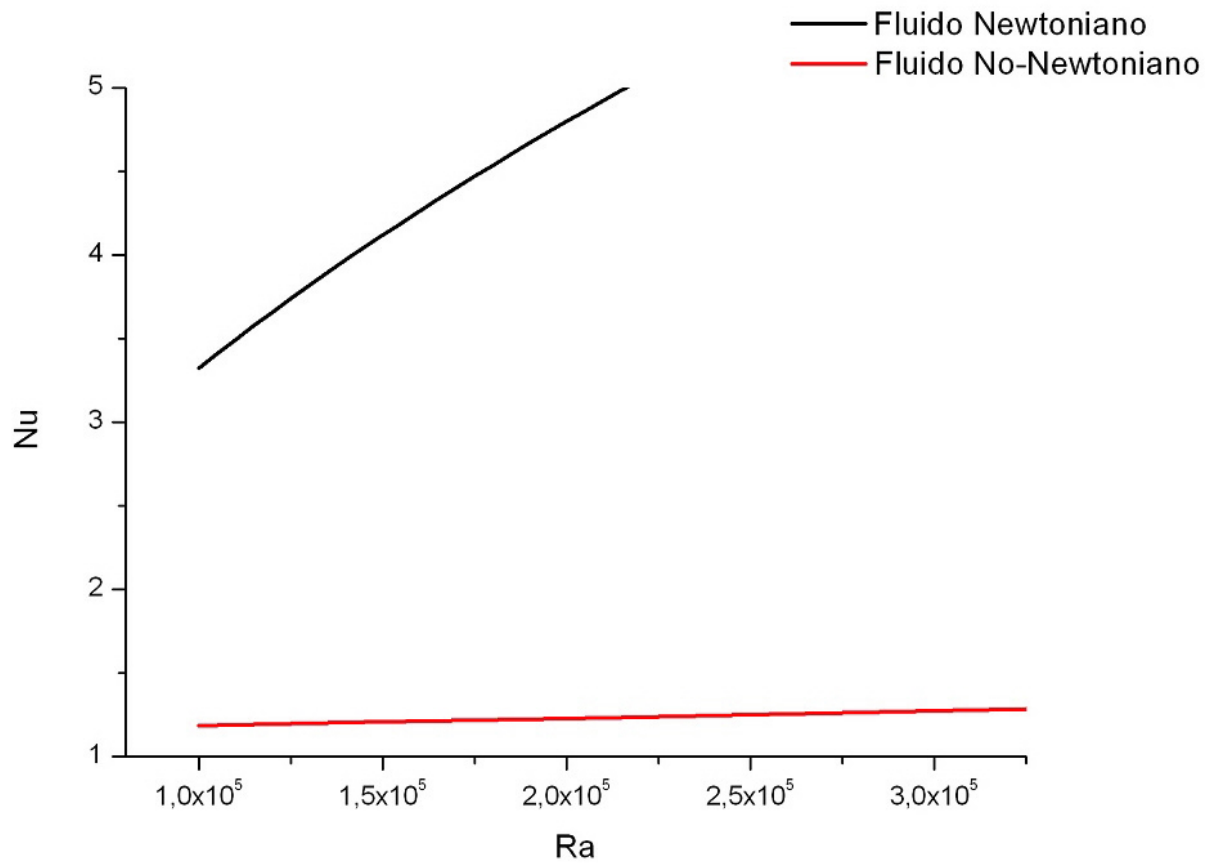


Figura 4-24: Comparación de transferencia de calor entre un fluido newtoniano y no-newtoniano

4.2 Distribución de temperaturas en muros

La distribución de temperaturas en los muros de la cavidad presentan diferentes comportamientos, a partir de un $Ra = 1.1 \times 10^5$ hasta un $Ra = 3.3 \times 10^5$. Ver figura 4-25. De $X/L = 0.25$ a $X/L = 3.5$ se observa una diferencia entre las pendientes del muro derecho e izquierdo y a partir de $X/L = 0.35$ se presentan pendientes muy similares. El muro derecho tiene mayor temperatura que el izquierdo, esto se puede deber a que no se conoce como es el patrón de flujo en las cavidades que están a los lados. Se puede inducir que ambas cavidades tienen el mismo patrón de flujo. El fluido caliente dentro de esas cavidades sube por su muro izquierdo mientras que el fluido frío baja por el lado derecho.

Desde un $Ra = 3.8 \times 10^5$ hasta un $Ra = 4.3 \times 10^5$ cambia la distribución de temperaturas en los muros de la cavidad central. Ver figura 4-26. En este caso la temperatura en el muro izquierdo es mayor a la del muro derecho. A partir de un $Ra = 4.9 \times 10^5$ hasta un $Ra = 6.5 \times 10^5$ regresa a la distribución de temperatura en los muros donde el muro derecho tiene mayor temperatura que el izquierdo. Ver figura 4-27. El mismo cambio en las pendientes que se observa en un $Ra = 3.3 \times 10^5$ se presenta en los casos descritos anteriormente.

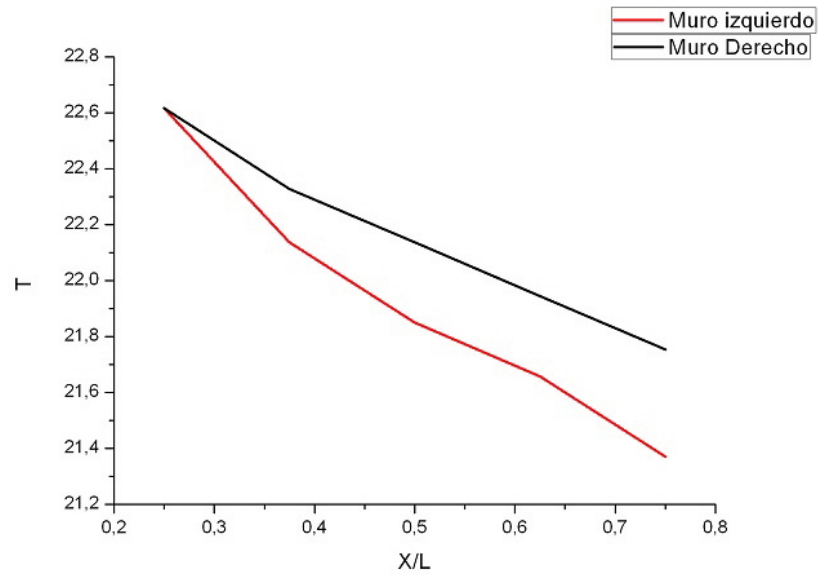


Figura 4-25: Distribución de temperaturas en muros con un $Ra = 1.1 \times 10^5$

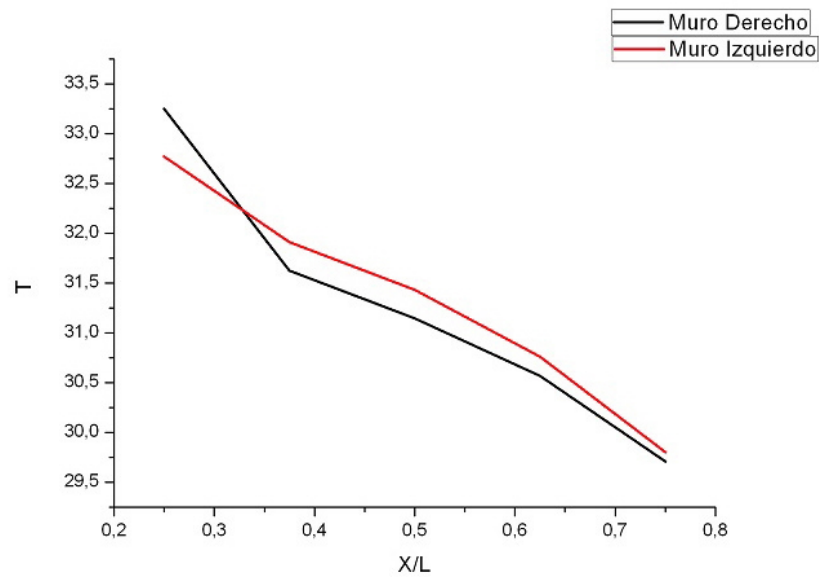


Figura 4-26: Distribución de temperaturas en muros con un $Ra = 3.8 \times 10^5$

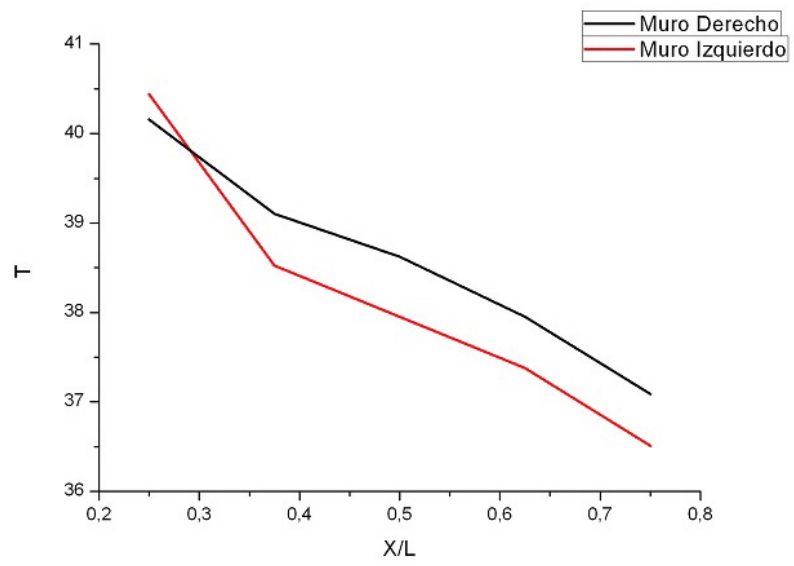


Figura 4-27: Distribución de temperaturas en los muros con un $Ra = 6.5 \times 10^5$

Capítulo 5

Conclusiones

El objetivo de este trabajo es el estudio de la convección natural en una cavidad cúbica con un gradiente de temperatura. A partir de los experimentos realizados se puede llegar a las siguientes conclusiones.

La transferencia de calor aumenta de manera monótona al incrementar el número de Rayleigh. Se presentan tres configuraciones diferentes, la primera es de dos celdas convectivas después se presentan tres celdas y por último de cuatro celdas.

En $Ra = 1.1 \times 10^5$ y $Ra = 1.6 \times 10^5$ se presentan las dos celdas convectivas pero se encuentran inclinadas.

A partir de $Ra = 2.2 \times 10^5$ hasta $Ra = 4.9 \times 10^5$ se observa la misma configuración de dos celdas convectivas pero en este caso son simétricas.

En $Ra = 5.4 \times 10^5$ se muestra la configuración de tres celdas convectivas dos del mismo tamaño juntas y una tercera de mayor tamaño.

En $Ra = 5.9 \times 10^5$ y $Ra = 6.5 \times 10^5$ se muestra configuración de cuatro celdas convectivas del mismo tamaño.

La transferencia de calor en el fluido pseudoplástico es menor en comparación con el fluido newtoniano.

La distribución de temperaturas en los muros no corresponden a una línea recta ya que son de un material semiconductor y se ve influenciado por la temperatura del fluido dentro de la cavidad.

Bibliografía

- [1] White, F. M. (2004). *Mecánica de Fluidos*. España: Mc Graw Hill.
- [2] Incropera, F. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall.
- [3] Pellew, A., & Sputhwell, R. (1940). On maintained convective in a fluid heated from below. *Royal Soc*, 312-343
- [4] Gabanov, N. S. (2018). Natural convection in a cubical cavity with different heat source configurations. *Thermal Science and Engineering Progress*, 138-145.
- [5] Alloui, Z., & P.Vasseur. (2015). Natural convection of Carreau-Yasuda non-Newtonian fluids in vertical cavity heated from the sides. *International journal of heat and mass transfer*, 912-924.
- [6] Habbachi, F., & Ouestali, F. S. (2015). Three-dimensional simulation of natural convection in a cubic cavity partially filled porous media. *International Conference On Material and Energy* (págs. 617-623). La Rochelle: Elsevier.
- [7] Lemus-Modaca, R. A., & Moraga, N. O. (2013). Unsteady 2D conjugate natural non-Newtonian convection with non-Newtonian liquid sterilization in square cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73-81.
- [8] Meng-He, S., & Guan-Bang, W. (2019). Rayleigh-Bénard convection of non-Newtonian nanofluids considering Brownian motion and thermophoresis. *International Journal of Thermal Sciences*, 312-325.

- [9] Yu-Peng, H., & You-Rong, L. (2017). Flow pattern and heat transfer in Rayleigh-Bénard convection of cold water near its density maximum in a rectangular cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1065-1075.
- [10] Zhan, N. (2019). Experimental study on natural convective heat transfer in a closed cavity. *Thermal Science and Engineering Progress*, 132-141.
- [11] Sanchez Huerta, J. M. (Junio de 2008). Estudio experimental de la convección natural en una cavidad cubica con paredes conductoras. Ciudad de México, México.
- [12] Phino, F. (1990). Flow of non-Newtonian fluids in a pipe. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 129-144.
- [13] Ortega Tenorio, E. (2016). Estudio experimental de convección mixta alrededor de un cilindro en un fluido no Newtoniano. Ciudad de México, Ciudad de México, México: UNAM.

Apéndice A

En la siguiente tabla se muestran los datos del experimento de la Ronda 1.

Ronda 1											
Th	Ra=1.1x10 ⁵	Ra=1.6x10 ⁵	Ra=2,2x10 ⁵	Ra=2,9x10 ⁵	Ra=3,3x10 ⁵	Ra=3,8x10 ⁵	Ra=4,3x10 ⁵	Ra=4,9x10 ⁵	Ra=5,4x10 ⁵	Ra=5,9x10 ⁵	Ra=6,5x10 ⁵
0	29,6	35,1	40,5	45	51	55,3	60,3	65,6	70,5	74,8	79,5
1	22,9	27,2	31,5	34,8	39,304	41,4	43,8	47,9	47,9	50	51,1
2	22,5	26,4	30,2	33,1	37,629	39,7	42,1	45,8	46,3	48,5	49,2
3	22,5	26,7	31,5	34,5	38,863	41,2	43,8	48,1	47,6	50	51
4	22,6	27,1	31,9	35,2	39,304	41,4	44,4	48,8	48,1	50,5	51,8
5	22,6	26,8	30,1	33	37,013	39,3	42	45,9	45,8	48,6	49,8
6	22,1	25,9	29,8	32,8	37,189	39,5	41,2	44,9	45,1	47,1	49
7	21,8	25,3	30,1	33	37,453	39,8	42,2	45,9	46,4	48,6	48,8
8	21,5	25	29,9	32,8	36,66	38,4	40,8	44,5	44,2	46,4	47,6
9	21,7	25,4	29,7	32,4	36,484	38,9	41,2	44,9	45,1	47,3	49,1
10	21,7	25,6	29,4	32,3	35,867	37,7	40,3	43,9	43,3	45,2	46,4
11	21,9	25,2	29,8	32,6	36,924	39,3	41,2	45	45,3	47,4	49,1
12	21,3	24,9	30,1	32,3	36,572	39	40,7	44,5	44,4	45,9	48,7
13	21,2	24,6	28,5	31,3	35,162	36,9	39	42,4	42,4	44,4	45,5
14	21,4	24,9	28,9	31,7	35,603	37,7	39,8	43,6	43,9	46	47,4
15	22,2	26,1	29,4	32,4	36,572	38,9	41,4	45,3	45,6	47,7	49,4
16	21,9	25,6	29,9	32,8	37,101	39,1	41,3	45,1	45,5	47,6	49,1
17	21,2	24,4	28	30,7	34,281	36,1	38,3	41,5	42	43,9	45,4
18	21,5	25	29,2	32,2	36,484	38,8	41	44,9	45,4	47,5	49,1
19	21,7	25,5	29,2	32,2	36,396	38,7	41	44,7	45	47,4	49,1
20	21,4	24,9	28,4	31,1	35,074	37,1	39,6	43,1	43	45,1	46,5

Th= Temperatura caliente; Tc= Temperatura fría; MD= Temperatura del muro derecho; MI= Temperatura del muro izquierdo
 Para ver la posición de los termopares dentro de la cavidad ver figura 3-13

21	20,8	24	28,5	31,3	34,898	36,9	38,9	42,5	42,7	44,9	45,6
22	21	24,2	27,8	30,5	34,104	36	38,2	41,4	41,9	43,7	45
23	21	24,2	27,8	30,4	34,193	36,2	38,3	41,6	42,1	44,1	45,3
24	20,6	23,7	27,5	29,8	33,928	36	37,2	43,4	42,7	44,4	47,7
25	21,9	25,7	29,3	32,3	36,66	38,8	41,3	45,1	45,4	47	49,2
Tc	19,9	19,9	19,8	19,8	20	20	19,9	20	20	20	20
MD1	21,9	26	29,4	31,6	36,3	37,5	39,6	42,5	42,5	44	45
MD2	21,4	26,7	29,8	33,3	37,1	38,5	40,6	43,7	44	45,6	45,6
MD3	22,2	27,3	30,6	33,3	37,6	39,2	41,4	44,8	44,8	46,5	47
MD4	21,7	27,8	30,9	33,8	38,3	39,5	42	45,5	46,3	47,4	48
MD5	22,6	28,6	32,1	35,1	40,2	41,2	44	47,8	48,2	49,9	50,7
MI1	20,8	27,2	29,8	32,6	35,6	38	39	42,8	42,8	44,2	46,4
MI2	21,9	27,4	30,3	33	36,5	38,8	40,1	43,6	43,6	45,2	47,4
MI3	21,9	27,8	30,7	33,5	36,9	39,3	40,4	44,4	44,5	46	48,2
MI4	22,1	28,1	31,2	34,2	37,3	39,9	40,9	45,1	45,2	46,5	49,1
MI5	22,9	28,8	31,6	35,3	38,6	41,5	42,1	46,6	47,1	48,4	51,3

Th= Temperatura caliente; Tc= Temperatura fría; MD= Temperatura del muro derecho; MI=Temperatura del muro izquierdo
Para ver la posición de los termopares dentro de la cavidad ver figura 3-13

En la siguiente tabla se muestran los datos del experimento de la Ronda 2.

Ronda 2											
Th	Ra=1.1x10 ⁵	Ra=1.6x10 ⁵	Ra=2,2x10 ⁵	Ra=2,9x10 ⁵	Ra=3,3x10 ⁵	Ra=3,8x10 ⁵	Ra=4,3x10 ⁵	Ra=4,9x10 ⁵	Ra=5,4x10 ⁵	Ra=5,9x10 ⁵	Ra=6,5x10 ⁵
0	30,3	35	40,4	45,5	50,1	55,3	60,5	64,6	70,5	75,5	79,5
1	20,4	23,4	26	28,7	30,4	33,1	35	36,5	38,9	43,6	44,8
2	20,1	23,2	25,3	27,1	29,4	32,6	32,8	34,6	37,5	41,3	42
3	20,1	23	25,4	27,6	29,7	32,9	32,2	35,4	38,7	41,9	41,6
4	20	22,9	25,2	28,1	31,1	33,4	35,4	36,2	40	43,8	45,3
5	19,9	22,7	25	27,1	29,4	32,8	33	35	37,6	41,6	42,3
6	20	23,3	26	27,9	29,2	32,3	32,8	35,7	37,9	40,8	41,7
7	19,8	22,7	25,2	27,1	29,4	32,7	32,4	34,3	36,7	40,3	41,5
8	19,5	22,3	24,6	26,5	28,6	31,3	32,3	33,8	36,2	39,3	40,8
9	19,6	22,1	24,3	26,2	28,4	31,7	32,2	34	36,5	39,9	41
10	19,7	22,6	24,6	26,5	28,7	31	33	34,2	36,8	39,7	41,2
11	19,9	22,7	25,5	27	29,2	32	32,7	34,5	36,9	40,9	41,7
12	19,6	22,3	24,6	26,4	28,6	31,7	32,6	34,5	36,9	40,6	41,5
13	19,4	22	24,3	25,9	28	30,7	31,5	33,1	35,1	37,9	39,4
14	19,2	21,9	24	25,7	27,9	30,8	31,7	33,4	35,6	38,9	40
15	19,5	22,4	24,7	26,3	29	32,3	32,6	34,5	37,2	40,6	41,9
16	19,8	22,5	24,9	26,8	28,6	32	32,9	34,5	36,5	41,2	42
17	19,3	21,7	23,8	25,6	27,7	30,5	31,6	33,2	35,6	38	39,9
18	19,1	21,4	23,4	25,3	27,1	29,3	30,9	32,4	35,2	39,2	39,5
19	19,2	21,7	23,7	25,5	28,2	31,8	32,3	32,9	35,6	39,9	41,4
20	19,3	21,9	24,1	25,7	28	30,8	31,8	33,4	36	39	40,4
21	19	22,3	23,3	26,3	27	29,4	31,2	32,8	34,9	37,5	39

Th= Temperatura caliente; Tc= Temperatura fría; MD= Temperatura del muro derecho; MI= Temperatura del muro izquierdo
 Para ver la posición de los termopares dentro de la cavidad ver figura 3-13

22	19,1	21,5	23,5	25,2	27,3	30,1	31,1	33	34,9	37,9	39,3
23	19	21,4	23,3	25	28,7	31,9	31,3	33,1	35	37,3	39,2
24	18,9	21,2	23,1	24,9	26,7	29	30,5	31,6	36,1	38,9	40,5
25	19,3	21,7	23,5	25,6	28,7	31,9	32,7	34,3	37,1	40,4	42,1
Tc	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
MD1	21,4	23,1	25,5	27,4	30,6	30,6	33	34,6	36,2	38,6	40,5
MD2	21,7	23,3	26	28	31,2	31,2	33,9	35,8	37,4	39,9	41,6
MD3	21,9	23,8	26,4	28,3	31,6	31,6	34,6	36,6	38,2	41,3	42,4
MD4	22,1	24	26,7	28,7	32,3	32,3	35,1	37,2	39,1	42,3	42,9
MD5	22,6	24,7	27,5	30,2	33,7	33,7	35,6	38,3	40,4	44,9	44,3
MI1	21,8	24	26,1	27,4	30,7	30,7	34,6	37	38,1	39,5	42,6
MI2	21,9	24,2	26,4	27,9	31,2	31,2	35,2	37,6	39,1	41	43,6
MI3	22,1	24,2	26,7	28,2	31,7	31,7	35,9	38	39,6	42	44,3
MI4	22,3	24,6	27,1	28,6	32,2	32,2	36,4	38,5	40,2	43	44,8
MI5	22,6	25,1	27,6	29,3	33,2	33,2	37,6	39,7	41,6	45,2	46,6

Th= Temperatura caliente; Tc= Temperatura fría; MD= Temperatura del muro derecho; MI=Temperatura del muro izquierdo
Para ver la posición de los termopares dentro de la cavidad ver figura 3-13

En la siguiente tabla se muestran los datos del experimento de la Ronda 3.

Ronda 3												
Th	Ra=1.1×10 ⁵	Ra=1.6×10 ⁵	Ra=2.2×10 ⁵	Ra=2.9×10 ⁵	Ra=3.3×10 ⁵	Ra=3.8×10 ⁵	Ra=4.3×10 ⁵	Ra=4.9×10 ⁵	Ra=5.4×10 ⁵	Ra=5.9×10 ⁵	Ra=6.5×10 ⁵	Ra=6.5×10 ⁵
0	29,7	35,5	40	44,9	50,4	55,3	60,3	65	70	75	80	80
1	20,9	24,3	24,9	27,6	29,5	32	33,7	35,1	37	39,8	40,8	40,8
2	20,4	23,4	24,1	26,7	28,5	30,7	32,5	34	36	39,1	40,5	40,5
3	20,6	23,8	24,1	26,6	28,4	30,6	32,6	34,1	36,1	39,3	40,4	40,4
4	20,2	23,2	23,9	26,5	28,3	30,5	32,6	33,9	35,9	39,1	40,2	40,2
5	20,2	23,2	24,1	26,6	28,8	31,3	33,1	34,4	36,5	39,7	40,4	40,4
6	20,4	23,3	24	27,2	28,7	30,2	32,5	33,8	35,6	38,8	40	40
7	20,4	23,5	23,7	26,7	27,9	30,1	32,3	33,4	35,2	38,2	39,6	39,6
8	20,2	23,2	23,5	26,3	27,6	29,6	31,8	33	35,1	37,8	39,2	39,2
9	19,9	22,8	23,5	26	27,7	30	31,8	33,3	35,3	38,6	39,6	39,6
10	20,1	23	24,1	26	28,6	31	32,7	33,9	36,1	39,2	40,4	40,4
11	20,2	23,3	23,4	26,1	27,9	30,1	32,3	33,4	35,3	38	39,4	39,4
12	19,9	23	23,3	25,8	27,4	30,1	32,2	33,4	34,6	37,3	38,5	38,5
13	19,8	22,6	23,1	25,5	26,9	28,8	30,8	32	34	36,7	38,1	38,1
14	19,9	22,9	23,4	26,1	27,3	29,5	31,5	33	35,1	38,3	39,5	39,5
15	20	23	24	26,4	28,4	30,6	32,3	33,8	36	39,1	40,3	40,3
16	20,4	23,4	23,8	26,3	27,6	29,6	31,6	32,6	34,3	36,9	37,7	37,7
17	19,8	22,6	23,1	25,4	26,8	28,7	30,8	31,9	33,8	36,4	37,5	37,5
18	19,8	22,6	23	25,4	26,3	28,1	30,1	31,1	33,1	35,4	36,8	36,8
19	19,9	22,9	23,4	25,6	27	28,9	30,8	32	34	36,7	37,9	37,9
20	19,8	22,6	23,4	25,7	27,8	29,8	31,5	32,9	34,9	37,9	39	39
21	19,7	22,6	22,9	25,3	26,7	28,6	30,5	31,7	33,3	35,9	37,2	37,2

Th= Temperatura caliente; Tc= Temperatura fría; MD= Temperatura del muro derecho; MI= Temperatura del muro izquierdo
 Para ver la posición de los termopares dentro de la cavidad ver figura 3-13

22	19,7	22,3	22,8	25,2	26,3	28,4	30,1	31,4	33,2	35,9	37,2
23	19,7	22,6	23	25,4	26,1	28	29,7	30,9	32,8	35,3	36,5
24	19,7	22,6	23,1	25,6	25,8	27,6	29,3	30,4	32,3	34,8	35,9
25	20	22,9	23,6	26,2	27,1	28,7	30,5	31,7	33,2	35,9	36,7
Tc	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
MD1	21,6	24,3	25,6	26,8	28	29,7	31,6	32,4	34	36,5	37,2
MD2	21,9	24,7	25,8	27,1	28,4	30,6	32,4	33,4	34,8	37,4	38
MD3	22	24,9	26,3	27,6	29	31,1	33,2	34,1	35,4	38	38,6
MD4	22,2	25,3	26,6	27,8	29,5	31,6	33,6	34,7	35,9	38,5	39,3
MD5	22,6	25,9	27,1	28,6	30,6	33,3	35	36,2	38	40,4	41
MI1	21,6	24,2	25,7	26,8	28,4	29,8	31,6	33,1	34,1	37,1	37,6
MI2	21,9	24,8	26,3	27,3	29	30,8	32,5	34	35,1	38	38,2
MI3	22	25,1	26,6	27,8	29,6	31,4	33,1	34,3	35,7	38,6	38,8
MI4	22,3	25,5	27,1	28,3	30	31,9	33,4	34,9	36,4	39,1	39,4
MI5	22,6	26,1	27,4	28,5	30,6	32,8	34,4	35,9	37,7	40,2	40,5

Th= Temperatura caliente; Tc= Temperatura fría; MD= Temperatura del muro derecho; MI=Temperatura del muro izquierdo
Para ver la posición de los termopares dentro de la cavidad ver figura 3-13