



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

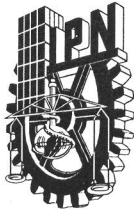
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONVECCIÓN MIXTA LAMINAR PARA FLUJO OPUESTO EN UN CANAL VERTICAL DE LONGITUD FINITA SUJETO A FUENTES DE CALOR ISOTÉRMICAS, SIMÉTRICAS Y DISCRETAS

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

PRESENTA:
JUAN MANUEL CASILLAS NAVARRETE

DIRECTOR: DR. LORENZO ALBERTO MARTÍNEZ SUÁSTEGUI
MÉXICO D. F. OCTUBRE 2012





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 26 del mes de Septiembre del 2012 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 para Flujo Opuesto en un Canal Vertical de Longitud Finita Sujeto a Fuentes de Calor Isotérmicas, Simétricas y Discretas

Presentada por el alumno:

Casillas Navarrete Juan Manuel
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	2	0	4	1
---	---	---	---	---	---	---

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 de tesis

Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui
Primer Vocal

Dr. Oscar Eladio Bautista Godínez
Presidente

Dr. Eric Gustavo Bautista Godínez
Secretario

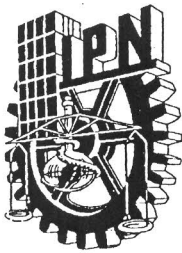
Dr. Juan Pablo Escandón Colín
Segundo Vocal

Dr. José Carlos Arcos Hernández
Tercer Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



Dr. Manuel Hernández López
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 **01** del mes **octubre** del año **2012**, el que suscribe **Juan Manuel Casillas Navarrete** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Termofluidos** con número de registro **B102041**, adscrito a la **SEPI ESIME UA**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui** y cede los derechos del trabajo titulado **Estudio Experimental de Convección Mixta Laminar para Flujo Opuesto en un Canal Vertical de Longitud Finita Sujeto a Fuentes de Calor Isotérmicas, Simétricas y Discretas**, 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 casillas.juan@hotmail.com y lamartinezs@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Juan Manuel Casillas Navarrete

Agradecimientos

Al doctor Lorenzo Alberto Martínez Suástegui por el talento y el tiempo que dedicó a este proyecto. Gracias por compartir sus conocimientos en esta técnica experimental, de la cual tiene gran dominio. Gracias por sus sugerencias, siempre oportunas, que ahorraron semanas de trabajo y enriquecieron esta investigación.

Al doctor Abraham Medina por el apoyo y las facilidades que en todo momento proporcionó como responsable del laboratorio.

A Erick Salcedo, por ayudarme a instalar el experimento en tiempo récord.

A Iván Guillén, Erick García y Uriel Suárez, por su ayuda en esas jornadas de trabajo interminables.

Al Ing. Jesús Casillas, por todo el equipo de medición de flujo que facilitó.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca con número de registro 389518 para la realización de mis estudios.

Este proyecto de investigación fue financiado por el CONACyT, No. de proyecto 167474, Convocatoria de Investigación Científica Básica 2011 y por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, número de registro 20110091.

Dedicatoria

A Lula y a Chuy, si con alguien estoy en deuda es con ustedes

A Lucy, quien en cada oportunidad me consiente

A Irene, mi única hermana

A José, mi único hermano

Índice general

Nomenclatura	2
Abstract	4
Resumen	5
1. Introducción	7
1.1. Antecedentes	7
1.2. Objetivos	11
2. Materiales y métodos	13
2.1. Diseño Experimental	13
2.2. Adquisición de imágenes	16
2.3. Procesamiento de datos	19
3. Resultados	21
3.1. Estructura promedio del flujo	21
3.2. Estructura instantánea del flujo	27
3.3. Centroide del flujo másico	31
3.4. Frecuencias de oscilación	38
3.5. Efectos de pared	42
4. Conclusiones	49

Índice de figuras

2.1. Diagrama esquemático del diseño experimental con a) y b) mostrando diferentes perspectivas de éste. 1) Sistema posicionador en 3D; 2) Cámaras CCD; 3) Láser; 4) Tubo de rebosadero; 5) Bomba centrífuga; 6) Control de temperatura digital; 7) Válvula ajustable; 8) Espejo; 9) Tanque de almacenamiento.	14
2.2. Diagrama esquemático del circuito de recirculación de agua desde el control de temperatura digital hacia las placas calientes. Por claridad, el aislamiento de poliestireno no se muestra. 1) Depósito de agua secundario; 2) Circuito de recirculación de agua desde el control de temperatura hacia las placas calientes; 3) Control de temperatura digital.	15
2.3. Tamaño de las imágenes obtenidas después de unir pares de imágenes de cada cámara. Las imágenes desplegadas en el siguiente capítulo sólo muestran una porción de la sección de prueba que corresponde a la región demarcada por el rectángulo negro.	17
3.1. Valores de flujo promedio con vectores en 2D superpuestos para $Re = 100$ y $Ri = 38.7$ ($Gr = 3.87 \times 10^5$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, componentes de velocidad u y v (m/s) y campo de vorticidad ω (s^{-1}), respectivamente.	22
3.2. Valores de flujo promedio con vectores en 2D superpuestos para $Re = 100$ y $Ri = 116$ ($Gr = 1.16 \times 10^6$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, componentes de velocidad u y v (m/s) y campo de vorticidad ω (s^{-1}), respectivamente.	23

3.3.	Valores de flujo promedio con vectores en 2D superpuestos para $Re = 100$ y $Ri = 193.4$ ($Gr = 1.93 \times 10^6$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, componentes de velocidad u y v (m/s) y campo de vorticidad ω (s^{-1}), respectivamente. . . .	24
3.4.	Valores de flujo promedio con vectores en 2D superpuestos para $Re = 300$ y $Ri = 3.15$ ($Gr = 2.84 \times 10^5$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, componentes de velocidad u y v (m/s) y campo de vorticidad ω (s^{-1}), respectivamente. . . .	25
3.5.	Valores de flujo promedio con vectores en 2D superpuestos para $Re = 500$ y $Ri = 6.8$ ($Gr = 1.7 \times 10^6$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, componentes de velocidad u y v (m/s) y campo de vorticidad ω (s^{-1}), respectivamente.	26
3.6.	Valores de flujo promedio con vectores en 2D superpuestos para $Re = 700$ y $Ri = 3.63$ ($Gr = 1.8 \times 10^6$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, componentes de velocidad u y v (m/s) y campo de vorticidad ω (s^{-1}), respectivamente.	27
3.7.	Líneas de corriente que muestran la estructura de flujo transitoria para $Re = 100$ and $Ri = 154.7$ ($Gr = 1.55 \times 10^6$) empleando una separación de 1 s entre imágenes consecutivas. . .	28
3.8.	Líneas de corriente mostrando las diferentes fases del comportamiento global periódico para $Re = 300$ y $Ri = 12.6$ ($Gr = 1.13 \times 10^6$).	29
3.9.	Líneas de corriente mostrando la estructura transitoria del flujo para $Re = 500$ y $Ri = 10.3$ ($Gr = 2.58 \times 10^6$).	30
3.10.	Líneas de corriente mostrando la estructura transitoria del flujo para $Re = 700$ y $Ri = 6.57$ ($Gr = 3.2 \times 10^6$).	31
3.11.	Centroide del flujo másico adimensional para un número de Reynolds de 100 y $Ri = 154.7$ ($Gr = 1.547 \times 10^6$).	32
3.12.	Centroide del flujo másico adimensional para un número de Reynolds de 100 y $Ri = 193.37$ ($Gr = 1.933 \times 10^6$).	33
3.13.	Centroide del flujo másico adimensional para un número de Reynolds de 300 y $Ri = 12.6$ ($Gr = 1.134 \times 10^6$).	34
3.14.	Centroide del flujo másico adimensional para un número de Reynolds de 500 y $Ri = 10.3$ ($Gr = 2.575 \times 10^6$).	34
3.15.	Centroide del flujo másico adimensional para un número de Reynolds de 500 y $Ri = 11$ ($Gr = 2.75 \times 10^6$).	35
3.16.	Centroide del flujo másico adimensional para un número de Reynolds de 500 y $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$).	36

3.17. Centroides del flujo másico adimensional para un número de Reynolds de 700 y $Ri = 3.63$ ($Gr = 1.779 \times 10^6$). 37

3.18. Centroides del flujo másico adimensional para un número de Reynolds de 700 y $Ri = 8.03$ ($Gr = 3.935 \times 10^6$). 37

3.19. Frecuencias de oscilación adimensionales ($St = fH/u_0$) para un número de Reynolds de 100 y $Ri = 154.7$ ($Gr = 1.547 \times 10^6$). 38

3.20. Frecuencias de oscilación adimensionales ($St = fH/u_0$) para un número de Reynolds de 500 y $Ri = 10.3$ ($Gr = 2.575 \times 10^6$). 39

3.21. Frecuencias de oscilación adimensionales ($St = fH/u_0$) para un número de Reynolds de 500 y $Ri = 11$ ($Gr = 2.75 \times 10^6$). 40

3.22. Frecuencias de oscilación adimensionales ($St = fH/u_0$) para un número de Reynolds de 500 y $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$). 41

3.23. Frecuencias de oscilación adimensionales ($St = fH/u_0$) para un número de Reynolds de 700 y $Ri = 3.63$ ($Gr = 1.779 \times 10^6$). 42

3.24. Líneas de corriente que muestran la estructura del flujo promedio para $Re = 100$ y $Ri = 38$ ($Gr = 3.8 \times 10^5$) en posiciones selectas a través de toda la profundidad del canal. Las tres imágenes en la parte inferior muestran los perfiles de velocidad normalizados en regiones que corresponden a la parte superior, central e inferior de las placas calientes. 43

3.25. Líneas de corriente que muestran la estructura del flujo promedio para $Re = 300$ y $Ri = 7.64$ ($Gr = 6.88 \times 10^5$) en posiciones selectas a través de toda la profundidad del canal. Las tres imágenes en la parte inferior muestran los perfiles de velocidad normalizados en regiones que corresponden a la parte superior, central e inferior de las placas calientes. 44

3.26. Líneas de corriente que muestran la estructura del flujo promedio para $Re = 500$ y $Ri = 5.5$ ($Gr = 1.38 \times 10^6$) en posiciones selectas a través de toda la profundidad del canal. Las tres imágenes en la parte inferior muestran los perfiles de velocidad normalizados en regiones que corresponden a la parte superior, central e inferior de las placas calientes. 46

- 3.27. Líneas de corriente que muestran la estructura del flujo promedio para $Re = 700$ y $Ri = 4.72$ ($Gr = 2.31 \times 10^6$) en posiciones selectas a través de toda la profundidad del canal. Las tres imágenes en la parte inferior muestran los perfiles de velocidad normalizados en regiones que corresponden a la parte superior, central e inferior de las placas calientes. . . . 47

Índice de cuadros

2.1. Parámetros empleados para llevar a cabo las mediciones experimentales.	18
---	----

Nomenclatura

f	frecuencia (Hertz)
g	aceleración de la gravedad
Gr	número de Grashof basado en el ancho del canal, $Gr=g\beta(T_w-T_0)H^3/\nu^2$
H	ancho del canal (longitud característica)
l_1	longitud desde la entrada hasta las placas calientes
l_2	longitud de las placas calientes
l_3	longitud desde las placas calientes hasta a la salida
N	número de puntos espaciales en el dominio
Pr	número de Prandtl, $Pr=\alpha/\nu$
Re	número de Reynolds basado en el ancho del canal, $Re=u_0H/\nu$
Ri	número de Richardson basado en el ancho del canal, $Ri=Gr/Re^2$
St	número de Strouhal basado en el ancho del canal, $St=fH/u_0$
t	tiempo
t_f	tiempo final de medición
T_0	temperatura del fluido a la entrada del canal
T_w	temperatura de las placas calientes
u_0	velocidad del fluido a la entrada del canal
u, v	componentes de velocidad en dirección x - e y -
x, y, z	coordenadas Cartesianas rectangulares
X	coordenada longitudinal adimensional, $X = x/H$
Y	coordenada transversal longitudinal, $Y = y/H$
Y_p	centroide del flujo másico, definido en la Eq. (3.1)
Z	coordenada adimensional, $Z = z/H$

Símbolos griegos

β	coeficiente de expansión volumétrica
ν	viscosidad cinemática
ω	vorticidad perpendicular al plano
ρ	densidad del fluido

Subíndices

i, j	coordenadas espaciales
--------	------------------------

Abstract

Particle image velocimetry (PIV) measurements are carried out in an experimental investigation of laminar opposing mixed convection in a downward channel flow of finite length and a square cross-section. The flow is subjected to isothermal heat sources over a finite portion of opposite channel walls. The experiments are done under different values of the buoyancy parameter (Richardson number) and $100 \leq \text{Re} \leq 700$. With variation in the value of the buoyancy, the flow reverses close to the heated slabs and vortices are developed. In this work, the buoyancy effect on the flow distributions of the upward flow opposing the forced downward cool fluid flow are revealed with high spatial resolution, and results are presented in the form of mean and instantaneous contours of velocity and vorticity. To elucidate the effects of the side walls on the resulting three-dimensional flow structure, measurements are obtained at several positions related to the channel depth. The results reported herein demonstrate that the sizes and locations of the vortical structures strongly depend on their location within the channel depth, and it is pointed out that walls play an important role on total buoyancy force acting on the forced opposed flow.

Resumen

En esta investigación experimental se llevan a cabo mediciones de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) de la convección mixta laminar y opuesta en un flujo descendente en un canal de longitud finita. La sección transversal del ducto es cuadrada y éste se encuentra sujeto a fuentes de calor isotérmicas ubicadas en una porción finita de dos paredes opuestas. Los experimentos se llevaron a cabo para distintos valores del parámetro de flotación (número de Richardson) y $100 \leq Re \leq 700$. Al variar el número de Richardson, ocurre reversión de flujo cerca de las placas calientes y se desarrollan vórtices. En este trabajo se revela el efecto de la flotación en el flujo con una alta resolución espacial y se presentan resultados en la forma de contornos de velocidad y vorticidad promedio e instantáneos. Para elucidar los efectos de pared en la estructura del flujo resultante, se obtienen mediciones en distintas posiciones de la profundidad del canal. Los resultados reportados en este trabajo demuestran que el tamaño y la ubicación de las estructuras vorticales depende fuertemente de su ubicación en la profundidad del canal, y se señala que las paredes juegan un papel importante en la fuerza de flotación total actuando sobre el flujo opuesto forzado.