



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

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

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

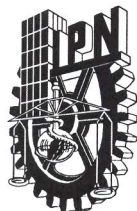
**ESTRUCTURA DEL FLUJO POR CONVECCIÓN MIXTA
LAMINAR PARA FLUJO OPUESTO ALREDEDOR DE
UN CILINDRO DE PARED ISOTÉRMICA CONFINADO
DENTRO DE UN CANAL VERTICAL DE LONGITUD
FINITA**

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

**PRESENTA:
IVÁN ALBERTO GUILLÉN CANCINO**



**DIRECTOR: DR. LORENZO ALBERTO MARTÍNEZ SUÁSTEGUI
MÉXICO D. F. ABRIL 2013**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 16:00 horas del día 10 del mes de abril del 2013 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:

Estructura del Flujo por Convección Mixta Laminar para Flujo Opuesto Alrededor de un Cilindro de Pared Isotérmica Confinado dentro de un Canal Vertical de Longitud Finita.

Presentada por el alumno:

Guillén Cancino Iván Alberto
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro:

A	1	1	0	0	2	5
---	---	---	---	---	---	---

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

Dr. Oscar Eladio Bautista Godínez
Presidente

Dr. Eric Gustavo Bautista Godínez
Secretario

Dr. José Carlos Arcos Hernández
2do Vocal

Dr. Juan Pablo Escandón Colín

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Manuel Faraón Carbajal Romero

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 **15** del mes **abril** del año **2013**, el que suscribe **Iván Alberto Guillén Cancino** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Termofluidos** con número de registro **A110025**, 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 intitulado **Estructura del Flujo por Convección Mixta Laminar para Flujo Opuesto Alrededor de un Cilindro de Pared Isotérmica Confinado dentro de un Canal Vertical de Longitud Finita**, 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 las siguientes direcciones: cancinofl@hotmail.com y lamartinezs@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Iván Alberto Guillén Cancino

AGRADECIMIENTOS

Especialmente al Dr. Lorenzo Martínez Suástegui por su gran apoyo y motivación para realizar el trabajo experimental asignado.

Agradezco al grupo de Doctores por hacer posible el programa de la Maestría en Ciencias en Termofluidos, agradezco sus enseñanzas, sus sabios consejos, sus estrictas condiciones y los numerosos regaños.

También agradezco a todos los compañeros de generación, generaciones pasadas y nuevas generaciones del programa de la Maestría en Ciencias de la ESIME UA.

Gracias a los grandes científicos por darle una razón a la vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca con número de registro 372122 para la realización de mis estudios de Maestría.

Al proyecto de investigación 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 20120768.

A la buena música que me acompañó y me mantuvo paciente para realizar los experimentos. Gracias a mis compañeros que pudieron soportar, al escuchar una y otra vez los álbumes clásicos de Pink Floyd, Rolling Stones, Queen, Genesis, Supertramp, Yes, Emerson, Lake and Palmer, entre otros.

Gracias a la fuerza de voluntad y las ganas de alcanzar nuevas metas.

Por la naturaleza que me ha permitido someterme a su imperio, nadar en sus aguas cristalinas, respirar del aire que emanan los bosques, recorrer con lo último en tecnología, involucrarse a todos los peligros que la humanidad puede provocar. Por la naturaleza que me ha perdonado y yo he desafiado, gracias por mantenerme vivo.

Por un sueño, por un reto, porque tengo que lograrlo..... I.C.

DEDICATORIAS

Primordialmente a mí querida Madre y a mi incondicional Hermana.

Dedico también a todos mis familiares: Padre, Abuelas, Abuelos, Tías, Tíos Primas y Primos.

A los compañeros de bachillerato, de entrenamiento, de ruta y de carrera.

Índice general

Nomenclatura	X
Abstract	XI
Resumen	XII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	5
1.3. Objetivos	6
2. Materiales y métodos	7
2.1. Diseño experimental	7
2.2. Adquisición de imágenes	10
2.3. Procesamiento de datos	11
3. Resultados	13
3.1. Estructura promedio del flujo	13
3.2. Velocidades adimensionales promedio en el eje de simetría	20
3.3. Ángulo de separación	23
3.4. Estructura instantánea del flujo	25
3.5. Número de Strouhal	32
3.6. Efecto de la relación de aspecto	35
4. Conclusiones	41

Índice de figuras

2.1. Diagrama esquemático del diseño experimental: a) Sistema posicionador en 3D; b) Cámaras CCD; c) Láser; d) Bomba centrífuga; e) Tanque de almacenamiento; f) Válvula de estrangulación; g) Tubo de rebosadero; h) Control de temperatura; i) Depósito secundario.	8
2.2. Orientación de las cámaras con respecto al cilindro y al plano iluminado. a) Extensión y ubicación del área de medición después de unir las imágenes de ambas cámaras y; b) Origen del sistema coordenado.	11
3.1. Estructura promedio del flujo con vectores superpuestos para $Re = 170$ y $Ri = 0$. De izquierda a derecha: líneas de corriente, campos adimensionales de velocidad U y V y contorno adimensional de vorticidad ω , respectivamente.	14
3.2. Estructura promedio del flujo con vectores superpuestos para $Re = 170$ y $Ri = 1$ ($Gr = 2.89 \times 10^4$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, campos adimensionales de velocidad U y V y contorno adimensional de vorticidad ω , respectivamente.	15
3.3. Estructura promedio del flujo con vectores superpuestos para $Re = 170$ y $Ri = 2$ ($Gr = 5.78 \times 10^4$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, campos adimensionales de velocidad U y V y contorno adimensional de vorticidad ω , respectivamente.	16
3.4. Estructura promedio del flujo con vectores superpuestos para $Re = 170$ y $Ri = 3$ ($Gr = 8.67 \times 10^4$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, campos adimensionales de velocidad U y V y contorno de vorticidad adimensional ω , respectivamente.	17

- 3.5. Estructura promedio del flujo con vectores superpuestos para $Re = 170$ y $Ri = 4$ ($Gr = 1.156 \times 10^5$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, campos adimensionales de velocidad U y V y contorno de vorticidad adimensional ω , respectivamente. . 18
- 3.6. Estructura promedio del flujo con vectores superpuestos para $Re = 170$ y $Ri = 5$ ($Gr = 1.445 \times 10^5$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, campos adimensionales de velocidad U y V y contorno de vorticidad adimensional ω , respectivamente. . 19
- 3.7. Estructura promedio del flujo con vectores superpuestos para $Re = 170$ y $Ri = -1$ ($Gr = -2.89 \times 10^4$). De izquierda a derecha: líneas de corriente, campos adimensionales de velocidad U y V y contorno de vorticidad adimensional ω , respectivamente. . 20
- 3.8. Perfiles adimensionales de la componente de velocidad longitudinal promedio a lo largo del eje de simetría como función de la coordenada longitudinal adimensional para diferentes números de Richardson. 21
- 3.9. Longitud adimensional de la estela (L_v/D) en función del número de Richardson medida a partir del eje del cilindro. Las longitudes reportadas son los valores promedio con su desviación estándar ($\pm DE$). 22
- 3.10. Patrón instantáneo de flujo que muestra el contorno de la componente de velocidad transversal adimensional con líneas de corriente superpuestas y el contorno de vorticidad adimensional para un cilindro sin calentar. 26
- 3.11. Patrón instantáneo de flujo que muestra el contorno de la componente de velocidad transversal adimensional con líneas de corriente superpuestas y el contorno de vorticidad adimensional para $Ri = 1$ ($Gr = 2.89 \times 10^4$). 27
- 3.12. Patrón instantáneo de flujo que muestra el contorno de la componente de velocidad transversal adimensional con líneas de corriente superpuestas y el contorno de vorticidad adimensional para $Ri = 2$ ($Gr = 5.78 \times 10^4$). A) zona de fluido estancado y; B) Zona de recirculación. 28
- 3.13. Patrón instantáneo del flujo del contorno de la componente de velocidad transversal adimensional con líneas de corriente superpuestas y el contorno de vorticidad adimensional para $Ri = 3$ ($Gr = 8.67 \times 10^4$) mostrando la estructura de los vórtices que se desprenden en diferentes instantes de tiempo. . 29

3.14. Variaciones en el tiempo de la componente de velocidad transversal adimensional en función del tiempo adimensional para $Ri = 3$ ($Gr = 8.67 \times 10^4$). Los datos extraídos están localizados en el plano de simetría en la posición longitudinal adimensional $X = 9.5$. Aquí, a) y b) destacan los dos instantes de tiempo mostrados en la Fig. 3.14. 30

3.15. Variaciones en el tiempo de las componentes adimensionales de la velocidad longitudinal y transversal en función del tiempo adimensional para $Ri = 4$ ($Gr = 1.156 \times 10^5$) y $Ri = 5$ ($Gr = 1.445 \times 10^5$) en la posición $(X, Y) = (9.5, 0)$ 31

3.16. Imágenes superiores: fluctuaciones en el tiempo de la componente de velocidad transversal adimensional en función del tiempo adimensional para $Re = 170$. Imágenes inferiores: frecuencias de oscilación adimensionales ($St = fD/u_0$) para $Ri = 0$ y $Ri = 1$ ($Gr = 2.89 \times 10^4$), respectivamente. Para ambos valores del parámetro de flotación, los datos son extraídos de la posición $(X, Y) = (3.5, 0)$ 33

3.17. Fluctuaciones de la componente de velocidad transversal adimensional en función del tiempo adimensional (imagen superior) y frecuencia de oscilación adimensional ($St = fD/u_0$) para $Ri = 2$ ($Gr = 5.78 \times 10^4$) (imagen inferior) obtenidos en la posición $(X, Y) = (9.5, 0)$ 34

3.18. Patrón de flujo promedio en el plano xz que pasa a través del eje del cilindro para $Ri = 0$. Las imágenes muestran (de izquierda a derecha) las líneas de corriente y el contorno de las componentes de velocidad longitudinal y transversal respecto al plano xz , respectivamente. 36

3.19. Patrón de flujo promedio en el plano xz que pasa a través del eje del cilindro para $Ri = 1$ ($Gr = 2.89 \times 10^4$). Las imágenes muestran (de izquierda a derecha) las líneas de corriente y el contorno de las componentes de velocidad longitudinal y transversal respecto al plano xz , respectivamente. 37

3.20. Patrón de flujo promedio en el plano xz que pasa a través del eje del cilindro para $Ri = 2$ ($Gr = 5.78 \times 10^4$). Las imágenes muestran (de izquierda a derecha) las líneas de corriente y el contorno de las componentes de velocidad longitudinal y transversal respecto al plano xz , respectivamente. 38

- 3.21. Patrón de flujo promedio en el plano xz que pasa a través del eje del cilindro para $Ri = -1$ ($Gr = -2.89 \times 10^4$). Las imágenes muestran (de izquierda a derecha) las líneas de corriente y el contorno de las componentes de velocidad longitudinal y transversal respecto al plano xz , respectivamente. 39

Índice de cuadros

3.1. Resumen de los patrones de flujo promedio medidos en función del número de Richardson	23
3.2. Ángulo de separación como una función del número de Richardson.	24

Nomenclatura

D	diámetro del cilindro (longitud característica)
DE	desviación estándar
f	frecuencia
g	aceleración de la gravedad
Gr	número de Grashof basado en el diám. del cilindro, $Gr=g\beta(T_w-T_0)D^3/\nu^2$
k	conductividad térmica
L	longitud desde la entrada del canal hasta el centro del cilindro
Pr	número de Prandtl, $Pr = \nu/\alpha$
Re	número de Reynolds basado en el diámetro del cilindro, $Re=u_0D/\nu$
Ri	número de Richardson basado en el diámetro del cilindro, $Ri=Gr/Re^2$
St	número de Strouhal basado en el diámetro del cilindro, $St=fD/u_0$
T_0	temperatura del fluido a la entrada del canal
T_w	temperatura del cilindro
u_0	velocidad del fluido a la entrada del canal
u, v	componentes de la velocidad longitudinal y transversal, respectivamente
U	componente de la velocidad longitudinal adimensional, $U = u/u_0$
V	componente de la velocidad transversal adimensional, $V = v/u_0$
x, y, z	coordenadas Cartesianas rectangulares
X	coordenada longitudinal adimensional, $X = x/D$
Y	coordenada transversal adimensional, $Y = y/D$
Z	coordenada adimensional, $Z = z/D$

Símbolos griegos

β	coeficiente de expansión volumétrica
ρ	densidad del fluido
ν	viscosidad cinemática
ω	vorticidad adimensional perpendicular al plano X - Y
θ_s	ángulo de separación medido a partir del punto de estancamiento

Abstract

Particle image velocimetry (PIV) measurements are carried out in an experimental investigation of laminar opposing mixed convection to assess the thermal effects on the wake of an isothermal circular cylinder placed horizontally and confined inside a vertical closed-loop downward rectangular water channel. The buoyancy effect on the flow distributions are revealed for flow conditions with Reynolds number based on cylinder diameter of $Re = 170$, blockage ratio, $D/H = 0.287$, aspect ratio, $L/D = 6.97$ and values of the buoyancy parameter (Richardson number) in the range $-1 \leq Ri \leq 5$. In this work, flow distributions are presented in the form of mean and instantaneous contours of velocity and vorticity. To elucidate the effects of the lateral wall proximity effect and cylinder aspect ratio, separation angle, wake structure behind the cylinder, recirculation bubble length, time traces of velocity fluctuation, Strouhal number and vortex shedding modes are obtained as a function of the Richardson number. The results reported herein demonstrate how the flow structure and vortex shedding pattern are significantly modified by the wall confinement and thermal effects. In addition, the experimental measurements show that for assisted buoyancy ($Ri = -1$), the breakdown of the Kármán vortex street takes place and vortex shedding is completely suppressed.

Resumen

En este trabajo de investigación experimental se llevan a cabo mediciones de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) del flujo por convección mixta laminar y opuesta para revelar los efectos térmicos en el flujo alrededor de un cilindro circular con orientación horizontal. Éste se encuentra confinado dentro de un canal rectangular con flujo descendente que cuenta con un circuito vertical de recirculación de agua. El efecto de la flotación en las distribuciones del flujo se revelan para condiciones de flujo con el número de Reynolds basado en el diámetro del cilindro de $Re = 170$, radio de bloqueo, $D/H = 0.287$, relación de aspecto, $L/D = 6.97$ y valores del parámetro de flotación (número de Richardson) en el rango $-1 \leq Ri \leq 5$. En este trabajo, las distribuciones del flujo son presentadas en la forma de contornos de velocidad y vorticidad promedio e instantáneos. Para elucidar los efectos de la proximidad de las paredes laterales del canal y relación de aspecto del cilindro, los ángulos de separación, la estructura de la estela detrás del cilindro, el historial de las fluctuaciones de velocidad, los números de Strouhal y el patrón de desprendimiento de vórtices son obtenidos como función del número de Richardson. Los resultados reportados demuestran cómo la estructura del flujo y el patrón de desprendimiento de vórtices son modificados significativamente por los efectos de bloqueo y los efectos térmicos. Adicionalmente, las mediciones muestran que para el caso de flotación asistida ($Ri = -1$), la calle de von Kármán se rompe y las oscilaciones del flujo aguas abajo del cilindro se suprimen.