



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

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

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS EFECTOS DE
LA FLOTACIÓN Y LA INCLINACIÓN EN
CONVECCIÓN MIXTA TRANSITORIA EN UN
CANAL CON
CONTRACCIONES-EXPANSIONES PLANAS,
SIMÉTRICAS Y CON COMPONENTES
GENERADORES DE CALOR**

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

ING. FABIÁN GARCÍA QUIROZ

DIRECTOR: DR. LORENZO ALBERTO MARTÍNEZ SUÁSTEGUI



CIUDAD DE MÉXICO SEPTIEMBRE 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 29 del mes de agosto 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 Unidad Azcapotzalco para examinar la tesis titulada:

Estudio numérico de los efectos de la flotación y la inclinación en convección mixta transitoria en un canal con contracciones-expansiones planas, simétricas y con componentes generadores de calor.

Presentada por el alumno:

García
Apellido paterno

Quiroz
Apellido materno

Fabián
Nombre(s)

Con registro:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 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
Primer Vocal

Dr. Oscar Eladio Bautista Godínez
Presidente

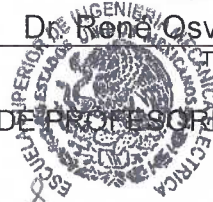
Dr. Eric Gustavo Bautista Godínez
Secretario

Dr. José Carlos Arcos Hernández
Segundo Vocal

Dr. René Osvaldo Vargas Aguilar
Tercer Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Felipe Hernández
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 1 del mes de septiembre del año 2017, el que suscribe **Fabián García Quiroz** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Termofluidos** con número de registro **B150005**, adscrito a 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 **“Estudio numérico de los efectos de la flotación y la inclinación en convección mixta transitoria en un canal con contracciones-expansiones planas, simétricas y con componentes generadores de calor”**, 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 de correo electrónico: **fgarciaq0400@gmail.com** o **lamartinezs@ipn.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Fabián García Quiroz

A mis padres.

Por brindarme todo su amor, comprensión y apoyo.

Los amo inmensamente, ustedes son mi más grande orgullo.

Gracias papá y mamá.

AGRADECIMIENTOS

A mi abuela Juana Guadalupe Mendoza Estrada por todo el amor que me ha brindado.

A Tania Berenice Pérez Hernández por su amor, comprensión, paciencia y apoyo durante esta faceta de mi vida.

A mis hermanos por su compañía, cariño, consejos y por todos los momentos compartidos.

A mis tías Domitila Rosa Quiroz Mendoza y Angelina Verónica Quiroz Mendoza por todo su cariño y apoyo durante toda mi vida.

Al Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui por los consejos, el apoyo y la guía recibida durante estos últimos dos años.

Al cuerpo académico de la SEPI ESIME UA: Dr. Oscar Bautista, Dr. Erick Bautista, Dr. Juan Carlos Arcos, Dr. René Vargas y Dr. Juan Pablo Escandón por todo su apoyo y conocimientos compartidos durante mis estudios de Maestría.

A mis compañeros de Maestría por todas las vivencias compartidas.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca con número de registro 706733 para la realización de mis estudios de Maestría.

Al proyecto de Ciencia Básica 2011 SEP-CONACyT con número de proyecto 167474.

A la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, por otorgarme beca BEIFI correspondiente al proyecto SIP 20161254.

A la memoria de

Teresa Navarro Barrera

y

José Alfredo Quiroz San Pedro

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Nomenclatura | IX |
| Abstract | XI |
| Resumen | XII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.1.1. Escalones hacia adelante y hacia atrás | 2 |
| 1.1.2. Contracciones súbitas planas y simétricas | 6 |
| 1.1.3. Expansiones súbitas planas y simétricas | 8 |
| 1.1.4. Contracciones-expansiones | 10 |
| 1.1.5. Efecto del ángulo de inclinación | 10 |
| 1.2. Motivación | 14 |
| 1.3. Objetivos | 14 |
| 2. Formulación matemática | 16 |
| 2.1. Solución numérica | 23 |
| 2.1.1. Estudio de independencia de malla | 24 |
| 2.1.2. Validación del código | 24 |
| 3. Resultados y discusión | 28 |
| 3.1. Canal vertical, $Re = 500$, $\gamma = 0^\circ$ | 28 |
| 3.2. $Re = 500$, $\gamma = 30^\circ$ | 34 |
| 3.3. $Re = 500$, $\gamma = 45^\circ$ | 38 |
| 3.4. $Re = 500$, $\gamma = 60^\circ$ | 41 |
| 3.5. Canal horizontal, $Re = 500$, $\gamma = 90^\circ$ | 45 |
| 3.6. Efecto de los números de Reynolds y de Prandtl | 49 |
| 3.7. Efecto de la altura del bloqueo parcial | 55 |
| 3.8. Efecto de las pérdidas en las paredes | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 4. Conclusiones | 61 |
| A. Formulación vorticidad-función de corriente | 70 |
| B. Discretización de las ecuaciones | 74 |
| B.1. Discretización para la obtención de ψ | 75 |
| B.2. Discretización para la obtención de Ω | 76 |
| B.3. Discretización para la obtención de θ | 80 |

Índice de figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1. | (a) Escalón hacia adelante. (b) Escalón hacia atrás. En ambos casos, el flujo va de izquierda a derecha como indican las flechas. | 2 |
| 2.1. | Diagrama esquemático del problema de flujo y transferencia de calor. | 17 |
| 2.2. | (a) Dominio computacional. (b) Detalle de la malla computacional para el caso de $CER = 1:0.8:1$ con un total de 121×230 nodos en la dirección horizontal y vertical, respectivamente. | 21 |
| 2.3. | Efecto del ángulo de inclinación en el número de Nusselt local a lo largo de la pared caliente ($Gr = 609$, $Re = 100$, relación de expansión igual a dos, $Pr = 0.712$. y diferentes valores para el ángulo de inclinación) | 27 |
| 3.1. | Evolución temporal de los números de Nusselt totales para $Re = 500$ y $\gamma = 0^\circ$ en las fuentes de calor izquierda (líneas continuas) y derecha (líneas punteadas), respectivamente. | 29 |
| 3.2. | $Re = 500$, $Pr = 7$, $CER = 1:0.8:1$, $\gamma = 0^\circ$ y $Ri = 7$ ($Gr = 1.75 \times 10^6$). (a) Evolución temporal de las posiciones superiores de los vórtices aguas arriba del bloqueo parcial. (b) Centroide del flujo másico en diferentes posiciones transversales del canal. (c) Evolución temporal de los números de Nusselt promedio. (d) Centroide térmico en diferentes posiciones transversales del canal. (e) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R), y (f) Contornos instantáneos de temperatura con líneas de corriente superpuestas y contornos de vorticidad. | 31 |

- 3.3. $Re = 500$, $Pr = 7$, $CER = 1:0.8:1$, $\gamma = 0^\circ$ and $Ri = 25$ ($Gr = 6.25 \times 10^6$). (a) Evolución temporal de las posiciones superiores de los vórtices aguas arriba del bloqueo parcial. (b) Centroide del flujo másico en diferentes posiciones transversales del canal. (c) Evolución temporal de los números de Nusselt promedio. (d) Centroide térmico en diferentes posiciones transversales del canal. (e) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R), y (f) Contornos instantáneos de temperatura con líneas de corriente superpuestas y contornos de vorticidad. 33
- 3.4. Evolución temporal de los números de Nusselt promedio para $Re = 500$ y $\gamma = 30^\circ$ en las fuentes de calor izquierda (líneas continuas) y derecha (líneas punteadas), respectivamente. . . . 34
- 3.5. $Re = 500$, $Pr = 7$, $CER = 1:0.8:1$, $\gamma = 30^\circ$ y $Ri = 8$ ($Gr = 2 \times 10^6$). (a) Evolución temporal de las posiciones superiores de los vórtices aguas arriba del bloqueo parcial. (b) Centroide del flujo másico en diferentes posiciones transversales del canal. (c) Evolución temporal de los números de Nusselt promedio. (d) Centroide térmico en diferentes posiciones transversales del canal (e) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R). 36
- 3.6. $Re = 500$, $Pr = 7$, $CER = 1:0.8:1$, $\gamma = 30^\circ$ y $Ri = 10$ ($Gr = 2.5 \times 10^6$). (a) Evolución temporal de las posiciones superiores de los vórtices aguas arriba del bloqueo parcial. (b) Centroide del flujo másico en diferentes posiciones transversales del canal. (c) Evolución temporal de los números de Nusselt promedio. (d) Centroide térmico en diferentes posiciones transversales del canal (e) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R). 37
- 3.7. Evolución temporal de los números de Nusselt promedio para $Re = 500$ y $\gamma = 45^\circ$ en las fuentes de calor izquierda (líneas continuas) y derecha (líneas punteadas), respectivamente. . . . 39

3.8. $Re = 500$, $Pr = 7$, $CER = 1:0.8:1$, $\gamma = 45^\circ$ y valores seleccionados de Ri . Las columnas izquierda y derecha muestran la evolución temporal del centroide del flujo másico y del centroide térmico a diferentes posiciones transversales del canal, respectivamente. 40

3.9. Evolución temporal de los números de Nusselt promedio para $Re = 500$ y $\gamma = 60^\circ$ en las fuentes de calor izquierda (líneas continuas) y derecha (líneas punteadas), respectivamente. . . . 41

3.10. $Re = 500$, $Pr = 7$, $CER = 1:0.8:1$, $\gamma = 60^\circ$ y valores seleccionados de Ri . Las columnas izquierda y derecha muestran la evolución temporal del centroide del flujo másico y del centroide térmico en diferentes posiciones transversales del canal, respectivamente. 43

3.11. $Re = 500$, $Pr=7$, $CER=1:0.8:1$, $\gamma = 60^\circ$ y $Ri = 9$. (a) Evolución temporal de las posiciones superiores de los vórtices aguas arriba del bloqueo parcial. (b) Centroide del flujo másico en diferentes posiciones transversales del canal. (c) Evolución temporal de los números de Nusselt promedio. (d) Centroide térmico en diferentes posiciones transversales del canal. (e) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R). 44

3.12. Evolución temporal de los números de Nusselt promedio para $Re = 500$ y $\gamma = 90^\circ$ en la fuente de calor izquierda (líneas continuas) y derecha (líneas punteadas), respectivamente. . . . 45

3.13. $Re = 500$, $Pr = 7$, $CER = 1 : 0.8 : 1$, $\gamma = 90^\circ$ y $Ri = 30$. (a) y (b) Evolución temporal del centroide del flujo másico y del centroide térmico a diferentes posiciones transversales de canal, respectivamente. (c) Evolución temporal de los números de Nusselt promedio. (e) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R). (f) Patrones típicos de vorticidad y temperatura instantáneas. 47

- 3.14. $Re = 500$, $Pr = 7$, $CER = 1 : 0.8 : 1$, $\gamma = 90^\circ$ y $Ri = 50$.
 (a) y (b) Evolución temporal del centroide del flujo másico y del centroide térmico en diferentes posiciones transversales de canal, respectivamente. (c) Evolución temporal de los números de Nusselt promedio. (e) Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R). (f) Patrones típicos de vorticidad y temperatura instantáneas. 48
- 3.15. Efecto del número de Reynolds en el número de Nusselt promedio para $Pr = 7$, $Ri = 15$, $\gamma = 0^\circ$ y diferentes valores del número de Reynolds. Las flechas destacan la fuente de calor izquierda (L), y las líneas discontinuas y continuas en el recuadro corresponden a las fuentes de calor izquierda y derecha, respectivamente. 50
- 3.16. $Ri = 15$ and $\gamma = 0^\circ$. Imágenes de la izquierda, de arriba a abajo: Evolución temporal del centroide térmico en diferentes posiciones transversales del canal para $Re = 100$, 500 y 1000 , respectivamente. Imágenes de la derecha, de arriba hacia abajo: Diagramas de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R) para $Re = 100$, 500 , y 1000 , respectivamente. 52
- 3.17. Efecto del número de Prandtl en el número de Nusselt promedio para $Re = 500$, $\gamma = 0^\circ$ y $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$). Las líneas continuas y discontinuas corresponden a las fuentes de calor izquierda y derecha, respectivamente. 53
- 3.18. Patrones adimensionales de los contornos de temperatura y de vorticidad instantáneas para $Re = 500$, $\gamma = 0^\circ$ y $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$) para $Pr = 0, 72$, 7 y 120 , respectivamente. 54
- 3.19. Efecto de CER en el número de Nusselt promedio para $Re = 500$, $Pr = 7$, $\gamma = 0^\circ$ y $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$). Las líneas continuas y discontinuas corresponden a la fuente de calor izquierda y derecha, respectivamente. 55
- 3.20. Evolución temporal del centroide térmico en diferentes posiciones transversales del canal para $Re = 500$, $\gamma = 0^\circ$, $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$) y diferentes valores de CER , respectivamente. 56

3.21. Patrones adimensionales de los contornos de temperatura y vorticidad instantáneas para $Re = 500$, $\gamma = 0^\circ$ y $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$) para diferentes valores de CER , respectivamente. 57

3.22. Evolución temporal del número de Nusselt promedio para $Re = 500$, $\gamma = 0^\circ$, $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$) y diferentes valores del parámetro de pérdida de calor ε 59

3.23. Diagrama de fase del número de Nusselt promedio en la fuente de calor izquierda (\overline{Nu}_L) como una función del número de Nusselt promedio en la fuente de calor derecha (\overline{Nu}_R) para $Re = 500$, $\gamma = 0^\circ$, $Ri = 15$ ($Gr = 3.75 \times 10^6$) y diferentes valores del parámetro de pérdidas de calor ε 60

B.1. Volumen de control en dos dimensiones. 74

Índice de cuadros

| | |
|--|----|
| 2.1. Condiciones de frontera. | 20 |
| 2.2. Resultados del estudio de independencia de malla. | 24 |
| 2.3. Comparación de la variación del número de Nusselt promedio en la superficie caliente de la cavidad para diferentes ángulos de inclinación [1]. | 25 |
| 2.4. Comparación de la variación del número de Nusselt promedio en la superficie caliente de la cavidad para diferentes ángulos de inclinación [2]. | 25 |
| 2.5. Comparación entre las longitudes calculadas de separación y reinsertión en el suelo y las paredes del techo del canal para una relación de contracción de dos a $Re = 1000$ [3]. | 26 |
| 3.1. Números de Nusselt promedio en el tiempo y en el espacio de cada fuente de calor y número de Strouhal para $Re = 500$ y $Ri = 15$ para diferentes valores del parámetro de pérdidas de calor. | 59 |

Nomenclatura

| | |
|-----------------|---|
| f | frecuencia, Hz |
| g | aceleración de la gravedad, m/s^2 |
| Gr | número de Grashof basado en el ancho del canal, $Gr = g\beta(T_w - T_0)H^3/\nu^2$ |
| h | separación en el bloqueo parcial, m |
| H | ancho del canal (longitud característica), m |
| J | coeficiente de transferencia de calor |
| l | longitud del canal ($l = l_1 + l_2 + l_3$), m |
| L | longitud adimensional del canal, $L = L_1 + L_2 + L_3$ |
| l_1 | longitud desde la entrada del canal hasta el bloqueo parcial (ver Fig. 2.1), m |
| L_1 | $L_1 = l_1/H$ |
| l_2 | longitud del bloqueo parcial (ver Fig. 2.1), m |
| L_2 | $L_2 = l_2/H$ |
| l_3 | longitud desde la salida del canal hasta el bloqueo parcial (ver Fig. 2.1), m |
| L_3 | $L_3 = l_3/H$ |
| Nu | número de Nusselt, definido en la Ec. (2.24) |
| \overline{Nu} | número de Nusselt promedio, definido en la Ec. (2.25) |
| p | presión, Pa |
| p_o | presión atmosférica, Pa |
| P | presión adimensional |
| Pe | número de Peclet, $Pe = v_0 H/\alpha$ |
| Pr | número de Prandtl, $Pr = \nu/\alpha$ |
| q | flujo de calor por unidad de área en las placas calientes W/m^2 |
| Re | número de Reynolds basado en el ancho del canal, $Re = v_0 H/\nu$ |
| Ri | número de Richardson basado en el ancho del canal, $Ri = Gr/Re^2$ |
| s | altura del bloqueo parcial, m |
| S | altura adimensional del bloqueo parcial, $S = s/H$ |
| St | número de Strouhal basado en el ancho del canal, $St = fH/ v_0 $ |
| t | tiempo, s |
| T | temperatura, K |
| T_0 | temperatura del fluido a la entrada del canal, k |
| T_w | temperatura de las placas calientes, k |
| u, v | componentes de la velocidad longitudinal y transversal, respectivamente, m/s |
| v_0 | velocidad del fluido a la entrada del canal, m/s |
| U | componente adimensional de la velocidad longitudinal, $U = u/ v_0 $ |
| V | componente adimensional de la velocidad transversal, $V = v/ v_0 $ |
| x, y | coordenadas Cartesianas |
| X | coordenada longitudinal adimensional, $X = x/H$ |
| x_p | centroide del flujo másico, definido en la Ec. (2.20) |
| X_p | centroide del flujo másico adimensional, definido en la Ec. (2.21) |
| Y | coordenada transversal adimensional, $Y = y/H$ |

Símbolos griegos

| | |
|---------------|--|
| α | difusividad térmica |
| β | coeficiente de expansión volumétrica |
| ε | parámetro de pérdidas de calor, $\varepsilon = JH/\lambda$ |
| γ | ángulo de inclinación con respecto a la horizontal |
| λ | coeficiente de conductividad térmica |
| μ | viscosidad dinámica |
| ν | viscosidad cinemática |
| ρ_0 | densidad del fluido para $T = T_0$ |
| ψ | función de corriente adimensional |
| Ω | vorticidad adimensional |
| θ | temperatura adimensional |
| θ_p | centroide térmico definido en la Ec. (2.23) |
| τ | tiempo adimensional, $\tau = tu_0/H$ |

Abstract

In this work, numerical simulations are carried out during transient mixed convection in a channel with discretely heated plane symmetric contraction-expansions at the mid-channel section simulating electronic components. The facing walls of the obstructions are isothermal, the other bounding walls of the constriction and the channel have non-adiabatic walls. The impact of changes in the cross section and their corresponding sensitivity to duct orientation on the overall flow and thermal evolution in space and time are analysed for fixed Prandtl number of $Pr = 7$, Reynolds number in the range $100 \leq Re \leq 1000$, channel inclination of $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$, and different values of buoyancy strength or Richardson number. Results indicate that as the duct approaches the horizontal configuration, buoyancy strength reduces and higher threshold values of the Richardson number are required to induce instability. Also, depending on the parametric set, the flow and temperature distributions can experience an oscillatory behavior associated to variations in size of a complex vortical structure that occupies the spatial region near the partial blockage and that extends to downstream positions of the latter. Numerical predictions demonstrate how the blockage height affects the wake structure and vortex dynamics, and the effects of the Prandtl number and heat losses to the channel walls on the evolution of the final flow and thermal response are presented and discussed in detail.

Resumen

En este trabajo, se llevan a cabo simulaciones numéricas de la convección mixta en estado transitorio en un canal con contracciones-expansiones simétricas planas, que son calentadas discretamente, y que se encuentran en la sección media del canal simulando componentes electrónicos. Las paredes que se encuentran una frente a la otra en la región de la obstrucción son isotérmicas, mientras que las demás paredes de la constricción y del canal son no-adiabáticas. El impacto de los cambios en la sección transversal y su correspondiente sensibilidad a la orientación del canal en el flujo y la evolución térmica en el espacio y el tiempo se analizan para un número de Prandtl fijo de $Pr = 7$, número de Reynolds en el intervalo de $100 \leq Re \leq 1000$, ángulos de inclinación del canal de $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$, y diferentes valores de la fuerza de flotación o número de Richardson. Los resultados indican que a medida que el ducto se acerca a la configuración horizontal, la fuerza de flotación se reduce y el número de Richardson crítico para inducir la inestabilidad hidrodinámica por efecto de la flotación aumenta. Además, dependiendo del conjunto paramétrico, las distribuciones de flujo y temperatura pueden experimentar un comportamiento oscilatorio asociado a las variaciones en el tamaño de la estructura vortical compleja que ocupa la región espacial cerca del bloqueo parcial y que se extiende hacia posiciones aguas abajo de éste. Las predicciones numéricas demuestran cómo la relación de contracción-expansión afecta la estructura de la estela y la dinámica de los vórtices que se forman por efecto del bloqueo parcial y la fuerza de flotación. Adicionalmente, los efectos del número de Prandtl y de las pérdidas de calor en las paredes del canal en la evolución final del flujo y la respuesta térmica se presentan y discuten a detalle.