



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Unidad Azcapotzalco**

**Sección de Estudios de Posgrado e Investigación**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONVECCIÓN MIXTA  
LAMINAR Y OPUESTA EN UN CANAL CON CAVIDADES  
SIMÉTRICAS ABIERTAS: EFECTO DEL ÁNGULO DE  
INCLINACIÓN**

---

**T E S I S PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN TERMOFLUIDOS  
PRESENTA:**

**ING. VÍCTOR ERNESTO CÁRDENAS VALDERRAMA**

---

**DIRECTOR: DR. LORENZO ALBERTO MARTÍNEZ SUÁSTEGUI**



**CIUDAD DE MÉXICO ENERO 2017**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 12:00 horas del día 18 del mes de Enero del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME UA para examinar la tesis titulada:

“Estudio experimental de convección mixta laminar y opuesta en un canal con cavidades simétricas abiertas: Efecto del ángulo de inclinación”

Presentada por el alumno:

Cárdenas Valderrama Víctor Ernesto  
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro: 

A	1	5	0	6	2	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

Maestro en Ciencias en Termofluidos

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui

1er Vocal

Dr. Oscar Eladio Bautista Godínez  
Presidente

Dr. Eric Gustavo Bautista Godínez  
Secretario

Dr. Juan Pablo Escandón Colín  
2do Vocal

Dr. José Carlos Arcos Hernández  
3er Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Felipe Hernández Santiago

UNIDAD AZCAPOTZALCO  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México el día **18** del mes de **enero** del año **2017**, el que suscribe **Víctor Ernesto Cárdenas Valderrama** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Termofluidos** con número de registro **A150629**, adscrito a la **SEPI ESIME UA**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de **Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui** y cede los derechos del trabajo titulado **Estudio Experimental de Convección Mixta Laminar y Opuesta en un Canal con Cavidades Simétricas Abiertas: Efecto del Ángulo de Inclinación**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **lamartinezs@ipn.mx** y **cardenasv8@gmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

Víctor Ernesto Cárdenas Valderrama

## Agradecimientos

Agradezco al CONACYT por otorgarme la beca con número de registro 667921 durante los cuatro semestres de la maestría. También al proyecto de Ciencia Básica 2011 SEP-CONACYT con número 167474 y a la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, proyecto SIP 20161254 que hicieron posible esta investigación.

Este trabajo está dedicado a mi familia, principalmente a mis padres por creer en mí y apoyarme en cada instante del programa de maestría, y de quienes estoy agradecido y orgulloso. Así mismo, agradezco a mi pareja Adilene por su amor, apoyo y especialmente por su paciencia. También agradezco a mi asesor, el Dr. Lorenzo, quien siempre tuvo la disposición de apoyarme en el desarrollo del tema de investigación y en la dirección de la tesis, así como a compartirme su conocimiento, también por presionarme cuando yo empezaba a flojear. Al Dr. Israel, por su constante asesoría y soporte tanto en las cuestiones experimentales como en la elaboración de mi programa para la reducción de los datos, que sin ello, aún estaría calculando los datos en este momento. A todo el colegio de profesores de la MCTF, en especial al Dr. Oscar por enseñarnos lo valioso de los principios básicos y por los brevarios culturales con todas sus recomendaciones de libros (Frankenstein y Elogio a la locura, por mencionar los que le leí), al Dr. Arcos por hacernos pensar más y ver siempre más allá, al Dr. René por sus valiosas críticas en las exposiciones y por enriquecer nuestro lenguaje científico. Al Dr. Eric y al Dr. Juan Pablo por esas charlas en las titulaciones y por recomendarme el libro "Los Miserables", hasta el momento lo mejor que he leído. De la misma manera quiero agradecer al Instituto Politécnico Nacional y a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Azcapotzalco por haberme permitido realizar este trabajo.

*"Si su deseo es ser un auténtico hombre de ciencia y no un simple experimentalista, le aconsejo encarecidamente que se dedique a todas las ramas de la filosofía natural, incluidas las matemáticas."*

*Sr. Waldman a Victor Frankenstein  
Frankenstein, Mary Shelley*

# Índice general

Abstract . . . . .	7
Resumen . . . . .	8
<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	11
1.2. Motivación . . . . .	15
1.3. Objetivos . . . . .	16
<b>2. Materiales y Métodos</b>	<b>17</b>
2.1. Diseño Experimental . . . . .	17
2.2. Construcción e instrumentación de las fuentes generadoras de calor	19
2.3. Parámetros . . . . .	21
2.4. Reducción de datos . . . . .	22
2.5. Análisis de incertidumbre . . . . .	24
<b>3. Resultados</b>	<b>26</b>
3.1. Canal vertical, $Re = 700$ , $\gamma = 90^\circ$ . . . . .	26
3.2. $Re = 700$ , $\gamma = 60^\circ$ . . . . .	31
3.3. $Re = 700$ , $\gamma = 45^\circ$ . . . . .	36
3.4. $Re = 700$ , $\gamma = 30^\circ$ . . . . .	40
3.5. Canal horizontal, $Re = 700$ , $\gamma = 0^\circ$ . . . . .	43
3.6. Número de Nusselt promedio en el espacio y tiempo . . . . .	45
3.7. Efecto del número de Reynolds . . . . .	46
<b>4. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>A. Cálculo de pérdidas energéticas</b>	<b>56</b>

# Índice de figuras

2.1.	Diagrama esquemático del diseño experimental. (a) Tubo de rebo-sadero. (b) Tanque secundario. (c) Manguera flexible. (d) Sección con estructuras de malla, correctores de flujo y reducción progresiva. (e) Estructura de hierro (soporte). (f) Válvula ajustable. (g) Tanque principal. (h) Bomba centrífuga. (i) Baño térmico con refrigeración. . . . .	18
2.2.	(a) Dimensiones de cada fuente generadora de calor, configuración de la ranura maquinada y distribución de los barrenos empleados para insertar los termopares. (b) Despiece de la fuente generadora de calor de cada cavidad junto con todos sus componentes: (1) Espuma de poliuretano. (2) Resina epóxica. (3) Resistencia eléctrica de aleación níquel-cromo. (4) Resina epóxica (aislante eléctrico). (5) Placa de aluminio. (c) Parte posterior del elemento generador de calor ensamblado mostrando la distribución de los termopares a lo largo de la superficie de la placa de alumninio. . . . .	20
2.3.	Diagrama esquemático de la parte posterior de las placas de aluminio ilustrando las ubicaciones en el plano de medición para las distribuciones adimensionales promedio por columna $Z_i$ y por fila $X_i$ . . . . .	24
3.1.	Patrones de flujo para $Re = 700$ y $\gamma = 90^\circ$ para diferentes valores de $Ri^*$ . Las imágenes fueron tomadas en el plano central de la cavidad ( $Z = 0.5$ ). . . . .	28
3.2.	$Re = 700$ y $\gamma = 90^\circ$ para diferentes valores de $Ri^*$ : Imágenes superiores e inferiores: Valores promedio por columna ( $Z_i$ ) y promedio por fila ( $X_i$ ) de la diferencia de temperatura promedio a lo largo de la distancias adimensionales en dirección de la profundidad y la dirección axial durante transferencia de calor en estado estacionario para la cavidad izquierda ( $\Delta T_L$ ) y derecha ( $\Delta T_R$ ), respectivamente. . . . .	29
3.3.	Patrones de flujo a $Re = 700$ , $\gamma = 60^\circ$ y diferentes valores de $Ri^*$ . Las imágenes fueron tomadas en el plano central de la cavidad ( $Z = 0.5$ ). . . . .	32

3.4.	$Re = 700$ y $\gamma = 60^\circ$ : (a) y (b) Evolución temporal de la diferencia de temperatura promedio y del número de Nusselt promedio de cada cavidad, respectivamente. Los símbolos abiertos y cerrados corresponden a la cavidad superior e inferior, respectivamente. (c) y (d) Espectros normalizados de los números de Nusselt promedio para $Ri^* = 93,66$ y $Ri^* = 144,58$ , respectivamente. (e) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la cavidad derecha $\overline{Nu}_R$ como función del número de Nusselt promedio de la cavidad izquierda $\overline{Nu}_L$ . . . . .	34
3.5.	Variaciones temporales de los valores promedio por columna ( $Z_i$ ) y por fila ( $X_i$ ) de la diferencia de temperatura en dirección de la coordenada adimensional $Z$ y $X$ para $Re = 700$ , $\gamma = 60^\circ$ y $Ri^* = 93.66$ . . . . .	35
3.6.	Patrones de flujo para $Re = 700$ y $\gamma = 45^\circ$ a distintos números de $Ri^*$ . Las imágenes son capturadas en el plano central ( $Z = 0.5$ ). . . . .	37
3.7.	$Re = 700$ y $\gamma = 45^\circ$ : (a) and (b) Evolución temporal de la diferencia de temperatura promedio y del número de Nusselt promedio para cada cavidad, respectivamente. Los símbolos abiertos y cerrados corresponden a la cavidad superior e inferior, respectivamente. (c) Espectros normalizados de los números de Nusselt promedio para $Ri^* = 143,78$ . (d) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio de la cavidad inferior ( $\overline{Nu}_R$ ) como función del número de Nusselt promedio de la cavidad superior ( $\overline{Nu}_L$ ). . . . .	38
3.8.	Variaciones temporales de la diferencia de temperatura promedio por columna ( $Z_i$ ) y por fila ( $X_i$ ) a lo largo de la coordenada en dirección de la profundidad y la coordenada axial para $Re = 700$ , $\gamma = 45^\circ$ y $Ri^* = 143,78$ , respectivamente. . . . .	39
3.9.	Patrones de flujo para $Re = 700$ , $\gamma = 30^\circ$ y distintos valores de $Ri^*$ . Las imágenes fueron tomadas en el plano central de la cavidad ( $Z = 0.5$ ). . . . .	41
3.10.	$Re = 700$ , $\gamma = 30^\circ$ y diferentes valores de $Ri^*$ : Imágenes superiores e inferiores: Valores promedio por columna ( $Z_i$ ) y por fila ( $X_i$ ) de la diferencia de temperatura promedio a lo largo de la distancias adimensionales en dirección de la profundidad y la dirección axial durante transferencia de calor en estado estacionario para la cavidad izquierda ( $\Delta T_L$ ) y derecha ( $\Delta T_R$ ), respectivamente. . . . .	42

3.11. $Re = 700$ , $\gamma = 0^\circ$ para $Ri^* = 31,95y53,36$ : Imágenes superiores e inferiores: Valores promedio por columna ( $Z_i$ ) y por fila ( $X_i$ ) de la diferencia de temperatura promedio a lo largo de la distancias adimensionales en dirección de la profundidad y la dirección axial durante transferencia de calor en estado estacionario para la cavidad izquierda ( $\Delta T_L$ ) y derecha ( $\Delta T_R$ ), respectivamente. . . . .	44
3.12. Efecto de la orientación del canal ( $\gamma$ ) sobre la respuesta térmica para $Re = 700$ y distintos valores del $Ri^*$ . Los símbolos cerrados y abiertos corresponden a la cavidad inferior y superior, respectivamente. . . . .	45
3.13. (a) Flujo de calor convectivo neto por unidad de área transferido al fluido para diferentes valores de $Re$ y $Ri^*$ . (b) Diferencia de temperatura registrada entre la temperatura de referencia y la temperatura superficial promedio de la fuente de calor de cada cavidad $\Delta T = \bar{T}_{wj} - T_0$ para diferentes valores de $Re$ y $Ri^*$ . . . . .	47
3.14. (a) Efecto de los número de $Re$ y $Ri^*$ sobre la transferencia de calor global. (b) Número de Nusselt promedio en el espacio y tiempo en función del $Re$ para diferentes valores del $Gr^*$ . En (a) y (b), los símbolos cerrados y abiertos corresponden a la cavidad inferior y superior, respectivamente. . . . .	48
A.1. Distribución de resistencias adyacentes en las fuentes de calor. . .	56



# Índice de cuadros

3.1.	Respuesta térmica promedio para $Re = 700$ y $\gamma = 90^\circ$ . . . . .	27
3.2.	Respuesta térmica promedio para $Re = 700$ and $\gamma = 60^\circ$ . . . . .	31
3.3.	Respuesta térmica promedio para $Re = 700$ y $\gamma = 45^\circ$ . . . . .	36
3.4.	Respuesta térmica promedio para $Re = 700$ y $\gamma = 30^\circ$ . . . . .	42
3.5.	Respuesta térmica promedio para $Re = 700$ y $\gamma = 0^\circ$ . . . . .	43
3.6.	Flujo de calor convectivo por unidad de área transferido al fluido en función del $Ri^*$ para $Re = 700$ y $\gamma = 90^\circ$ . . . . .	46
3.7.	Coefficientes de ajuste de curva para las Ecs. (3.3) y (3.4) . . . . .	49

## Abstract

An experimental study in a recirculating water channel with a square cross section is carried out to study the transient laminar opposing mixed convection heat transfer from two symmetric open cubic cavities. The walls of the cavities facing the openings are subject to a constant wall heat flux boundary condition, the other bounding walls of the cavities and the channel are insulated and adiabatic. The experiments are done under different values of buoyancy strength or modified Richardson number,  $Ri^* = Gr^*/Re^2$  from 32.17 to 300.77, channel inclination of  $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ , Reynolds number of  $500 \leq Re \leq 1500$ , and a fixed Prandtl number of  $Pr = 7$ . Mean surface temperature distributions and averaged Nusselt numbers have been obtained. Results indicate that depending on the channel orientation and buoyancy strength, the flow and temperature distributions experience an oscillatory behavior and are not symmetric with respect to the channel centerline. In addition, at high  $Ri^*$  numbers, spanwise and axial variation of the heat transfer rates has been reported, elucidating the strong three-dimensional (3D) nature of the flow. Empirical correlations for the overall Nusselt number of each cavity are also developed for relations using the Reynolds and modified Grashof numbers over the range of physical parameters considered in this study.

## Resumen

En este trabajo de investigación se lleva a cabo un estudio experimental de transferencia de calor por convección mixta en un canal de sección transversal cuadrada con dos cavidades cúbicas, simétricas y abiertas. Las paredes que se encuentran frente a las aperturas de ambas cavidades están sujetas a un flujo de calor uniforme y las demás paredes de las cavidades y del canal están aisladas y son adiabáticas. Los experimentos se realizaron para un intervalo del número de Reynolds de  $Re = 500$  a  $1500$ , ángulos de inclinación del canal de  $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ , diferentes valores del parámetro de flotación o número de Richardson modificado,  $Ri^* = Gr^*/Re^2$  que van desde  $32.17$  hasta  $300.77$  empleando un número de Prandtl fijo de  $Pr = 7$ . Se han obtenido distribuciones de temperatura superficiales promedio y números de Nusselt promedio. Los resultados indican que dependiendo de la orientación del canal y de la fuerza de flotación, las distribuciones de flujo y de temperatura tienen un comportamiento oscilatorio y que éstas no son simétricas con respecto al plano central del canal. Además, para valores altos de  $Ri^*$ , se observan variaciones de la velocidad de transferencia de calor en dirección de la profundidad y en dirección axial, las cuales ilustran la fuerte naturaleza tridimensional (3D) del flujo. Se obtuvieron correlaciones empíricas para estimar el valor del número de Nusselt global de cada cavidad y que involucran los números de Reynolds y de Grashof modificado en el intervalo de parámetros físicos considerados en el presente estudio.