



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

ANÁLISIS DE LA CONVECCIÓN MIXTA
EN UN CANAL CON ESCALÓN

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – TERMOFLUIDOS

P R E S E N T A:
DIANA LISSETTE VELÁZQUEZ HUERTA

TUTOR:
DR. EDUARDO MEDINA HERNÁNDEZ

2012

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Jaime Gonzalo Cervantes de Gortari

Secretario: Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz

Vocal: Dr. Eduardo Medina Hernández

1^{er} suplente: Dr. Federico Méndez Lavielle

2^{do} suplente: Dr. William Vicente y Rodríguez

Lugares donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería UNAM
Ciudad Universitaria, D.F.

Laboratorio de combustión del Instituto Mexicano del Petróleo.
Veracruz, Ver.

DIRECTOR DE TESIS

DR. EDUARDO MEDINA HERNÁNDEZ.

FIRMA

A mis padres Daniel y Emma

A g r a d e c i m i e n t o s

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que directa o indirectamente contribuyeron en la realización de este trabajo.

A mi tutor, el Dr. Eduardo Medina Hernández por sus consejos, enseñanza y paciencia, por su invaluable ayuda en el desarrollo de esta tesis. ¡Muchísimas gracias!.

A mis profesores e integrantes de jurado, por su ejemplo, dedicación y por la atención brindada en mi formación.

Al Dr César Treviño Treviño por su enorme ayuda con el modelo experimental.

Al Dr Jaime Cervantes de Gortari por su apoyo con el curso de COMSOL.

Al Dr. Uriel González Macías por su ayuda, sus consejos y sobre todo por su amistad. Gracias por permitirme formar parte de “Los tres Chiflados”.

A todo el personal del Laboratorio de combustión del IMP por recibirme nuevamente, agradezco en especial al personal técnico por su gran ayuda.

A mis colegas y amigos Rafael Chávez Martínez, Eduardo Pérez Mota, Servando Ruíz Rodríguez, Mauricio Escalante Camargo y Ezequiel Ríos García, gracias a todos por apoyarme y por estar conmigo durante esta etapa.

A Ian Monsivais Montoliu, por tu ayuda, por tus consejos, por escucharme siempre, por las llamadas telefónicas resolviendo o ampliando mis dudas, por todas las reuniones en la biblioteca, por tu amistad, por todos los momentos que hemos compartido. ¡Gracias!.

A mis tíos Ma. del Pilar Espinoza Parra y Celso Villalobos Espinoza por recibirme en su casa.

A mi familia, por creer siempre en mí.

A mis padres, a quienes no me alcanzará la vida para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A Dios por sus bendiciones y por permitirme llegar hasta aquí.

Índice general

Nomenclatura	1
Resumen	3
I. Introducción	4
1.1. Motivación.....	4
1.2. Antecedentes.....	5
1.3. Objetivos.....	9
II. Planteamiento del problema	10
2.1. Descripción del problema.....	10
2.2. Planteamiento de hipótesis.....	12
2.3. Metodología de solución.....	12
III. Estudio experimental	13
3.1. Introducción.....	13
3.2. Técnicas de medición.....	13
3.2.1. Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV).....	13
3.2.2. Fluorescencia Inducida por Láser (PLIF).....	15
3.3. Modelo experimental.....	17
3.4. Procedimiento experimental.....	20
IV. Estudio numérico	21
4.1. Introducción.....	21
4.2. Método de solución: Elemento Finito.....	21
4.3. Modelo numérico: ecuaciones gobernantes, condiciones iniciales y de frontera.....	23
4.3.1. Descripción del modelo.....	23
4.3.2. Ecuaciones gobernantes.....	24
4.3.3. Condiciones de frontera.....	25
4.4. Proceso de análisis numérico.....	26
4.4.1. Pre-proceso.....	27
4.4.2. Proceso.....	29

4.4.3. Post-proceso.....	29
V. Resultados	30
5.1. Introducción.....	30
5.2. Análisis de resultados experimentales.....	30
5.2.1. Influencia del número de Grashof.....	31
5.2.1.2 Visualización de flujo.....	32
5.2.1.3 Influencia de las paredes laterales: flujo bidimensional.....	34
5.2.1.3 Flujo no permanente e inestable.....	35
5.2.2. Influencia del número de Reynolds.....	39
5.3. Análisis de resultados numéricos.....	43
5.3.1. Forward Facing Step (FFS).....	43
5.3.1.1. Influencia del número de Grashof.....	43
5.3.1.2. Influencia del número de Reynolds.....	45
5.3.1.3. Validación numérica.....	47
5.3.1.4. Influencia del tamaño del escalón.....	51
5.3.1.5. Influencia de la inclinación del canal.....	53
5.3.2. Backward Facing Step (BFS).....	57
5.3.2.1. Influencia del número de Grashof.....	57
5.3.2.2. Influencia del número de Reynolds.....	59
5.3.2.3. Influencia del tamaño del escalón.....	60
5.3.2.4. Influencia de la inclinación del canal.....	62
VI. Conclusiones y recomendaciones	65
Agradecimientos	68
Referencias	69
Anexo A. Cálculo de parámetros adimensionales	71
Anexo B. Resumen y descripción de animaciones de líneas de corriente	73

Índice de figuras

2.1. Casos de estudio.....	11
3.1. Principio de medición PIV.....	14
3.2. Principio de medición Planar-LIF.....	16
3.3. Modelo experimental.....	18
3.4. Esquema de la configuración experimental.....	19
3.5. Instalación experimental.....	19
4.1. Dominio computacional.....	23
4.2. Esquema de distribución de malla.....	28
5.1. Influencia de la temperatura de pared.....	31
5.2 Visualización de zona de recirculación para $Ri = 0.7$	33
5.3 Visualización de flujo para $Ri = 0.7$	33
5.4 Estudio de la bidimensionalidad del flujo para $Ri = 0.7$	34
5.5 Evolución temporal del campo de velocidades para $Ri = 1.8$	36
5.6 Evolución temporal del campo de velocidades para $Ri = 3.5$	39
5.7 Evolución temporal del campo de velocidades para $Ri = 2.8$	40
5.8 Evolución temporal del campo de velocidades para $Ri = 3.1$	42
5.9. Influencia del número de Grashof FFS.....	44
5.10. Influencia del número de Reynolds FFS.....	46
5.11. Comparación de resultados campo de velocidad para $Ri = 0.36$	48
5.12. Comparación de resultados campo de velocidad para $Ri = 0.7$	50
5.13. Influencia del tamaño del escalón FFS.....	52
5.14. Influencia de la inclinación del canal FFS.....	56
5.15 Influencia de la temperatura de pared BFS.....	58
5.16 Campos de velocidad y temperatura a diferentes valores de Re_S	60
5.17 Campos de velocidad y temperatura para diferentes valores de S BFS.....	61
5.18. Campos de velocidad y temperatura a diferentes valores de γ BFS.....	64

Índice de gráficas

3.1 Intensidad de fluorescencia en función de la temperatura.....	17
5.1. Perfil de velocidades de la componente V para $Ri = 0.36$	32
5.2. Perfil de velocidades de la componente V para $Ri = 0.7$	32
5.3. Distribución del Nu_y en la placa FFS.....	44
5.4. Variación del Nu promedio en función del Re_s	47
5.5 Distribución del Nu_y para diferentes Re_s	47
5.6. Comparación del perfil de velocidad V para $Ri = 36$	48
5.7. Comparación del Nu local para $Ri = 0.17$ con Abu-Mulaweh (1996).....	49
5.8. Comparación de perfil de velocidad para $Ri = 0.7$	50
5.9. Distribución del Nu local para diferentes S.....	53
5.10. Distribución del Nu_y . para diferentes ángulos de inclinación del canal.....	56
5.11. Variación del Nu promedio en función de γ	56
5.12. Distribución del Nu_y	58
5.13 Distribución de Nu_y para diferentes Re_s	60
5.14 Distribución de Nu_y para diferentes γ	64

Índice de tablas

2.1. Convección mixta.....	12
3.1. Características de la PSP Polyamide.....	15
3.2. Características de la Rodamina B.....	17
3.3. Parámetros de medición.....	20
4.1. Parámetros de análisis numérico.....	29
5.1 Comparación de resultados experimentales y numéricos para $Ri=0.36$	47
5.2 Comparación de resultados experimentales y numéricos para $Ri=0.7$	50

Nomenclatura

Lista de símbolos

C_p	Calor específico a presión constante	[kJ/kg·K]
g	Aceleración gravitacional	[9.81 m/s ²]
Gr_s	Número de Grashof, $Gr_s = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)S^3}{\nu^2}$	[-]
h	Coefficiente de transferencia de calor, $h = \frac{-k \frac{\partial T}{\partial x} _{x=0}}{T_w - T_\infty}$	[W/m ² ·K]
h	Altura del canal a la entrada	[m]
H	Altura del canal a la salida	[m]
k	Conductividad térmica	[W/m·K]
l	Longitud de la placa caliente	[m]
L_1	Longitud del canal a la entrada	[m]
L_2	Longitud del canal a la salida	[m]
Nu	Número de Nusselt, $Nu = \frac{hS}{k}$	[-]
p	Presión	[kPa]
P	Presión adimensional, $P = \frac{P + \rho_\infty g y \cos\gamma + \rho_\infty g x \sin\gamma - P_\infty}{\rho_\infty U^2}$	[-]
Pr	Número de Prandtl, $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	[-]
RA	Relación de aspecto, $RA = \frac{W}{S}$	[-]
RC	Relación de contracción, $RC = \frac{H}{h}$	[-]
RE	Relación de expansión, $RE = \frac{H}{S}$	[-]
Re_s	Número de Reynolds, $Re_s = \frac{\rho U_\infty S}{\mu}$	[-]
Ri_s	Número de Richardson, $Ri_s = \frac{Gr_s}{Re_s^2}$	[-]
S	Altura del escalón	[m]
T	Temperatura del fluido	[K]

T_f	Temperatura de película, $T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$	[K]
T_w	Temperatura de la pared caliente	[K]
T_∞	Temperatura de la corriente libre	[K]
U_∞	Velocidad de la corriente libre	[m/s]
u, v	Componentes de la velocidad	[m/s]
U, V	Componentes adimensionales de la velocidad, $\frac{u}{U_\infty}, \frac{v}{U_\infty}$	[-]
W	Ancho del canal	[m]
x, y, z	Ejes coordenados	[m]
X, Y	Ejes coordenados adimensionales, $\frac{x}{S}, \frac{y}{S}$	[-]
Z	Eje coordenado normalizado $\frac{z}{W}$	[-]
<i>Letras griegas</i>		
β	Coefficiente de expansión térmica	[1/K]
γ	Ángulo de inclinación del canal (medido desde la vertical),	[°]
θ	Temperatura adimensional del fluido, $\theta = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}$	[-]
μ	Viscosidad dinámica	[Pa·s]
ρ	Densidad	[kg/m ³]

Abreviaturas

BFS	Backward Facing Step
CCD	Charge Coupled Device
FFS	Forward Facing Step
HWA	Hot Wire Anemometer
LDA	Laser Doppler Anemometer
PIV	Particle Image Velocimetry
PLIF	Planar Laser Induced Fluorescence

R e s u m e n

En este trabajo se estudió experimentalmente el fenómeno de la convección mixta laminar para un flujo vertical descendente sometido a una contracción brusca (escalón al frente) que presenta calentamiento. Se llevaron a cabo mediciones mediante velocimetría de imágenes de partículas (PIV) y visualizaciones con Rodamina 3G como trazador.

Se resolvieron además las ecuaciones de movimiento y energía en estado permanente mediante el uso del software COMSOL para estudiar el caso de escalón al frente y hacia atrás. Los resultados ilustran la influencia del número de Richardson (Grashof, Reynolds), de la inclinación del canal y del tamaño del escalón en los campos de velocidad y temperatura, así como en la transferencia de calor global.

A b s t r a c t

Heat transfer and flow separation over a Forward Facing Step were experimentally studied on a vertical channel. Flow visualization with rhodamine 3G and the Particle Image Velocimetry (PIV) technique were used.

A numerical simulation was also conducted to study the mixed convection phenomenon. The computational results were validated with the experimental ones. The numerical study also includes the Backward Facing Step case.

The results show how the velocity field and the global heat transfer are affected because of the variation on the Richardson number, the step size and the channel inclination.

Capítulo I

Introducción

1.1. Motivación

El fenómeno de separación de flujo tiene un efecto significativo en el funcionamiento de diversos dispositivos (intercambiadores de calor, colectores solares, cámaras de combustión y mezclado, sistemas de enfriamiento de equipos electrónicos, álabes de turbinas, enfriamiento de reactores nucleares, etc.), ya que puede presentarse de forma natural o en algunos casos inducirse para modificar el campo de flujo y mejorar la transferencia de calor.

Por otro lado, cuando la velocidad del flujo es relativamente baja y la diferencia de temperaturas entre una superficie y la corriente libre es relativamente alta, los efectos de la fuerza de flotación son significativos por lo que deben considerarse, de ahí la importancia de estudiar la interacción del flujo y la transferencia de calor cuando se presenta el fenómeno de convección mixta.

Es por ello que obtener un mejor conocimiento y entendimiento de los aspectos hidrodinámicos y térmicos del acoplamiento de los fenómenos de separación de flujo y de convección mixta es muy importante en el diseño y análisis del funcionamiento de dispositivos de ingeniería. La falta de resultados experimentales en la literatura que permitan estudiar aspectos nuevos y validar los modelos teóricos ha motivado la realización de este trabajo.

1.2. Antecedentes

La separación de flujo que ocurre cuando se presenta una expansión o contracción brusca (escalón) en un canal, ha sido extensamente estudiada en las últimas décadas. A pesar de la simplicidad de esta geometría, cuando el fenómeno se combina con un problema de transferencia de calor, involucra además de los cambios de temperatura, la generación de zonas de recirculación y caídas de presión, lo que lo convierte en un problema rico en física.

Existe una gran cantidad de publicaciones que abordan el tema de transferencia de calor por convección sobre un escalón empleando métodos numéricos. Lin et al. (1990), estudiaron numéricamente el caso bidimensional de la convección con flotación asistida en un canal vertical con escalón hacia atrás, examinaron un amplio rango de velocidades de entrada y de temperaturas en la pared, los resultados mostraron que el aumento de la fuerza de flotación disminuye la longitud de reinserción y empuja a la región de recirculación lejos de la pared caliente. La influencia de la fuerza de flotación es más pronunciada en la distribución de velocidad que en la distribución de temperatura y cambia significativamente la forma de la región principal de recirculación detrás del escalón. Se desarrolla además una zona de recirculación secundaria en la esquina del escalón que crece con el incremento de la fuerza de flotación hasta que descarga en el flujo empujando a la zona de recirculación principal, lo que deja a la pared caliente sin región de reacomodo. Este comportamiento ocurre únicamente cuando se presenta la transición al flujo turbulento, lo cual invalida los resultados bidimensionales para ese régimen. El número de Nusselt presenta un valor máximo aguas abajo del punto de reinserción y un valor mínimo en la esquina del escalón, ambos valores aumentan con el incremento del parámetro de flotación.

Lin et al. (1991), estudiaron numéricamente la convección con flotación asistida en un ducto inclinado que presenta un escalón hacia atrás y analizaron los efectos de la variación del ángulo de inclinación (fuerza de flotación) en el flujo y en la transferencia de calor. Los resultados indicaron que a medida que el ángulo de inclinación aumenta, la fuerza de flotación en dirección del flujo disminuye por lo que disminuye el número de Nusselt mientras que la longitud de reacomodo se incrementa.

Hong et al. (1993), analizaron numéricamente el flujo bidimensional en un canal con escalón hacia atrás, estudiaron los efectos de la variación del ángulo del ducto (flotación asistida y opuesta) y del número de Prandtl en las distribuciones de velocidad y temperatura. Los resultados mostraron que el incremento en el ángulo de inclinación del canal incrementa la longitud de reinserción pero disminuye el coeficiente de fricción y el número de Nusselt. El incremento en el número de Prandtl incrementa el número de Nusselt y la longitud de reinserción pero disminuye el coeficiente de fricción.

Chiang et al. (1999), realizaron un análisis numérico tridimensional del flujo laminar en un canal horizontal con escalón hacia atrás para un rango de número de Reynolds de 100 a 1000, investigaron el efecto de la variación del ancho del canal y presentaron las características topológicas del flujo.

Iwai et al. (2000), realizaron una simulación numérica tridimensional para la convección sobre un escalón hacia atrás. Fijaron el número de Reynolds, la relación de aspecto y de contracción, y estudiaron el efecto de los ángulos de inclinación del canal θ_1 y θ_2 ; se encontró que cuando el ángulo θ_1 varía, el efecto de la flotación se vuelve predominante en $\theta_1=0, 180^\circ$. Por otro lado cuando se varía el ángulo θ_2 los campos de velocidad y temperatura se vuelven asimétricos en la línea central del ducto excepto cuando $\theta_2=0, 180^\circ$. El número de Nusselt máximo se obtiene para una sola posición cerca de la pared.

Iwai et al. (2000), investigaron los efectos de la relación de aspecto en los campos de velocidad y temperatura mediante una simulación numérica tridimensional en un canal horizontal sobre un BFS a bajos números de Reynolds. Se encontró que es necesaria una relación de aspecto de por lo menos 16 para obtener una región bidimensional cerca de la línea central a un $Re=250$, esta región bidimensional se vuelve más amplia para números de Reynolds más bajos. También se encontró que el número de Nusselt máximo no aparece en la línea central pero si cerca de las paredes en cada caso. El número de Nusselt máximo se incrementa con el aumento de la relación de aspecto y del número de Reynolds.

Barbosa et al. (2005), realizaron un estudio numérico tridimensional de la convección mixta del flujo laminar en un canal horizontal sobre un escalón hacia atrás utilizando el método de volumen finito. Consideraron el escalón como un bloque conductor. Los resultados numéricos mostraron para diferentes parámetros de flotación $Ri=0, 1, 2, 3$ que las características de las distribuciones de velocidad y temperatura para la convección mixta son significativamente diferentes de aquellos de la convección forzada incluso para pequeños Ri . El efecto de incrementar el número de Richardson en la convección mixta no solo disminuye el tamaño de la zona de recirculación principal en ambas direcciones sino también mueve la posición del número de Nusselt promedio y máximo. A la salida del canal no se alcanzan las condiciones de flujo completamente desarrollado para flujos de convección mixta y se hace notar que para convección forzada $Ri=0$ el flujo sí alcanza esa condición.

Barbosa et al. (2007), desarrollaron un código numérico basado en volúmenes finitos para simular la estructura tridimensional de la convección forzada para un flujo laminar en un conducto horizontal rectangular que presenta un FFS para 3 regímenes de Reynolds $Re=200, 400, 800$ y las mismas condiciones de calentamiento para una relación de aspecto y de expansión fijas. Los resultados mostraron que la separación de flujo ocurre más cercana a la entrada del conducto para números de Reynolds mayores, esto es, tamaños mayores de la zona de recirculación corresponden a mayores Reynolds; a medida que el Reynolds se incrementa, las estructuras de flujo se vuelven

complejas y altamente tridimensionales. El número de Nusselt promedio tiene valores más elevados para números de Reynolds mayores, y se incrementa exponencialmente hasta un valor máximo que posteriormente decrece asintóticamente hasta un valor de flujo completamente desarrollado.

Barbosa et al. (2010), estudiaron el comportamiento tridimensional de la zona de separación en un flujo laminar que circula a través de un conducto horizontal rectangular con un FFS para 3 regímenes de Reynolds $Re=269, 365, 530$ y para una relación de aspecto fija $RA=4$. Realizaron un estudio numérico con el software comercial Fluent 6.3 y a su vez un estudio experimental empleando las técnicas de PIV y la visualización con humo. Los resultados indicaron que la altura de la zona de separación no modifica su magnitud en función del número de Re , mientras que la longitud de la zona de separación si depende de la velocidad del flujo, y aumenta su valor a medida que se incrementa el número de Re . Mostraron que el comportamiento de la zona de separación a lo largo del eje Z es similar al de un vórtice helicoidal, en el que el centro del vórtice cambia su posición a medida que el flujo se aproxima a la pared así como también con el incremento del número de Re .

En cuanto a trabajos que abordan el fenómeno experimentalmente, Armaly et al. (1983), emplearon la técnica de anemometría láser de efecto Doppler (LDA) para estudiar la distribución de velocidad y la longitud de reacomodo de un escalón hacia atrás en un canal horizontal para un rango de números de Reynolds $Re_{Dh} = 70$ a 8000 . Los experimentos mostraron que a pesar de contar con una relación de aspecto alta, el flujo aguas abajo del escalón permanece bidimensional únicamente para bajos y para altos números de Reynolds (régimen laminar y turbulento). Los resultados revelan no solo una zona de recirculación principal adjunta al escalón, sino también muestran regiones adicionales de separación de flujo aguas abajo del escalón. En el régimen laminar la longitud de la región de separación se incrementa con el incremento del número de Reynolds, este incremento ocurre hasta un número de Reynolds aproximado de $Re_{Dh}=1200$; un incremento mayor de este parámetro causa fluctuaciones en la velocidad que indica el inicio de la transición a la turbulencia.

Baek et al. (1993), determinaron simultáneamente las distribuciones de velocidad y temperatura en un canal vertical con escalón hacia atrás y flotación asistida mediante la utilización de LDA y anemómetro de hilo caliente, respectivamente. Utilizaron velocidades de corriente de 0.37 a 0.72 m/s, diferencias de temperatura de 10 a $30^{\circ}C$, y alturas de escalón 0.38 a 1 cm. Los resultados revelaron que para una altura de escalón dada, la longitud de reacomodo disminuye con el incremento del parámetro de flotación Gr/Re_s^2 y causa una disminución en el tamaño de la región de recirculación. El número de Nusselt en la pared caliente aguas abajo del escalón aumenta y la posición de su máximo valor se mueve más cerca del escalón con el incremento de la fuerza de flotación.

Abu-Mulaweh et al. (1993), presentaron un estudio experimental de la convección mixta en un canal con escalón hacia atrás y flotación asistida. Mediante la utilización de LDA y anemómetro de hilo caliente realizaron mediciones para un amplio rango de diferencias de temperatura, de

velocidades de entrada, de altura del escalón y de inclinación del ducto. Los resultados mostraron que para el caso horizontal la fuerza de flotación tiene efectos despreciables en las distribuciones de velocidad y temperatura pero influye significativamente en el inicio de la inestabilidad. El ángulo de inclinación afecta las distribuciones de velocidad y temperatura; mientras se incrementa el ángulo de inclinación del canal desde la vertical, el número de Nusselt local disminuye, en tanto que la longitud de reinserción y la posición del número de Nusselt máximo detrás del escalón se incrementan.

Abu-Mulaweh et al. (1994), estudiaron experimentalmente el caso de la flotación opuesta en un ducto vertical con escalón hacia atrás. Encontraron que la longitud de la zona de recirculación aumenta con el incremento de la fuerza de flotación cuando el flujo es laminar y lo opuesto ocurre cuando se desarrolla flujo turbulento aguas abajo de la zona de recirculación; al contrario del caso de flotación a favor, el número de Nusselt en la flotación opuesta disminuye cuando la fuerza de flotación aumenta.

Abu-Mulaweh et al. (1996), emplearon las técnicas LDV (Laser Doppler Velocimeter) y Cold Wire Anemometer para medir de manera simultánea las distribuciones de velocidad y temperatura respectivamente, del flujo laminar en un conducto vertical sobre un FFS con flotación opuesta. Consideraron al escalón no adiabático. Los resultados revelaron que la fuerza de flotación debida a la pared caliente aguas abajo afecta significativamente a la distribución de velocidad y de temperatura, así como al número de Nusselt local y a la posición y tamaño de la zona de recirculación. Se encontró que la zona de recirculación aguas abajo del escalón se mueve hacia el escalón y su longitud disminuye con el incremento del calentamiento de la pared aguas abajo. El número de Nusselt local disminuye con el incremento de la fuerza de flotación en la zona aguas abajo y lo opuesto puede ocurrir dentro de la zona de recirculación.

Stüer et al. (1999), investigaron experimentalmente el flujo laminar en un canal horizontal con escalón al frente, emplearon la técnica de burbujas de hidrógeno para visualización y la técnica PTV (Particle Tracking Velocimetry) para la obtención del campo de velocidades. Describieron el comportamiento dinámico y la topología del flujo.

Mouza et al. (2005), investigaron experimentalmente el esfuerzo cortante del flujo sobre un escalón hacia atrás para regímenes laminar, turbulento y en transición utilizando la técnica de electro-difusión. Identificaron las zonas aguas abajo del escalón y obtuvieron la dependencia del Reynolds con la longitud de reinserción.

Largeau et al. (2007), investigaron experimentalmente el flujo laminar en un canal horizontal con escalón al frente, describieron el comportamiento dinámico, las fluctuaciones de presión y la topología del flujo para diferentes alturas de escalón y velocidades de entrada.

Las investigaciones experimentales en su mayoría emplean técnicas de medición puntual, las cuales son útiles cuando se quiere analizar el flujo de manera estadística, desafortunadamente las estructuras que se derivan cuando se presenta la convección mixta son muy difíciles de estudiar con estas técnicas debido a la dificultad de obtener mediciones con alta resolución instantánea del flujo en varios puntos del canal. Por otro lado los estudios que obtienen mediciones de todo el campo sólo lo hacen para el caso de flujo isotérmico o para números de Richardson muy bajos.

La aportación de esta investigación es realizar un estudio experimental en un canal vertical con escalón al frente no adiabático empleando las técnicas de PIV y de visualización que permitan estudiar a detalle la estructura del flujo y generación de vórtices así como la transferencia de calor de la convección mixta en todo el campo. De la misma manera el estudiar y comparar los casos de escalón al frente y hacia atrás numéricamente, mostrando la influencia de la velocidad de entrada, de temperatura de pared, de tamaño del escalón y del ángulo de inclinación del canal en los campos de velocidad y temperatura.

1.3. Objetivos

Objetivo general:

Estudiar numérica y experimentalmente la convección mixta del flujo laminar sobre un escalón (expansión o contracción brusca), para obtener un mejor conocimiento y entendimiento de los aspectos hidrodinámicos y térmicos de la separación de flujo en esta geometría.

Objetivos específicos:

1. Emplear las técnicas experimentales PIV y de visualización para obtener el campo de velocidad y un estudio de la topología del flujo.
2. Utilizar el software comercial COMSOL Multiphysics para simular numéricamente el fenómeno físico.
3. Realizar una comparación de los resultados numéricos y experimentales obtenidos.
4. Realizar un estudio paramétrico en COMSOL variando la inclinación del canal, la relación de contracción y de aspecto, y la fuerza de flotación para determinar su influencia en la estructura del flujo y en la transferencia de calor en la placa (número de Nusselt, zonas de recirculación y longitud de acomodación).
5. Estudiar y comparar los casos de escalón al frente (FFS) y escalón hacia atrás (BFS).

Capítulo II

Planteamiento del problema

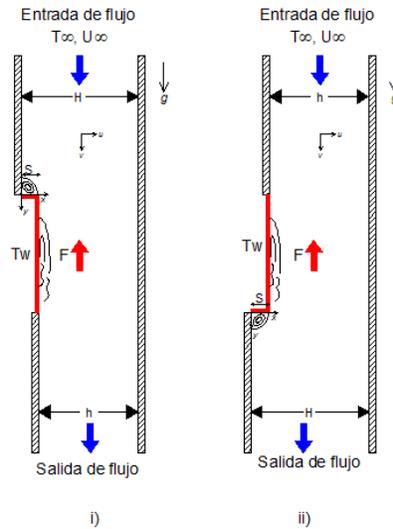
2.1. Descripción del problema

Se considera el estudio térmico e hidrodinámico de un fluido que entra a un ducto vertical con velocidad U_∞ y temperatura T_∞ . El ducto presenta un escalón sobre una de sus paredes, las cuales se consideran se encuentran a temperatura ambiente excepto aquellas que forman el escalón, las cuales se encuentran a temperatura uniforme T_w , donde $T_w > T_\infty$. Esto somete al flujo principal a un calentamiento diferencial asimétrico por lo que este problema combina los fenómenos de convección y de separación de flujo debido a los cambios de temperatura y geometría.

Se consideran los casos de contracción súbita o escalón al frente (FFS: Forward Facing Step) y de expansión súbita o escalón hacia atrás (BFS: Backward Facing Step). Se considera para ambos casos el efecto de la flotación opuesta. Lo anterior distingue un total de dos casos de estudio, los cuales se resumen a continuación en el esquema mostrado en la figura 2.1.

Se considera que la velocidad de entrada U_∞ , la temperatura de pared en la placa caliente T_w , el tamaño del escalón S y la inclinación del canal γ , tienen una influencia importante en los campos de velocidad y temperatura, y por tanto en el tamaño y forma de la o las zonas de recirculación, en la longitud de acomodación del flujo, y en la transferencia de calor.

El objetivo de estudio del problema se basa entonces en determinar la influencia de los parámetros adimensionales Reynolds $Re_s = \frac{\rho U_\infty S}{\mu}$ y Grashof $Gr_s = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)S^3}{\nu^2}$ en el número de Nusselt local y promedio definidos de la siguiente manera:



i) FFS Flotación opuesta ii) BFS Flotación opuesta
Fig. 2.1. Casos de estudio

El coeficiente convectivo local de transferencia de calor en la placa está dado por el número de Nusselt local que se define como:

$$Nu_y = \frac{qS}{k(T_w - T_\infty)} = \frac{-\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} S}{T_w - T_\infty} \quad (2.1)$$

Donde q es el flujo de calor por unidad de superficie en la placa caliente.

El número de Nusselt promedio se calcula integrando el Nusselt local a lo largo de toda la longitud de la placa.

$$\overline{Nu} = \int_0^l Nu_y dy \quad (2.2)$$

Dado que este problema involucra tanto convección natural como forzada, la importancia relativa de cada modo de transferencia de calor se determina por el valor del número de Richardson, definido como:

$$Ri_s = \frac{Gr_s}{Re_s^2} \quad (2.3)$$

El cual es el parámetro que gobierna la convección mixta y relaciona las fuerzas de flotación con las fuerzas de inercia.

Típicamente la convección natural es despreciable cuando el número de Richardson es menor que 0.1, la convección forzada es despreciable cuando el número de Richardson es mayor que 10 y ambos efectos son significativos y deben considerarse cuando el número de Richardson se encuentra entre 0.1 y 10. Lo anterior se resume en la tabla 2.1 y delimita el problema de estudio.

Tabla 2.1. Convección	
$Ri_s < 0.1$	Convección forzada
$0.1 < Ri_s < 10$	Convección mixta
$Ri_s > 10$	Convección natural

2.2. Planteamiento de hipótesis

- **Hipótesis nula**
La variación de la velocidad de entrada del fluido, la condición de temperatura en la pared, el ángulo de inclinación del canal y la relación de aspecto del mismo no mostrarán efecto significativo en la estructura del flujo y en la transferencia de calor.
- **Hipótesis alternativa**
La variación de la velocidad de entrada del fluido, la condición de temperatura en la pared, el ángulo de inclinación del canal y la relación de aspecto del mismo tendrán efecto significativo en la estructura del flujo y en la transferencia de calor

2.3. Metodología de solución

La solución del problema se realizó empleando un análisis numérico y un análisis experimental.

En el estudio numérico se resolvieron las ecuaciones de movimiento y energía que gobiernan el fenómeno mediante la simulación del problema físico con ayuda del software COMSOL Multiphysics, mientras que en el estudio experimental se utilizaron técnicas de medición ópticas no intrusivas con las que se determinó el campo de velocidad.

El caso elegido para estudiarse experimentalmente fue el de escalón al frente FFS con flotación opuesta cuyos resultados experimentales no han sido reportados aún en la literatura y los cuales servirían de base para validar los resultados numéricos de los demás casos de estudio.

En los capítulos III y IV se detallan las metodologías experimental y numérica, respectivamente llevadas a cabo para la solución del problema.

Capítulo III

Estudio experimental

3.1. Introducción

En este capítulo se describen las técnicas de medición empleadas en la obtención del campo de velocidad, se describe también el dispositivo experimental utilizado, el procedimiento experimental y las consideraciones realizadas durante los experimentos.

3.2. Técnicas de medición

3.2.1. Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV)

PIV es un método óptico de visualización de flujo utilizado para obtener mediciones instantáneas de velocidad de toda una región. Se basa en medir el desplazamiento de partículas trazadoras sembradas en el fluido, figura 3.1. Se considera que las partículas trazadoras siguen confiablemente la dinámica del flujo. Estas partículas son iluminadas en un plano o en un volumen del flujo al menos en dos ocasiones en un intervalo de tiempo definido. El movimiento de las partículas es utilizado para calcular la velocidad y dirección del flujo bajo estudio. La luz dispersa de las partículas es grabada en una imagen o una secuencia de imágenes mediante una película fotográfica o una cámara CCD. Conociendo el intervalo de tiempo establecido de las iluminaciones y el desplazamiento de las partículas trazadoras entre dos o más iluminaciones se determina mediante procesamiento de imágenes la velocidad del flujo, y de esta manera se construye el campo de velocidades.

Típicamente un esquema de medición con PIV, consiste de una cámara (normalmente una cámara digital con chip CCD), un estrobo o láser con un arreglo óptico para limitar la región iluminada (normalmente lentes cilíndricos que convierten el haz de luz en un plano), un sincronizador que

actúa como un disparador externo para el control de la cámara y el láser, las partículas trazadoras sembradas en el fluido y el flujo bajo investigación. El software complementario al PIV se utiliza para el post-procesado de las imágenes obtenidas.

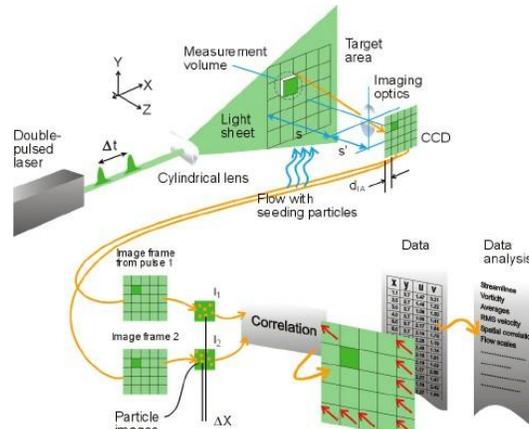


Fig. 3.1. Principio de medición PIV

Para la realización de este trabajo se empleó un sistema de velocimetría de imágenes de partículas Dantec Dynamics para medir las componentes verticales y horizontales de velocidad en un plano paralelo al flujo. Para iluminar el plano se empleó un láser tipo Nd-YAG de doble pulso (New Wave Gemini) a 200 mJ y con una longitud de onda de 532 nm con una duración de pulso de 10 ns. El intervalo entre los dos pulsos se ajustó dependiendo del valor del número de Reynolds, variando desde 50 000 hasta 80 000 μ s. El láser cuenta con una lente cilíndrica que produce un haz de luz divergente que no excede de 1 mm de espesor.

Se emplearon dos cámaras Hi Sense de 12 bit con 1280×1024 pixeles a 8 cuadros por segundo que cuentan con lente Nikon con diámetro de 60 mm. Las cámaras fueron orientadas de forma perpendicular al plano de medición y fueron colocadas una después de la otra con la finalidad de incrementar el área de estudio sobre el ducto. La sección de pruebas consta entonces de 24 cm de longitud por 10 cm de ancho aproximadamente.

Con el fin de asegurar que las partículas trazadoras puedan seguir el movimiento del flujo con precisión, éstas deben escogerse cuidadosamente a fin de contar con una flotabilidad neutra y dispersar eficientemente la luz. El trazador empleado en los experimentos fue poliamida con un diámetro de 5 μ m, sus características se resumen en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de la PSP Polyamide						
Material	Tamaño promedio (μm)	Distribución de tamaño	Forma	Densidad (g/cm^3)	Punto de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	Índice de refracción
Poliamida 12	5	1-10 μm	No esférica pero redonda	1.03	175	1.5

El número de partículas sembradas en el flujo también es de gran importancia para obtener una buena correlación. Como regla, de 10 a 25 partículas deben ser vistas dentro de cada área de interrogación. Las partículas fueron añadidas al fluido de trabajo en pequeñas cantidades hasta obtener un sembrado óptimo, la densidad de sembrado adecuada se logró al obtener una buena correlación.

Las imágenes procesadas cuentan con un área de interrogación de 32×32 pixeles con 25% de traslape vertical y 25% de traslape horizontal. Los vectores de velocidad fueron obtenidos con imágenes dobles empleando un algoritmo de correlación adaptiva.

3.2.2. Fluorescencia Inducida por Láser (Planar-LIF)

Planar-LIF es una técnica de medición óptica utilizada para medir mapas instantáneos de temperatura o concentración en fluidos líquidos. El principio de medición se basa en el proceso atómico de excitación en el que si una molécula fluorescente es expuesta a un campo electromagnético o específicamente al haz de un láser, los fotones de la molécula fluorescente causan el desplazamiento de los electrones de un estado de energía a otro; este desplazamiento resulta en un incremento potencial de energía de la molécula de un estado inicial a un estado excitado. Cuando los electrones regresan del estado excitado al estado inicial, la luz fluorescente puede ser radiada. Es decir, al incidir un haz de luz sobre una molécula fluorescente ésta es excitada y re-emite luz a una longitud de onda más alta que la de la luz incidente.

Por tanto esta técnica utiliza un colorante fluorescente que se mezcla previamente con el fluido de trabajo. Si la concentración del colorante fluorescente se mantiene constante, el nivel de fluorescencia re-emitido varía únicamente con la temperatura local, entonces la temperatura del campo de flujo puede ser calculada midiendo la intensidad de la luz fluorescente emitida al ser recibida por un detector. El desafío técnico consiste en capturar la fluorescencia y filtrar la luz excitante (láser), la cual es considerada “fuente de ruido”, esto es posible gracias al uso de filtros ópticos que sólo permiten la entrada de la luz re-emitida al detector.

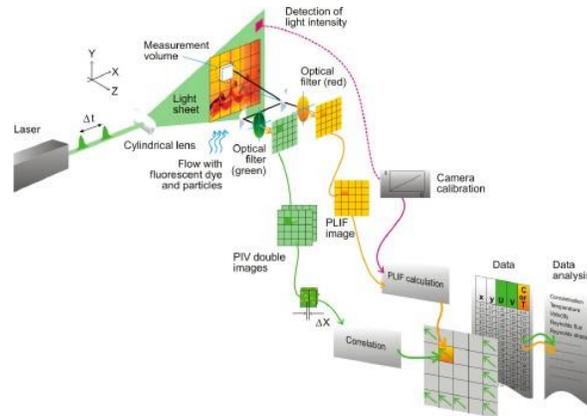


Fig. 3.2. Principio de medición Planar-LIF

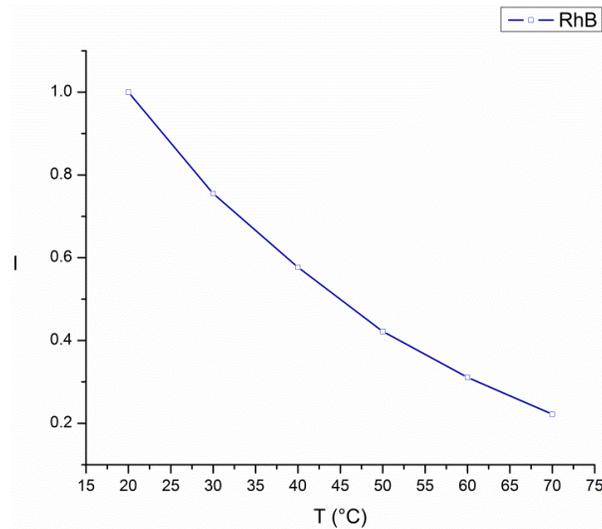
De la misma forma que en PIV, el sistema Planar-LIF utiliza una fuente de láser (típicamente Nd:YAG o Argón-ion) con la óptica apropiada para formar una hoja delgada de luz. Emplea una cámara equipada con un filtro de tal manera que se registra sólo la luz fluorescente. El procesamiento de imágenes consiste en transformar las imágenes de fluorescencia en mapas de concentración o temperatura, de acuerdo con la calibración realizada previamente.

Los colorantes comúnmente utilizados en líquidos son rodamina 6G (para mediciones de concentración), rodamina B (para mediciones de temperatura) y fluoresceína disódica (para mediciones de temperatura o concentración).

Para la realización de esta parte experimental se utilizó el sistema Planar-LIF de Dantec Dynamics en la obtención del campo de temperatura en un plano paralelo al flujo. Se emplearon el mismo tipo de laser y cámaras que para el sistema PIV, los cuales fueron descritos anteriormente. Por otro lado, el trazador utilizado fue Rodamina B, cuyas características se resumen en la tabla 3.2, mientras que la gráfica 3.3 muestra la dependencia de la intensidad de fluorescencia (normalizada a 20°C) con la temperatura para la longitud de onda de excitación más alta. En el rango de interés para este estudio, la sensibilidad de la Rodamina B a la temperatura es de 0.0245/°C.

Sin embargo, por algunas limitaciones relacionados con la disponibilidad del equipo, no fue posible ir más allá con los experimentos con PLIF por lo que solamente se presentan algunos resultados cualitativos obtenidos utilizando la Rodamina 6G como trazador.

Tabla 3.2. Características la Rodamina B			
Rhodamine B	Más bajo	Más alto	Óptimo
Longitud de onda de absorción (nm)	460	590	526
Longitud de onda de emisión (nm)	560	670	580
Sensibilidad pH	Debajo pH=6, únicamente		
Sensibilidad a la temperatura	Si (-2 hasta -5%/°C)		



Graf. 3.1 Intensidad en función de la temperatura

3.3. Modelo experimental

El modelo utilizado consta de un ducto de sección transversal rectangular construido de acrílico transparente cuyas paredes tienen 6 mm de espesor. La parte media del ducto presenta una reducción del área transversal de tal manera que forma un escalón de 1.5 cm sobre una de las paredes. El escalón y una sección de pared de 10 cm de longitud aguas abajo del mismo están formadas por una placa delgada de aluminio y juntas corresponden a la región de alta temperatura que somete al flujo principal (vertical) a un calentamiento diferencial asimétrico. La figura 3.4 muestra el modelo experimental utilizado.

La relación de aspecto y la relación de expansión del ducto se fijan con relación a la altura del escalón (S), y se definen respectivamente como:

$$R_A = \frac{W}{S} = 13.34 \quad (3.1)$$

$$R_E = \frac{H}{S} = 6.67 \quad (3.2)$$



Fig. 3.3. Modelo experimental

La placa de aluminio y el escalón se mantienen a temperatura constante y uniforme con ayuda de un baño térmico que hace fluir agua dentro del depósito secundario adyacente al ducto y que permite controlar la temperatura del fluido y de esta manera la de la pared con una precisión adecuada.

El soporte del ducto fue construido con un perfil estructural de acero PTR 3"×1/4". Cabe señalar que el soporte fue diseñado de tal manera que permite girar el canal en dirección longitudinal y fijarlo en la posición angular deseada (γ) con el fin de abordar experimentalmente este caso de estudio. El alcance de este trabajo no incluyó el estudio del cambio en el ángulo, quedando de esta manera planteado como posible trabajo futuro.

Como fluido de trabajo se utilizó agua, la cual se transfiere por medio de una bomba hasta un depósito secundario ubicado arriba del canal y que conecta con la entrada del mismo. Este depósito cuenta con esferas que amortiguan el chorro de agua proveniente de la línea de descarga de la bomba. A la entrada del canal se colocaron rectificadores que permiten laminarizarlo. El agua que sale del canal pasa por un sistema de enfriamiento y posteriormente se lleva hasta un tanque de almacenamiento al cual se conecta la línea de succión de la bomba, formando de esta manera el circuito de recirculación. El flujo del canal es regulado mediante una válvula de aguja y medido con ayuda de un rotámetro colocados ambos a la salida del canal. Para mantener el nivel del tanque secundario, se colocó una línea de desfogue que permitió mantener constante el nivel de la superficie libre.

La temperatura del fluido a la entrada y salida del canal, así como la temperatura de la placa y la temperatura ambiente fueron monitoreadas en todo momento durante los experimentos con ayuda de termopares tipo K conectados a indicadores digitales.

El sistema experimental cuenta además con un posicionador automatizado en tres dimensiones para ubicar las cámaras y el láser en la región deseada del ducto. La figura 3.5 muestra un esquema de la configuración experimental, mientras que la figura 3.6 muestra una imagen de la instalación experimental real.

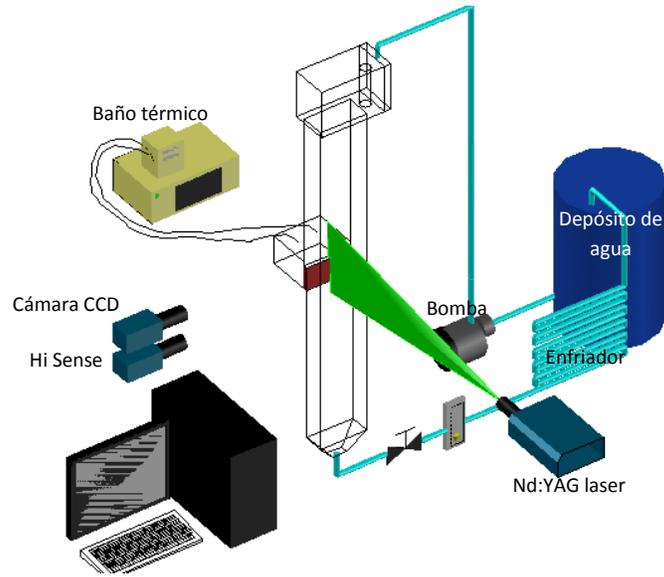


Fig. 3.4. Esquema de la configuración experimental

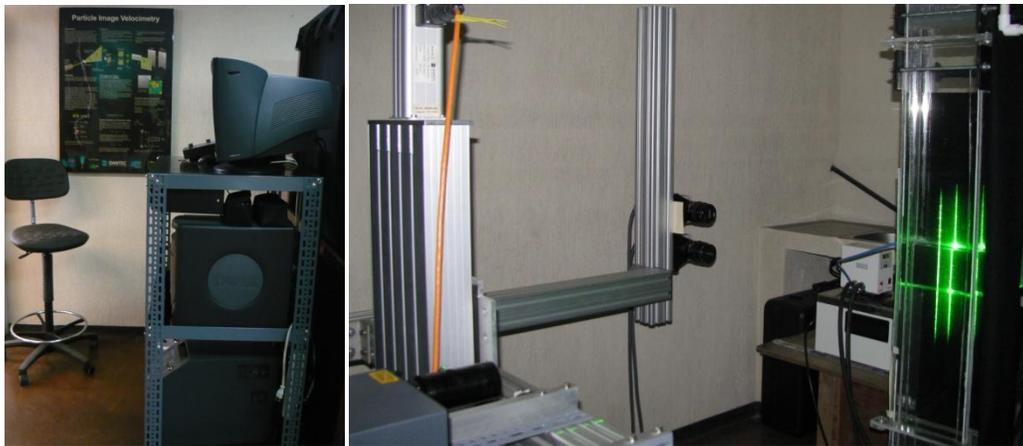


Fig. 3.5. Instalación experimental

3.4. Procedimiento experimental

Las mediciones se llevaban a cabo una vez que se alcanzaba el equilibrio térmico entre el agua que se encuentra en el tanque de almacenamiento y agua que sale del canal, es decir, cuando las pérdidas por conducción y convección a lo largo del circuito más la energía retirada por el sistema de enfriamiento son iguales al calor añadido por la placa.

La determinación de la influencia del número de Richardson debida al Grashof se obtuvo modificando la diferencia de temperaturas entre el fluido y la placa caliente para un valor de número de Reynolds fijo (gasto constante). Para estudiar la influencia debida al número de Reynolds, se varió la velocidad del fluido para una diferencia de temperaturas fija entre el fluido y la placa. Se realizaron un total de 11 experimentos, 6 para el caso de estudio de la influencia del Grashof y 5 para el caso de estudio de la influencia del Reynolds, estos parámetros de medición se resumen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros de medición					
ΔT (K) @Q = 4 l/min	Gr_s	Ri_s	Q (l/min) @ $\Delta T = 2.5$ K	Re_s	Ri_s
0.1	1.2×10^3	0.36	4	59	9.5
0.2	2.5×10^3	0.7	5	74.8	6.1
0.5	6.3×10^3	1.8	6	89.9	4.2
1.0	1.2×10^4	3.7	7	104	3.1
1.5	1.9×10^4	5.6	8	119.8	2.3
2.0	2.6×10^4	7.5			
2.5	3.4×10^4	9.5			

Los números de Reynolds y Grashof fueron obtenidos con las propiedades termofísicas evaluadas a la temperatura de película T_f . En el anexo A se incluye el código utilizado en el cálculo de los parámetros adimensionales con el software EES.

Para obtención del campo de velocidades se realizaron 2 series de mediciones y tres repeticiones para cada uno de los experimentos. Cada serie se realizó con 200 imágenes, se estableció que un total de 1200 muestras de velocidad instantánea eran suficientes para poder determinar con precisión la velocidad promedio del flujo.

El software Flow Manager 4.50.17 puede graficar los campos de velocidad, líneas de corriente, superficies de iso-velocidad, etc., pero las herramientas que utiliza para graficar son limitadas por lo que se optó por exportar los datos provenientes del análisis estadístico en un archivo con extensión .DAT que contiene las posiciones (x,y) y las componentes de la velocidad (u,v) y procesarlos mediante el uso de TECPLOT360® y ORIGIN para ser presentados en forma de gráficas y animaciones. Estos resultados se presentan y analizan en el capítulo V.

Capítulo IV

Estudio numérico

4.1. Introducción

En este capítulo se describe la metodología computacional utilizada en el análisis numérico del fenómeno físico, se define el modelo matemático mediante las ecuaciones gobernantes y las condiciones de frontera, se describe el método numérico empleado en la discretización y solución de las ecuaciones, y se detalla también el proceso para la obtención de la solución numérica mediante el uso del software COMSOL Multiphysics®.

4.2. Método de solución: Elemento Finito

La solución de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales mediante métodos numéricos necesita de una discretización espacial y temporal. Las discretizaciones aproximan las ecuaciones en derivadas parciales a sistemas de ecuaciones algebraicas mediante diferentes tipos de formulaciones matemáticas que incorporan los valores de las propiedades de interés en los diferentes nodos de la malla de cálculo.

El Método de Elemento Finito (FEM por sus siglas en inglés) convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial, que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denominan nodos. Dicho conjunto forma una red, denominada malla, formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". La malla se genera dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada.

De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones del valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

La principal característica del método numérico de elemento finito es que las ecuaciones están multiplicadas por funciones de peso antes de ser integradas sobre el dominio. En su esquema más simple, la solución se aproxima por medio de una función lineal en cada elemento, de manera que pueda garantizarse la continuidad de la solución a través de las fronteras de los elementos. Tales funciones pueden ser construidas a partir de sus valores en los extremos de los elementos. Las ecuaciones que deben ser resueltas se obtienen imponiendo la selección de una solución óptima de entre un conjunto de funciones permitidas (la que presente residual mínimo).

Una importante propiedad del método, es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

Para la realización de este trabajo la discretización del sistema acoplado de ecuaciones diferenciales parciales se obtuvo mediante el uso de un esquema de elemento finito y fueron resueltas utilizando el paquete COMSOL Multiphysics® (versión 4.2).

COMSOL Multiphysics® incorpora un importante número de sistemas físicos predefinidos con sus ecuaciones (modelos), agrupados en áreas temáticas (módulos), junto con extensas bibliotecas de materiales; además permite la utilización simultánea de diferentes modelos (acoplamiento de diferentes físicas) dando lugar a una solución multifísica en un mismo problema. Incluye herramientas de post-procesado de información que permiten interpretar los resultados obtenidos mediante la representación gráfica de los mismos.

Por todas las ventajas que ofrece el paquete comercial COMSOL Multiphysics 4.2 ® se optó por dar solución numérica al problema planteado mediante su utilización.

4.3. Modelo numérico: Ecuaciones gobernantes, condiciones iniciales y de frontera

Se abordaron numéricamente los casos de estudio planteados en el capítulo II. A continuación, se describe únicamente la metodología utilizada en la solución del primer caso, que corresponde al estudio del escalón al frente FFS con flotación opuesta y que coincide con el caso del estudio experimental. La diferencia en la simulación numérica para cada caso de estudio radica en la designación de las condiciones de frontera y en la variación respectiva de la geometría, por lo que no se considera necesaria la descripción detallada de la metodología empleada en cada uno de ellos.

4.3.1. Descripción del modelo

Se consideró que fluye agua a través de un ducto que experimenta una contracción súbita con calentamiento. Se asumió que el agua entra al canal con temperatura y velocidad conocidas T_∞ y U_∞ , respectivamente, que las paredes del canal se encuentran a temperatura T_∞ excepto por la sección que se encuentra aguas abajo del escalón y el escalón mismo (esto es, la placa de calentamiento), las cuales se encuentran a temperatura uniforme T_w , donde $T_w > T_\infty$.

La altura del escalón es S , la longitud de la pared caliente es l y se ubica aguas abajo del escalón, la sección aguas arriba del escalón tiene una longitud L_1 y ancho H , mientras que la sección aguas abajo del escalón tiene longitud $L_2 + l$ y ancho h , entonces $H = h + S$ tal como se ilustra en el esquema de la figura 4.1a. Se considera que el origen de los ejes coordenados se ubica en el escalón donde el sentido positivo es hacia abajo para Y y hacia la derecha para X . La figura 4.1b muestra un esquema del dominio computacional empleado en el estudio del efecto de la inclinación del canal, para el que el ángulo $\gamma = 0^\circ$ corresponde a la posición vertical y el ángulo $\gamma = 90^\circ$ a la posición horizontal.

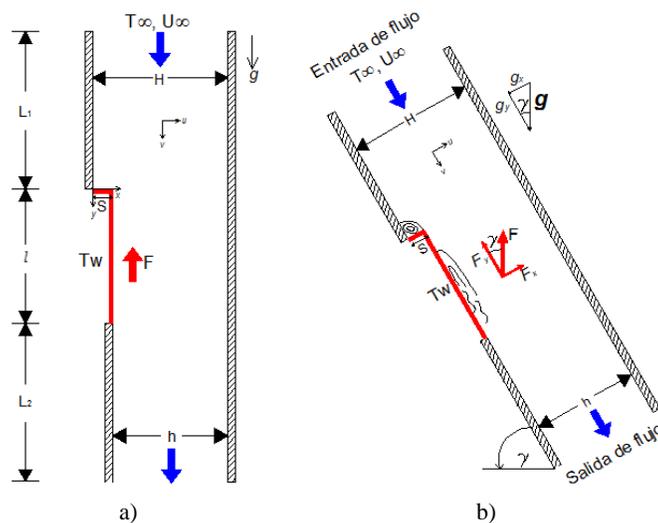


Fig. 4.1. Dominio computacional

4.3.2. Ecuaciones gobernantes

Se estableció el modelo numérico del fenómeno mediante la descripción físico-matemática del problema, se plantearon las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan el fenómeno de la convección mixta para un fluido Newtoniano, éstas son: la ecuación de continuidad, las ecuaciones de cantidad de movimiento y la ecuación de la energía.

Se consideró al flujo como no isotérmico, laminar, bidimensional, incompresible y permanente. Las propiedades del fluido se consideraron constantes y fueron evaluadas a la temperatura de película T_f , definida como:

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} \quad (4.1)$$

Se consideró que la aceleración de la gravedad actúa verticalmente hacia abajo. Se despreció el término de disipación viscosa en la ecuación de la energía y las variaciones de densidad en las ecuaciones de conservación de masa y energía. Las ecuaciones de movimiento contienen los efectos de flotación, en las que se ha considerado de acuerdo con la aproximación de Boussinesq ($\beta\Delta T < 0.1$) que la fuerza de flotación es función directa de la variación de la densidad provocada por el coeficiente de expansión térmica del fluido.

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_\infty)] \quad (4.2)$$

De esta manera las ecuaciones gobernantes que describen el problema físico se expresan en forma adimensional como:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (4.3)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{Gr_x}{Re_s^2} \theta + \frac{1}{Re_s} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (4.4a)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{Gr_y}{Re_s^2} \theta + \frac{1}{Re_s} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (4.4b)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr Re_s} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4.5)$$

En las que se emplearon las variables adimensionales definidas de la siguiente manera:

$$U = \frac{u}{U_\infty} \quad (4.6a)$$

$$V = \frac{v}{U_{\infty}} \quad (4.6b)$$

$$X = \frac{x}{S} \quad (4.7a)$$

$$Y = \frac{y}{S} \quad (4.7b)$$

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_w - T_{\infty}} \quad (4.8)$$

$$P = \frac{P + \rho_{\infty} g y \cos \gamma + \rho_{\infty} g x \sin \gamma - P_{\infty}}{\rho_{\infty} U_{\infty}^2} \quad (4.9)$$

Donde:

S = altura del escalón

U_{∞} = velocidad de entrada

T_w, T_{∞} = temperatura de pared y temperatura del fluido a la entrada, respectivamente.

Mientras que los parámetros adimensionales Reynolds, Grashof, Prandtl y Richardson se definen como:

$$Re_s = \frac{\rho U_{\infty} S}{\mu} \quad (4.10)$$

$$Gr_s = \frac{g \beta (T_w - T_{\infty}) S^3}{\nu^2} \quad (4.11a)$$

$$Gr_x = Gr_s \sin \gamma \quad (4.11b)$$

$$Gr_y = Gr_s \cos \gamma \quad (4.11c)$$

$$Ri = \frac{Gr_s}{Re_s^2} \quad (4.12)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.13)$$

4.3.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera adimensionales impuestas al dominio computacional fueron las siguientes:

- A la entrada del canal, se supone un perfil de velocidad uniforme U_∞ con temperatura T_∞

$$\begin{aligned} 0 < X < \frac{H}{S}; \quad Y = -\frac{L_1}{S} \\ U = 1 \quad V = \theta = 0 \end{aligned} \quad (4.14a)$$

- A la salida del canal, el flujo se considera completamente desarrollado por lo que la condición de frontera describe gradientes de cero para todas las variables.

$$\begin{aligned} 1 < X < \frac{H}{S}; \quad Y = \frac{L_2+l}{S} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = 0 \end{aligned} \quad (4.14b)$$

- Todas las paredes del canal se consideran a temperatura T_∞ y se asume la condición de no deslizamiento.

$$\begin{aligned} X = 1; \quad \frac{l}{S} \leq Y \leq \frac{L_2}{S} \\ U = V = \theta = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X = 0; \quad -\frac{L_1}{S} \leq Y \leq 0 \\ U = V = \theta = 0 \end{aligned} \quad (4.14c)$$

$$\begin{aligned} X = H; \quad -\frac{L_1}{S} \leq Y \leq \frac{L_2+l}{S} \\ U = V = \theta = 0 \end{aligned}$$

- En la pared formada por la placa caliente ubicada aguas abajo del escalón y el escalón mismo, se consideró la condición de no salto de temperatura y de no deslizamiento.

$$\begin{aligned} X = 1; \quad 0 < Y < \frac{l}{S} \\ U = V = 0 \quad \theta = 1 \end{aligned} \quad (4.14d)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq X \leq 1; \quad Y = 0 \\ U = V = 0 \quad \theta = 1 \end{aligned}$$

4.4. Proceso de análisis numérico

En general para llevar a cabo un análisis numérico se consideran tres etapas principales:

- Pre-proceso
- Cálculo o proceso
- Post-proceso

A continuación se describe cada una de ellas y se detalla su aplicación en COMSOL.

4.4.1. Pre-proceso

En esta etapa se obtiene el dominio computacional mediante la definición de la geometría, la generación de la malla, la definición de la física involucrada y de las condiciones de frontera, así como la información de las propiedades del material y otras características del problema que se almacenan junto con la información que describe la malla.

Geometría

La geometría utilizada fue definida mediante secciones rectangulares que acopladas forman el dominio de cálculo, y cuyas dimensiones se designaron de la siguiente manera: $L_1=43S$, $l=10S$ y $L_2=166.67S$, $H=6.67S$ y $h=5.67S$.

Las dimensiones de L_1 , l , H , y h , así como la relación de expansión del ducto $RE=6.67$ coinciden con las del modelo experimental, mientras que L_2 se consideró mucho mayor debido a que la condición de frontera requiere de alcanzar un flujo desarrollado a la salida, Barbosa et al. (2005).

Mallado

- Distribución de la malla

Para la construcción de la malla de discretización se utilizó una malla estructurada por bloques, esta metodología presenta diferentes niveles de subdivisión del dominio computacional a fin de obtener ecuaciones discretizadas más simples y fáciles de resolver. La división en bloques permitió obtener un conjunto de subdominios cada uno de los cuales se discretizó utilizando una malla estructurada regular formada por elementos tipo cuadrilátero.

Los subdominios se distribuyeron de tal manera que conforme se acercan a la región de interés (escalón) aumenta el número de nodos y a medida que la malla se aleja de ella el número de nodos disminuye, alcanzando el máximo espaciamiento entre nodos en los subdominios extremos del canal. De esta manera se obtuvo un buen control sobre el tamaño de los elementos en todo el dominio de trabajo.

- Independencia de la malla

Cuando el método numérico es estable y todas las aproximaciones usadas en el proceso de discretización son consistentes, se encuentra usualmente que la solución converge hacia una que es independiente de la malla. Para determinar esto se debe realizar un análisis de sensibilidad de malla, cuyo objetivo es generar una malla que cuente con una distribución aceptable, esto comprende que el tipo de elemento que conforma a la malla y el tamaño de dicho elemento no tengan efecto en los resultados que se obtienen.

Este análisis se realizó creando una serie de mallas con diferentes distribuciones y se pusieron a prueba cada una de ellas mediante experimentos numéricos que consistían en repetir los cálculos sobre mallas cada vez más refinadas y comparar los resultados obtenidos.

Se determinó que para el rango de parámetros examinados en este estudio, una resolución mínima de $0.05S$ como elemento mínimo como el caso de Iwai et al. (2000), es suficiente para proporcionar una solución que sea independiente de la malla.

De esta manera el tamaño de los elementos va desde $1 \times 10^{-3} \text{m}$ en la región de interés a $4 \times 10^{-3} \text{m}$ en las regiones de entrada y salida del canal respectivamente, por lo que la malla consiste en promedio de 133,375 elementos distribuidos en 5 subdominios. La figura 4.2 muestra un esquema de la distribución de malla utilizada.

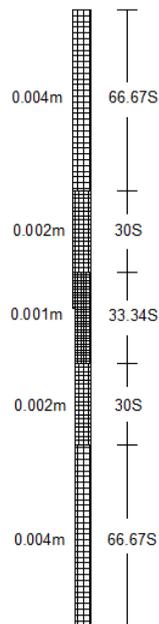


Fig. 4.2. Esquema de distribución de malla

Declaración de la física involucrada y de las condiciones de frontera

Para el modelado del fenómeno se seleccionó el módulo *Non-Isothermal Flow* el cual acopla los módulos *Laminar flow* (ecuaciones de continuidad y de momentum) y *Heat Transfer* (ecuación de la energía). Se establecieron las condiciones iniciales y de frontera ya descritas anteriormente.

Materiales

Uno de los pasos más importantes es la definición de las propiedades térmicas de los materiales que se utilizan en el modelo. Como fluido de trabajo se seleccionó agua con propiedades constantes.

4.4.2. Proceso

Consiste en resolver el sistema de ecuaciones mediante un algoritmo. Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal o un problema dependiente del tiempo, el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

Los parámetros estudiados numéricamente fueron U , θ , S y γ ; que corresponden a la velocidad de entrada al canal, la temperatura en la placa, el tamaño del escalón y el ángulo de inclinación del canal, respectivamente, los cuales permitieron observar la influencia del número de Reynolds y del número de Grashof en los campos de velocidad y temperatura. Se muestra a continuación la tabla 4.1 en la que se resumen los rangos de valores considerados para cada parámetro de estudio.

Configuración	FFS	BFS
Re_S	38 - 83	50 - 83
Gr_S	0 - 1×10^3	0 - 1×10^3
Ri_S	0.1 - 0.7	0.1 - 0.5
α [°]	0 - 90°	0 - 90°
S	0.5 - 2.5 cm	0.5 - 1.5 cm

Obtención de la solución

Durante el proceso de cálculo el programa despliega una gráfica del comportamiento de los residuales, de esta manera puede observarse si el error sigue una tendencia decreciente y si se observa lo contrario es posible cambiar los factores de relajación a fin de lograr la convergencia.

Criterio de convergencia

El criterio de convergencia para los residuales de velocidad y temperatura en X y Y , para este estudio fue de 1×10^{-3} . Es posible definir también un número de iteraciones máximo en el cual se espera que sea resuelto el caso y de no llegar a una solución se sigue iterando.

4.4.3. Post-proceso

El cálculo proporciona tal cantidad de datos que resulta conveniente procesarlos de alguna manera adicional para hacerlos más comprensibles e ilustrar diferentes aspectos del problema. En la etapa de post-proceso los resultados obtenidos de la resolución del sistema son tratados para obtener representaciones gráficas y magnitudes derivadas que permitan extraer conclusiones del problema. Los resultados obtenidos del cálculo numérico se presentan en el capítulo siguiente.

Capítulo V

Resultados

5.1 Introducción

En este capítulo se discuten los resultados derivados de los estudios experimental y numérico. Se realiza una comparación entre ellos que permite validar los obtenidos en la simulación.

Los resultados experimentales para el caso FFS con flotación opuesta se presentan de la siguiente manera:

- Influencia del número de Grashof.
- Visualización del flujo
- Influencia del número de Reynolds.

Puesto que el análisis numérico ofrece la posibilidad de estudiar ambas geometrías FFS y BFS, los resultados obtenidos se exponen de la siguiente manera:

- Influencia del número de Grashof.
- Influencia del número de Reynolds.
- Influencia de la inclinación del canal.
- Influencia del tamaño del escalón.

5.2. Análisis de resultados experimentales

Los resultados derivados del estudio experimental mostraron que al incrementarse el número de Richardson, ya sea debido al incremento de la temperatura en la pared o a la disminución de la velocidad de entrada, la influencia de la fuerza de flotación aumenta oponiéndose al flujo forzado provocando eventualmente la reversión del flujo y creando un perfil de velocidades asimétrico en el que se generan estructuras vorticosas complejas que aparecen en la cercanía de la placa y el escalón. El estudio experimental permite identificar los regímenes por los que atraviesa el flujo bajo estudio los cuales son descritos a lo largo de esta sección.

5.2.1. Influencia del número de Grashof.

La figura 5.1a) muestra el campo de velocidad en mm/s para Richardson 0.36 en la región $0 \leq X \leq 6.6$ y $-2 \leq Y \leq 14$, mientras que la figura 5.1b) muestra el caso de Richardson 0.7, en la región $0 \leq X \leq 6.6$ y $-4 \leq Y \leq 12$. El incremento del número de Richardson es resultado de la variación de la temperatura de pared para un valor fijo de la velocidad de entrada al canal, esto es, la variación del número de Grashof para un valor de Reynolds fijo. Los campos de velocidad mostrados incluyen líneas de corriente que permiten estudiar la estructura del flujo.

Los resultados muestran que el incremento de temperatura en la placa y el escalón, desarrolla una región de baja velocidad aguas abajo del mismo que causa reversión de flujo y que desplaza al flujo vertical principal ocasionando un incremento considerable en la velocidad. El tamaño de la región de recirculación, el efecto ocasionado aguas abajo de la placa y la velocidad del flujo principal, se incrementan al incrementarse el valor del número de Richardson.

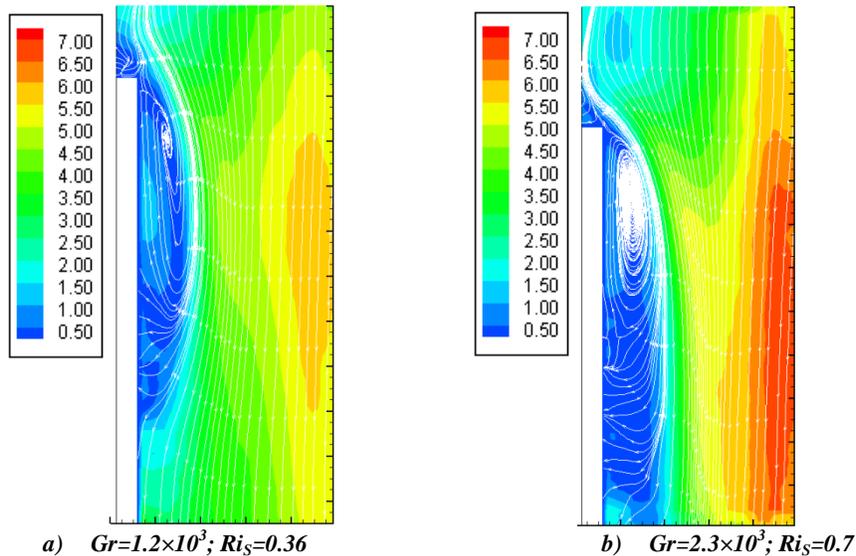


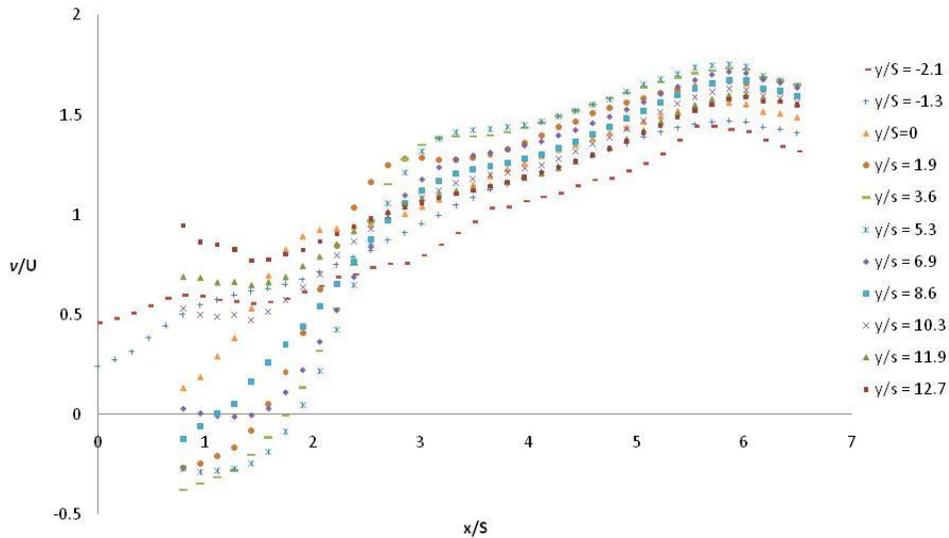
Fig. 5.1. Influencia de la temperatura de pared

Las gráficas 5.1 y 5.2 muestran el perfil de velocidades de la componente vertical V , en función de la coordenada transversal X , a distintas posiciones de Y para los casos de $Ri = 0.36$ y $Ri = 0.7$, respectivamente. La posición $Y = 0$ corresponde al inicio del escalón para ambas gráficas, los valores negativos de Y denotan posiciones aguas arriba del escalón mientras que los positivos indican posiciones debajo de él.

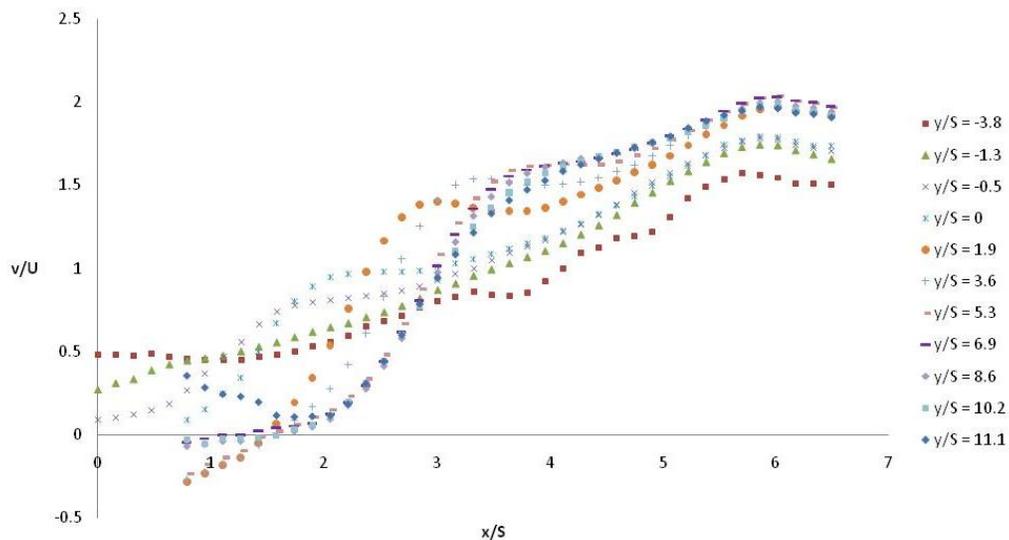
El caso $Ri = 0.36$, gráfica 5.1, muestra que en general los valores más bajos de velocidad se encuentran en la cercanía del escalón $0 < X < 2$. Los valores negativos de V para $1.9 < Y < 8.6$ indican el flujo que va en sentido opuesto al flujo principal y que se ubica dentro de la zona de recirculación, para estos valores corresponden también las mayores velocidades lejos de la

pared como efecto del flujo desplazado por la presencia de la zona de recirculación. Los valores positivos para $Y > 8.6$ indican la reinserción del flujo y el final de la región de recirculación.

El mismo comportamiento se observa en la gráfica 5.2 para el caso $Ri = 0.7$, cuya principal diferencia con el caso anterior es el incremento en la velocidad que alcanza el flujo principal lejos del escalón y el incremento en la longitud de reinserción.



Graf. 5.1. Perfil de velocidades de la componente V para $Ri = 0.36$



Graf. 5.2. Perfil de velocidades de la componente V para $Ri = 0.7$

5.2.1.1 Visualización de flujo

La estructura del flujo para el caso particular $Ri = 0.7$ fue estudiada con mayor detalle realizando algunas visualizaciones utilizando Rodamina 6G como trazador.

El colorante fue inyectado al inicio de la zona de laminarización en varios puntos del plano de medición ($Z = 0.5$) a fin de generar líneas de emisión.

La figura 5.2 a) y b), muestra el caso de visualización de la zona de recirculación, para la cual únicamente se inyectó Rodamina 6G cerca de la pared que presenta la contracción brusca. Los resultados obtenidos permiten identificar el tamaño y comportamiento de la región de recirculación.

La figura 5.3 muestra las imágenes obtenidas a distintos tiempos para el caso de inyección del trazador en varios puntos a lo largo del plano de medición, en ellas se observa una estructura laminar aguas arriba del escalón mientras que aguas abajo de éste, se desarrolla la zona recirculación con estructuras vorticosas, el tamaño de la zona de recirculación se muestra perfectamente definido así como la influencia de ésta en el flujo principal aguas arriba y aguas abajo del escalón.

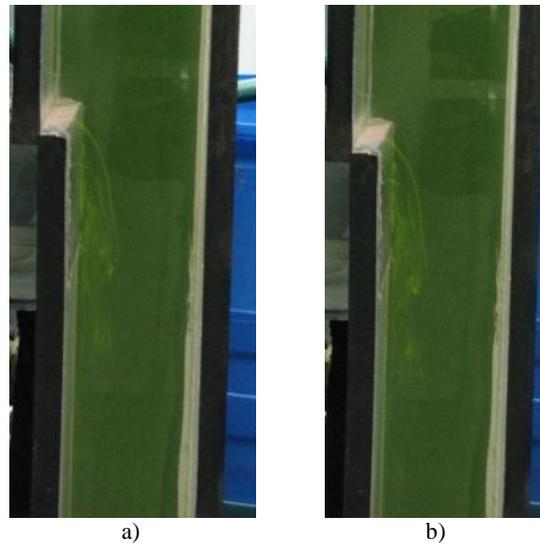


Fig. 5.2 Visualización de zona de recirculación para $Ri = 0.7$

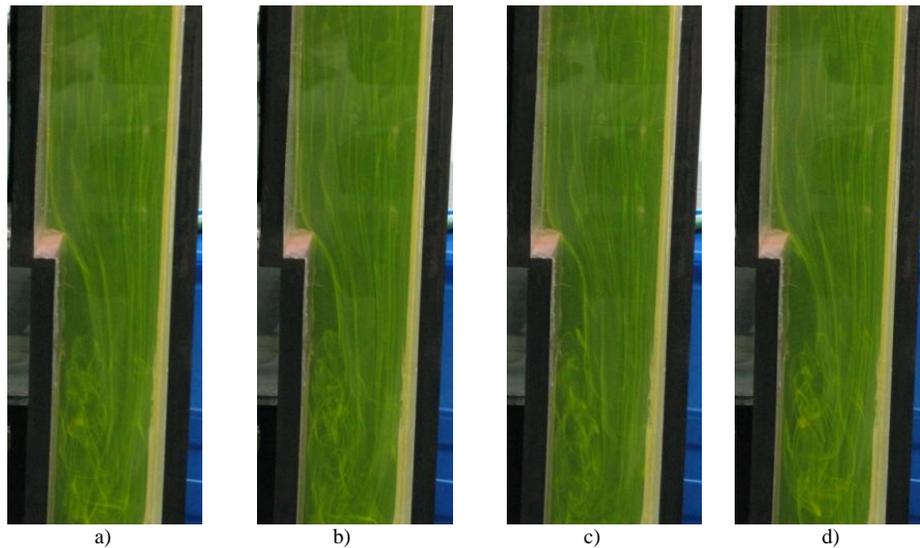


Fig. 5.3 Visualización del flujo en el canal para $Ri = 0.7$

5.2.1.2 Influencia de las paredes laterales: flujo bidimensional.

Con el fin de verificar la suposición inicial de flujo bidimensional y observar el efecto de las paredes laterales sobre al campo de flujo, se efectuaron mediciones para el caso de $Ri=0.7$ a lo largo del eje Z ($0 < Z < 1$) en seis planos paralelos al plano central ($Z = 0.5$). Los resultados de estas mediciones se ilustran (para cuatro de ellos) en la figura 5.4.

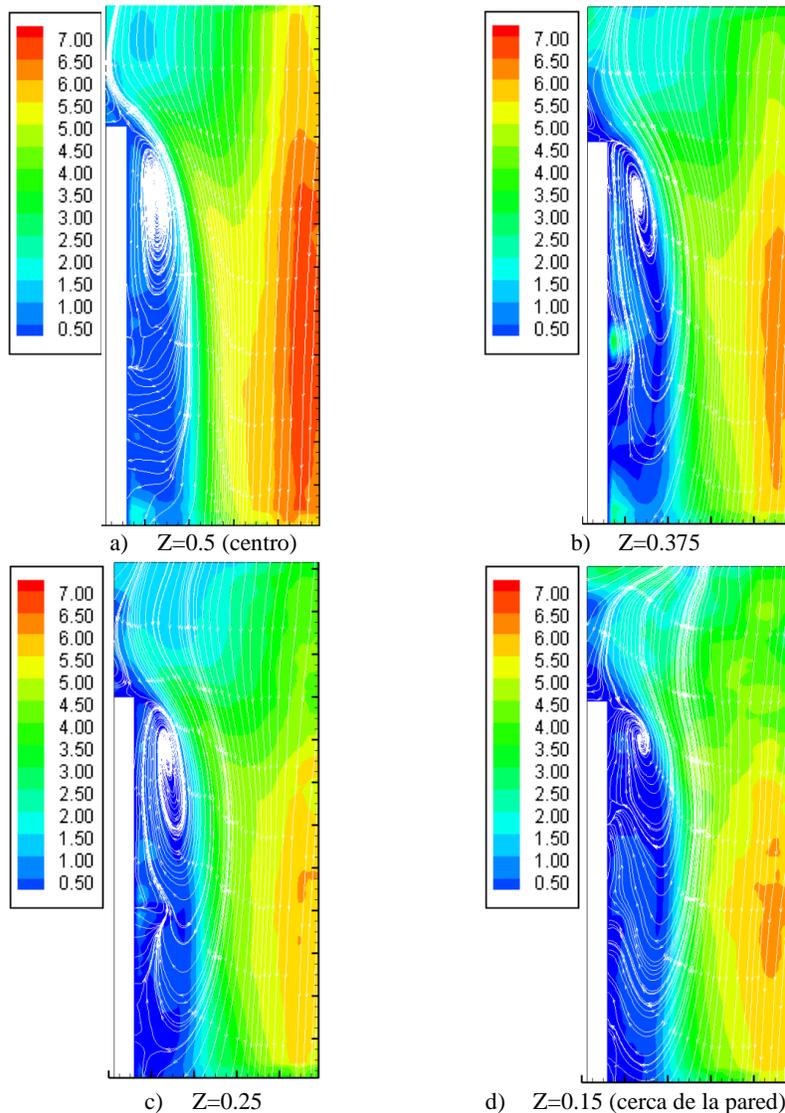


Fig. 5.4 Estudio de la bidimensionalidad del flujo para $Ri = 0.7$

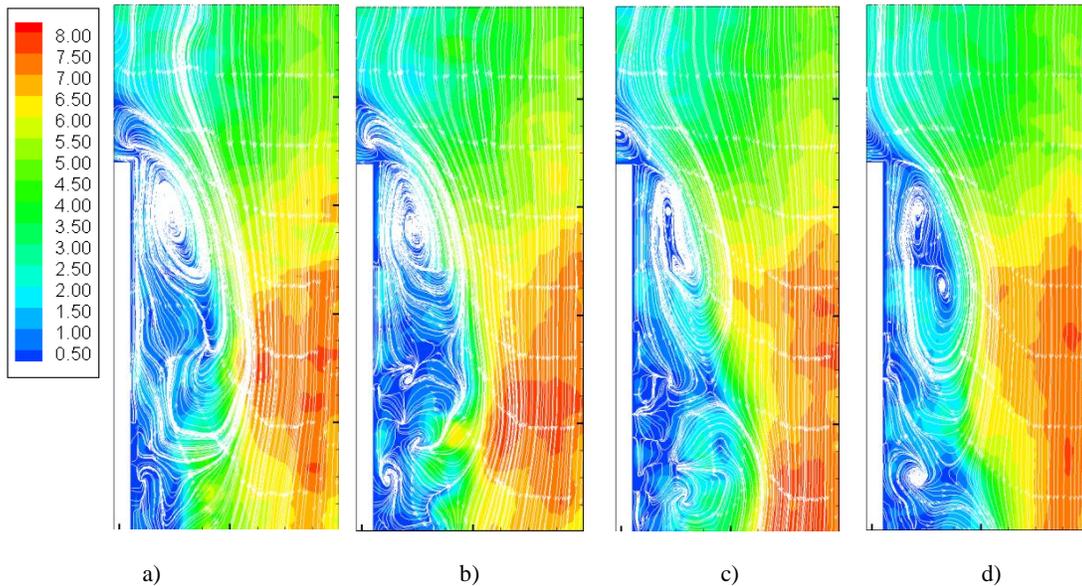
Se observa una estructura de flujo similar en todos los planos de medición con la misma posición del vórtice a lo largo del plano Z , se presenta una relativa disminución en el campo de velocidades conforme el plano de medición se aleja del centro y una disminución en el tamaño del vórtice asociada al efecto de pared. Resultados similares fueron observados para los planos $Z = 0.625, 0.75$ y 0.85 por lo que no fueron incluidos. De lo anterior se concluye que las consideraciones de flujo permanente y bidimensional para este caso de estudio, son válidas para bajos números de Richardson.

5.2.1.3 Flujo no permanente e inestable

Como se mostró en los casos anteriores al incrementarse el número de Richardson, elevando la temperatura en la pared con la misma velocidad de entrada, esto es, aumentando el número de Grashof, se desarrolla una zona de recirculación pegada a la placa que se intensifica por la competencia entre la fuerza de flotación ascendente y la corriente descendente fría, sin embargo, cuando el Richardson es alrededor de uno, el flujo deja de permanecer estable observándose las estructuras ya descritas pero oscilando aleatoriamente conforme avanza el tiempo, esto es, un flujo inestable no permanente.

Con el fin de describir este comportamiento se generaron imágenes del flujo a partir del análisis del promedio de sólo 5 pares de imágenes consecutivas, y aunque no se trata de un flujo instantáneo este análisis permite realizar un seguimiento del flujo a lo largo del tiempo que representa al flujo transitorio. Las imágenes muestran cómo la estructura del flujo presenta uno o más vórtices e ilustran la forma en que éstos interactúan. La zona de medición corresponde a $0 \leq X \leq 6.6$ y $-4.8 \leq Y \leq 11.2$.

La figura 5.5 muestra la evolución temporal del campo de velocidades (mm/s) para un número de Richardson $Ri_S = 1.8$ ($Re_S = 56.8$, $Gr_S = 5.8 \times 10^3$). En general los resultados muestran un incremento en el tamaño de la región de recirculación y en la magnitud de la velocidad en comparación con el caso permanente correspondiente a $Ri = 0.7$, alcanzando esta última valores de hasta 7.5 y 8 mm/s en algunas regiones. Se observa también un incremento del tamaño de la longitud de reinserción del flujo.



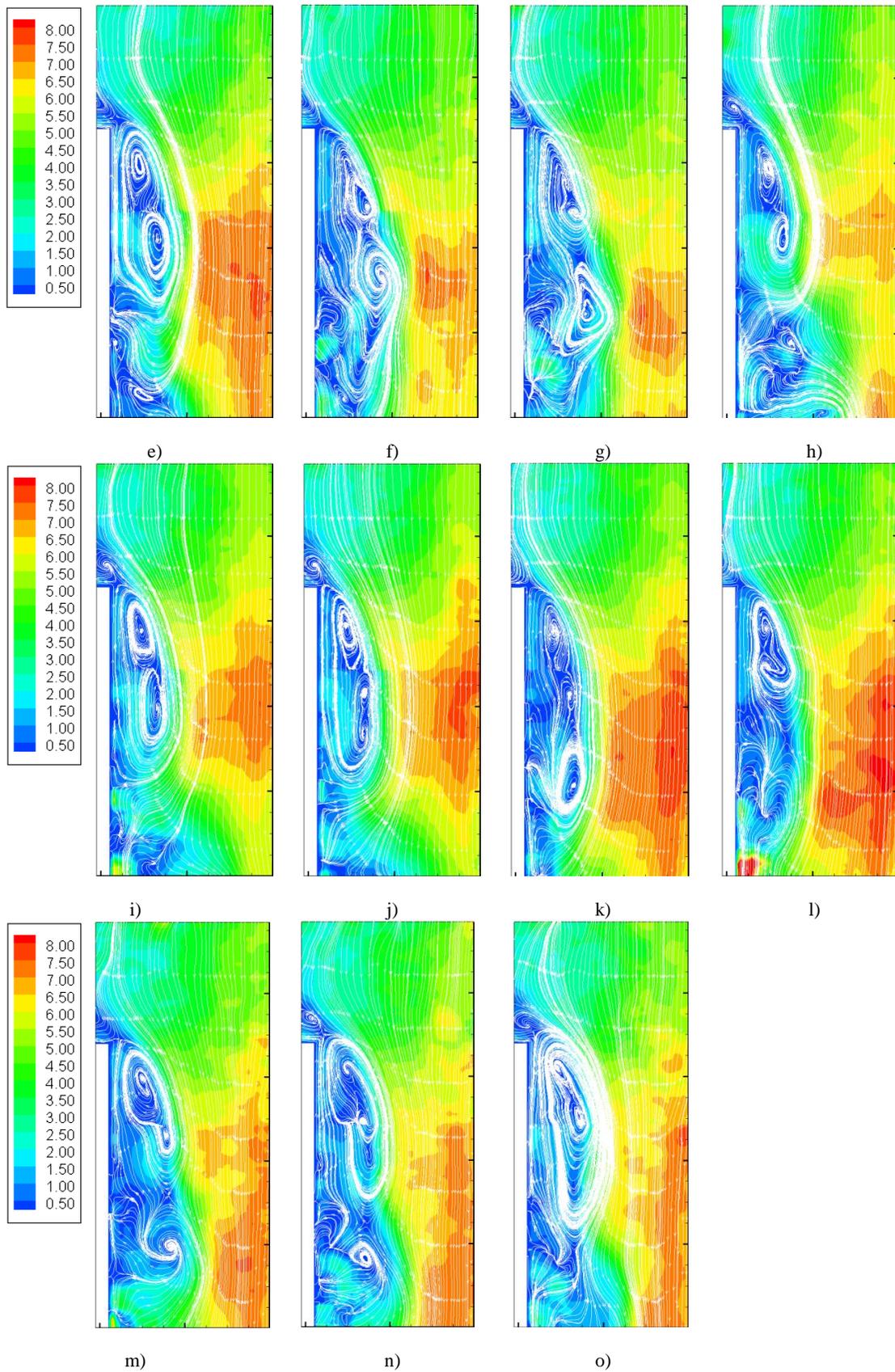


Fig. 5.5 Evolución temporal del campo de velocidades para $Ri = 1.8$

Los casos a) - b) ilustran el desarrollo de un vórtice de gran tamaño en la cercanía de la placa, que involucra también a la zona de baja velocidad aguas arriba del escalón, de este vórtice se forman tres vórtices de menor tamaño c) - d), uno aguas arriba del escalón y dos que interactúan dentro de una región menor de baja velocidad. Esta pareja de vórtices incrementa su tamaño y finalmente se separa, uno de ellos (el vórtice cercano al escalón en este caso), se divide formando dos vórtices pequeños, mientras que el otro se desplaza aguas abajo mientras se destruye e) – h).

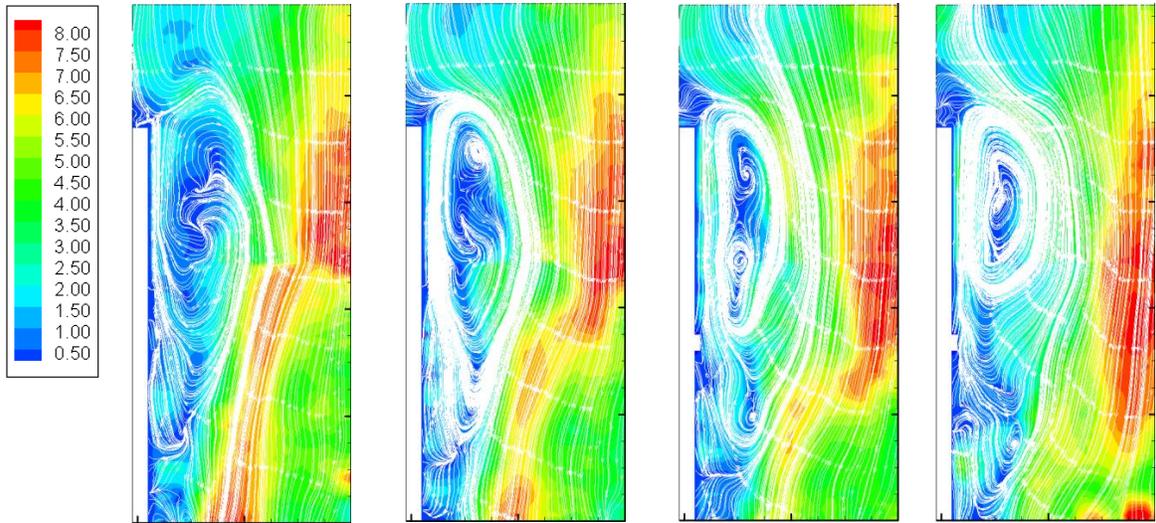
El mismo comportamiento de formación de par de vórtices, separación de éstos y desplazamiento de uno de ellos es observado posteriormente i) – o). Estos resultados parecen mostrar un comportamiento periódico del flujo, que mantiene la posición relativa de la zona de recirculación y su tamaño general además de una interacción continua de pares de vórtices, que conserva también el tamaño del vórtice formado aguas arriba del escalón.

La figura 5.6 muestra la evolución con el tiempo del campo de velocidades (mm/s) para un número de Richardson $Ri = 3.5$ ($Re_s = 56$, $Gr_s = 1.1 \times 10^4$). La secuencia de imágenes permite estudiar los cambios en la estructura del flujo, que involucra la formación y el apareamiento de vórtices que interactúan en la cercanía de la placa. La zona de medición corresponde a $0 \leq X \leq 6.6$ y $-4 \leq Y \leq 12$.

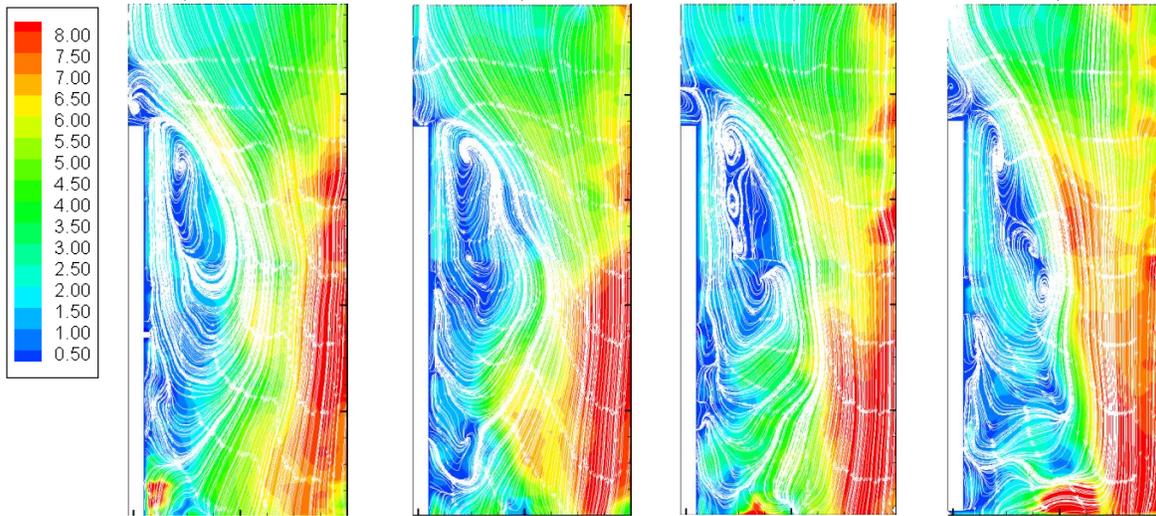
Los resultados muestran un incremento en el tamaño de la región de recirculación que ocasiona un incremento en la velocidad del flujo vertical descendente, además se observa el desplazamiento de la región de baja velocidad respecto de la placa caliente acercándose hacia el escalón, mientras que dentro de la región de recirculación se observa la interacción de tres vórtices. El efecto de la presencia de la zona de recirculación se amplía mostrando una región de baja velocidad aguas arriba del escalón, sin embargo, esta región en este caso queda fuera de la zona de medición, su efecto se estudia en la siguiente sección.

Un comportamiento general de la zona de recirculación en la vecindad de la placa presenta la generación de dos vórtices que interactúan hasta formar un solo vórtice, éste posteriormente se descompone en tres vórtices de menor tamaño, dos de ellos se aparean nuevamente quedando dos vórtices dentro de la región de recirculación, estos se unen y forman un vórtice de mayor tamaño o se separan y forman tres vórtices pequeños.

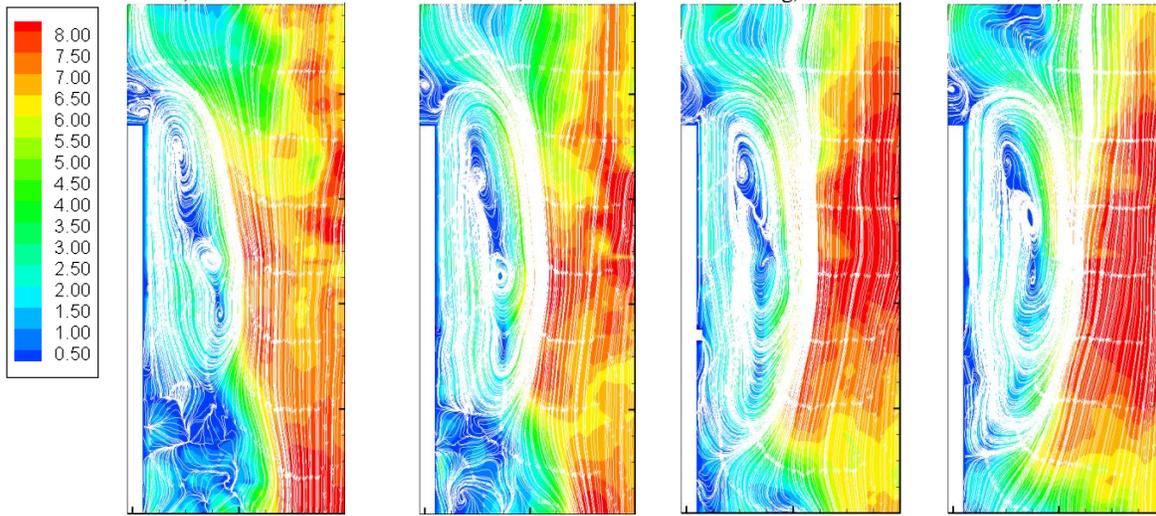
El resultado de un mayor incremento en la temperatura de pared trae como consecuencia una mayor desestabilización del flujo, que involucra la aparición de vórtices de diferentes escalas que interactúan entre sí con cambios espacio-temporales rápidos de velocidad, estas fluctuaciones ocasionan que el centro del vórtice se mueva aguas arriba y hacen que sea necesario estudiar al flujo en el canal aguas arriba para contar con un análisis más completo. Aunque por las características del flujo no era factible mover las cámaras después de finalizado el experimento, es claro que existía una evidente mayor actividad en esa zona. Los resultados derivados de estos números de Richardson ($Ri > 4$) no se presentan a continuación, sin embargo se incluyen algunas animaciones de las líneas de corriente obtenidas de estos experimentos en el CD anexo.



a) b) c) d)



e) f) g) h)



i) j) k) l)

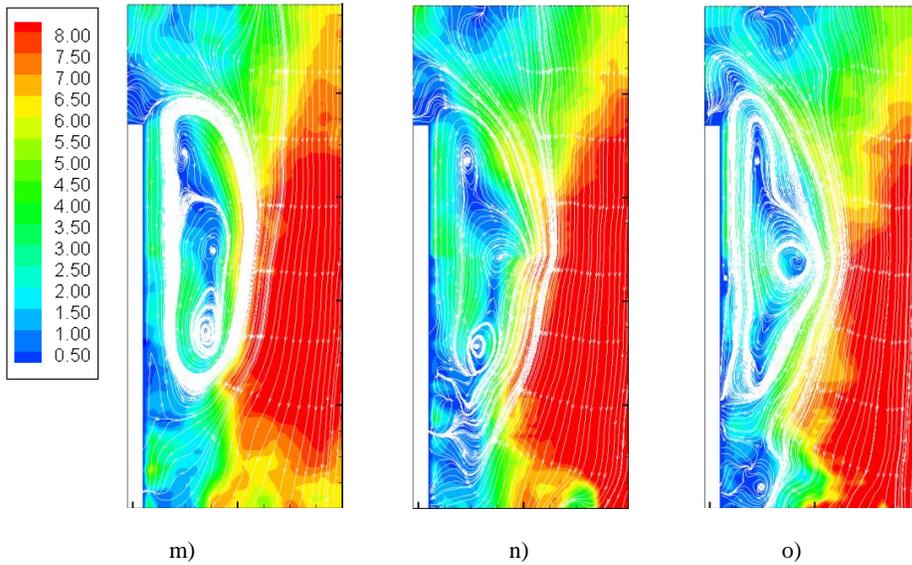
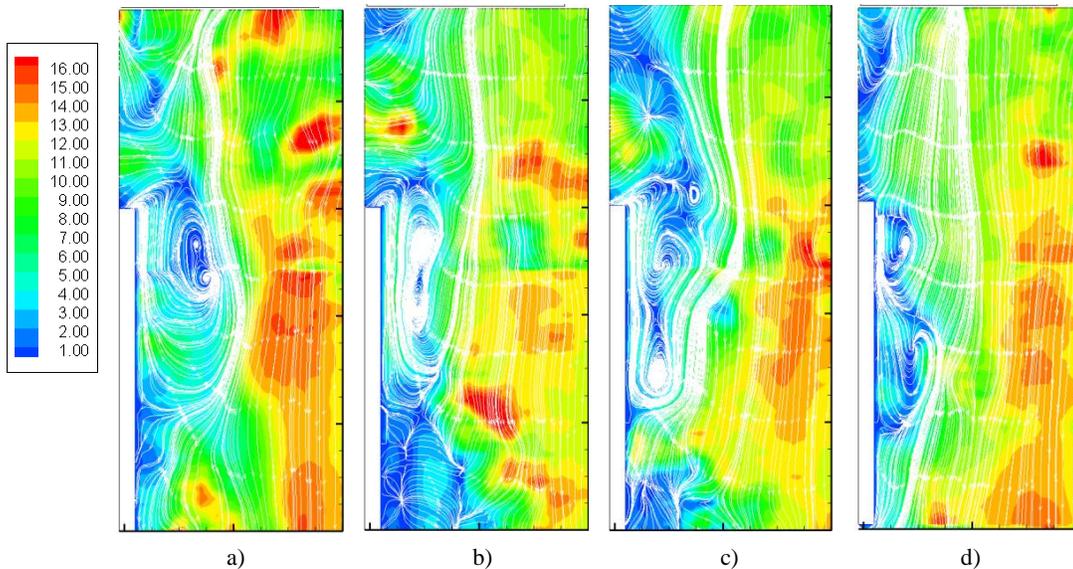


Fig. 5.6 Evolución temporal del campo de velocidades para $Ri = 3.5$

5.2.2. Influencia del número de Reynolds

Como se comentó en capítulos anteriores, el valor del número de Richardson depende de los parámetros Reynolds y Grashof, por lo que su valor puede ser afectado también por la variación del número de Reynolds para un valor de Grashof fijo. A fin de estudiar la influencia de la velocidad se realizaron mediciones incrementando la velocidad del flujo descendente a partir de un valor dado, para una temperatura de pared fija. La zona de medición en este caso fue cambiada hacia la región $-6.4 < Y < 9.6$ para estudiar el efecto de la fuerza de flotación aguas arriba del escalón que fue observado para altos números de Richardson en los experimentos anteriores.

En la figura 5.7 se presenta una secuencia de imágenes que muestra la magnitud de la velocidad en el canal en mm/s, para el caso $Ri = 2.33$ ($Re=119$, $Gr= 3.3 \times 10^4$). Se incluyen líneas de corriente que permiten estudiar la estructura del flujo.



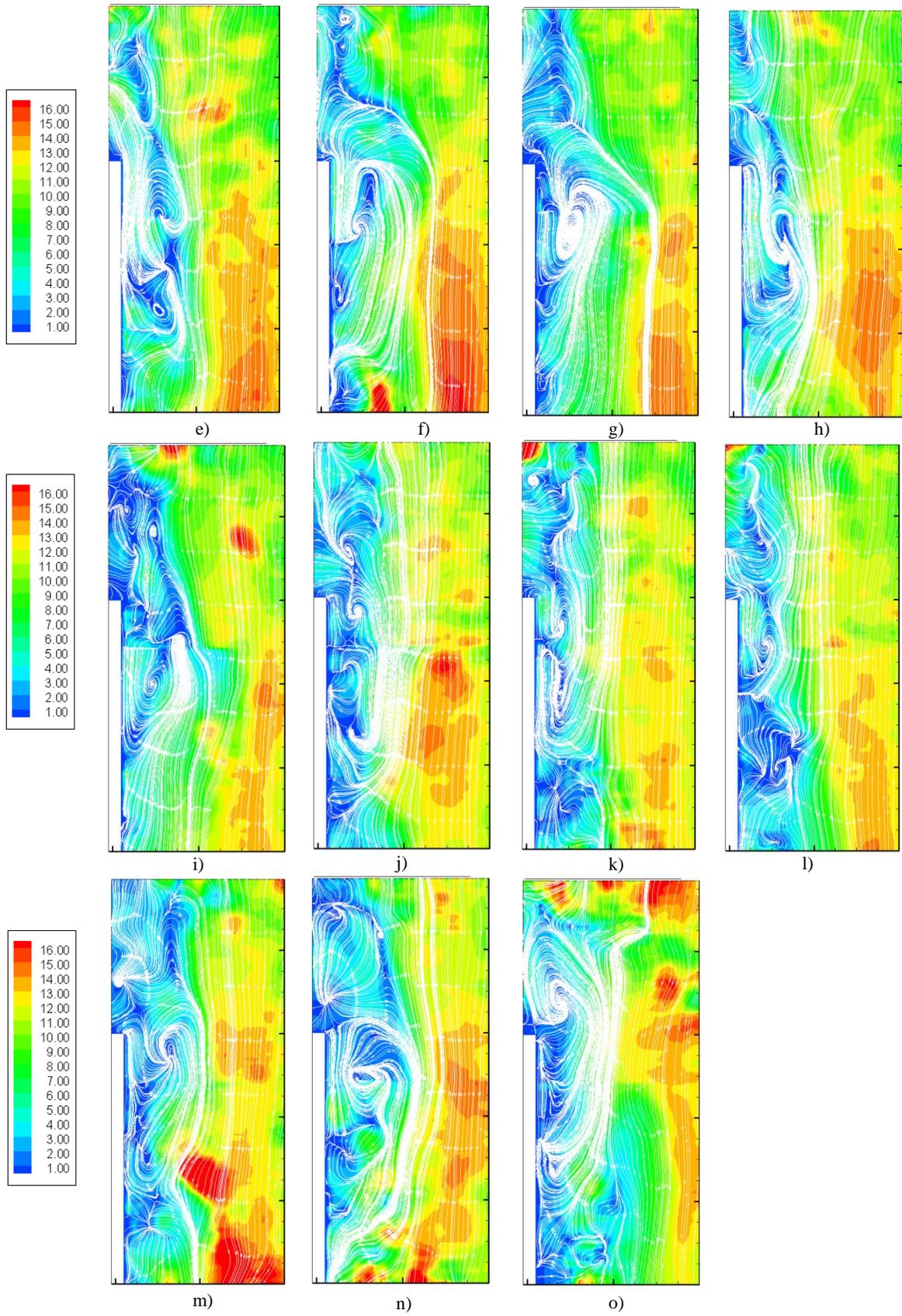


Fig. 5.7 Evolución temporal del campo de velocidades para $Ri = 2.8$

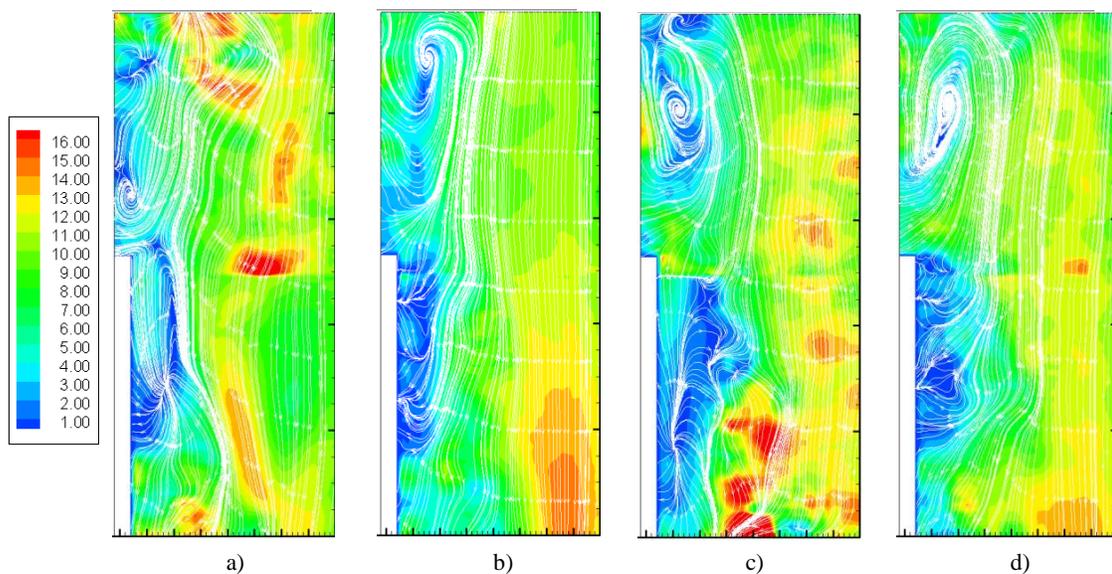
Es clara la presencia de una zona de baja velocidad en la cercanía de la placa, y al igual que en los casos anteriores, se observa la interacción continua de vórtices en ella, sin embargo, se verifica que la influencia de la fuerza de flotación se extiende significativamente aguas arriba del escalón, en esta zona se observa también la formación de estructuras vorticosas que interactúan oscilantemente con la región de baja velocidad asociada a la placa.

Aunque el número de Richardson fue menor que en el caso anterior, el flujo parece ser mayormente afectado por la fuerza de flotación y por la zona de baja velocidad aguas arriba del escalón, esto podría ser resultado de la “no recuperación” en la estabilidad del flujo, pues las mediciones realizadas se iniciaron para números de Richardson más elevados que fueron disminuyéndose con el incremento de la velocidad, o simplemente porque los efectos estaban fuera del campo visual de la zona de medición utilizada en ese caso.

En la figura 5.8 se presenta una secuencia de imágenes de la magnitud de la velocidad en el canal en mm/s, en las que se incluyen líneas de corriente que permiten estudiar la estructura del flujo para el caso $Ri = 3.1$ ($Re=103$, $Gr= 3.3 \times 10^4$) que es resultado de una velocidad de entrada al canal más baja que el caso anterior.

Los resultados muestran una mayor interacción de las zonas de baja velocidad aguas arriba y abajo del escalón que involucra la formación y el apareamiento de vórtices de mayor tamaño como se observa en los casos i) – n) .

El resultado de la disminución en la velocidad involucra una desestabilización en el flujo, llevándolo a un régimen de altas fluctuaciones de los vórtices formados que afectan al flujo principal observándose efectos de la fuerza de flotación en una zona más extensa, plantear un estudio por secciones para contar con un análisis completo es sin embargo no factible dadas las características fluctuantes del flujo con el tiempo. Se realizaron experimentos para valores de Richardson más elevados ($3.7 < Ri \leq 9.5$) y aunque los resultados no se discuten en la presente, se incluyen algunas animaciones de las líneas de corriente obtenidas de estos experimentos en el CD anexo.



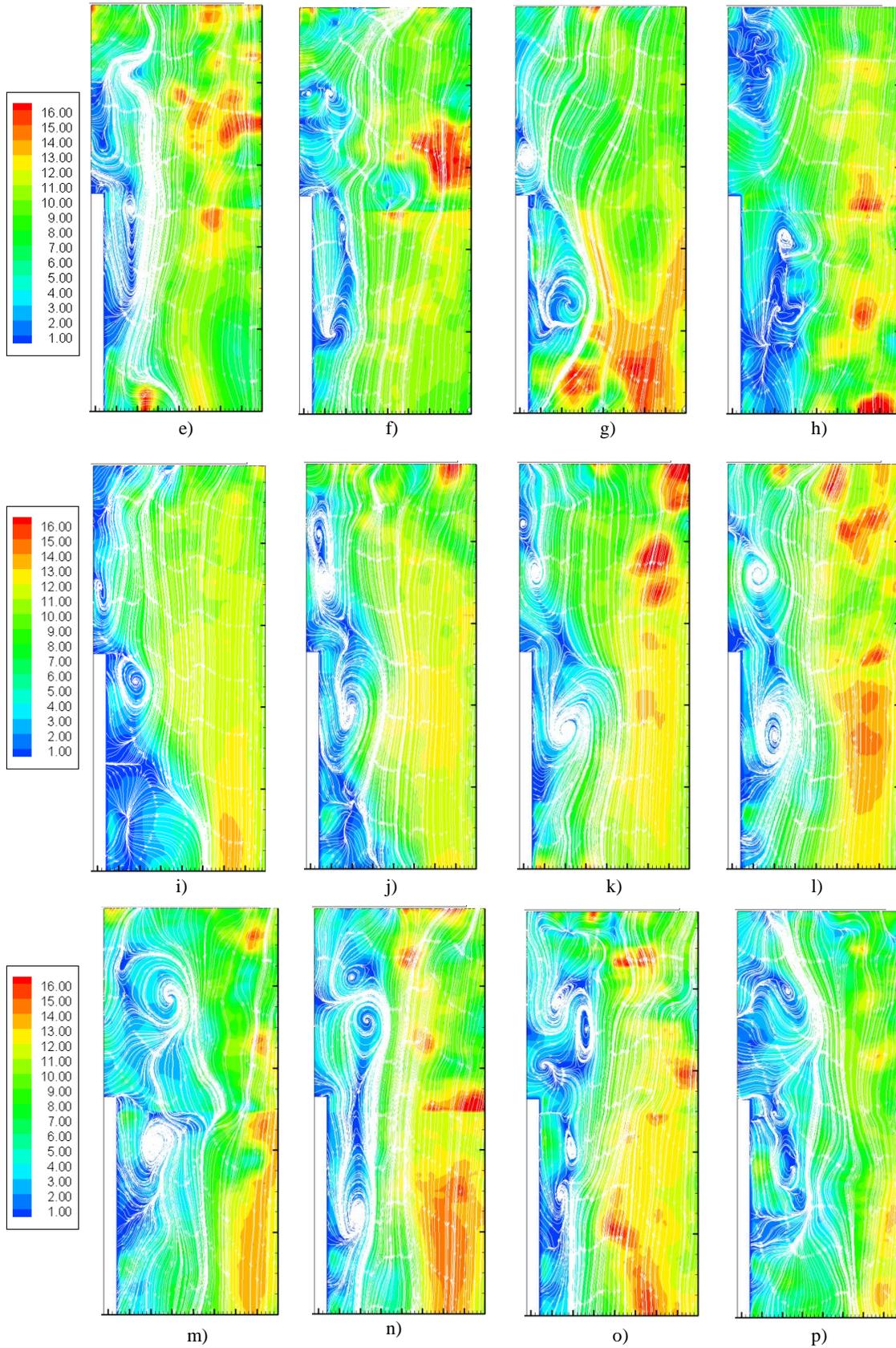


Fig. 5.8 Evolución temporal del campo de velocidades para $Ri = 3.1$

5.3. Análisis de resultados numéricos

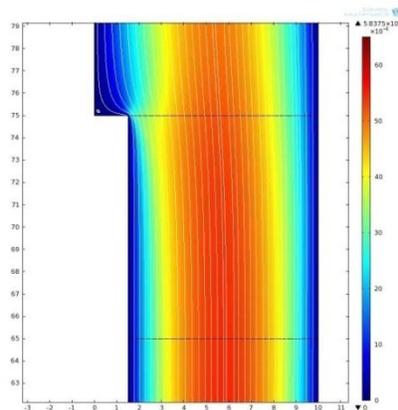
Tal como se mencionó en la sección 5.2, existe un valor del número de Richardson para el que la fuerza de flotación ocasiona cambios en el flujo para los que las consideraciones de flujo permanente no son válidas. El análisis numérico realizado para los casos de escalón hacia atrás (BFS) y escalón al frente (FFS), se limita al estudio del flujo laminar y permanente. Los resultados que se presentan consideran sólo números de Richardson para los que las consideraciones de flujo laminar son válidas.

Se reporta la influencia en la fuerza de flotación de la temperatura de pared, la velocidad de entrada, la inclinación del canal y del tamaño del escalón tanto en la estructura del flujo como en la transferencia de calor para ambas geometrías.

5.3.1 Forward Facing Step (FFS)

5.3.1.1 Influencia del número de Grashof

Este caso de estudio corresponde al abordado experimentalmente. La figura 5.9 muestra el efecto de la variación del número de Grashof en los campos de velocidad y de temperatura, las gráficas de superficie mostradas incluyen líneas de corriente que permiten estudiar la estructura del flujo. El caso isotérmico, figura 5.9a, permite identificar la presencia de una pequeña zona de recirculación formada aguas arriba del escalón como resultado del estancamiento del flujo debido a la contracción brusca. El incremento de temperatura de la pared desarrolla una segunda zona de recirculación aguas abajo del escalón, figura 5.9b, el tamaño de ambas zonas se incrementa con el número de Grashof, viéndose mayormente afectada por éste, la región aguas abajo. Esta zona de recirculación inicia su formación lejos del escalón (al final de la placa) e incrementa su tamaño acercándose al escalón, aumentando también la longitud de reinserción del flujo con el incremento de la temperatura.



a) Caso isotérmico, $Re_s = 55.8$

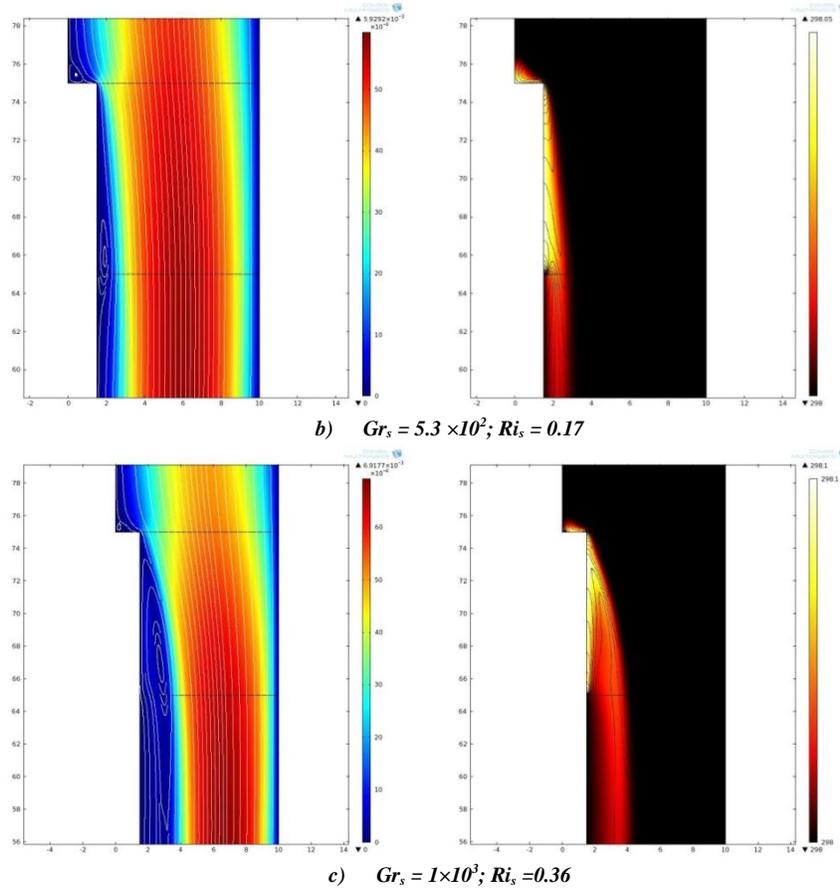
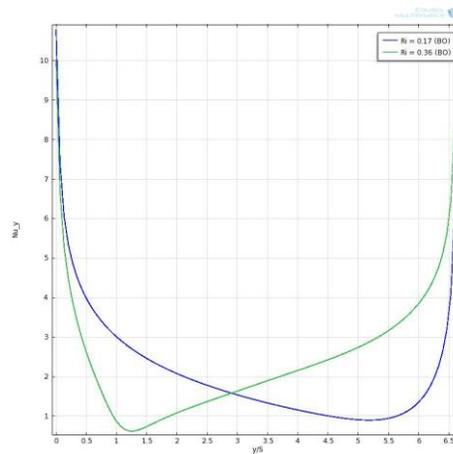


Figura 5.9. Influencia del número de Grashof

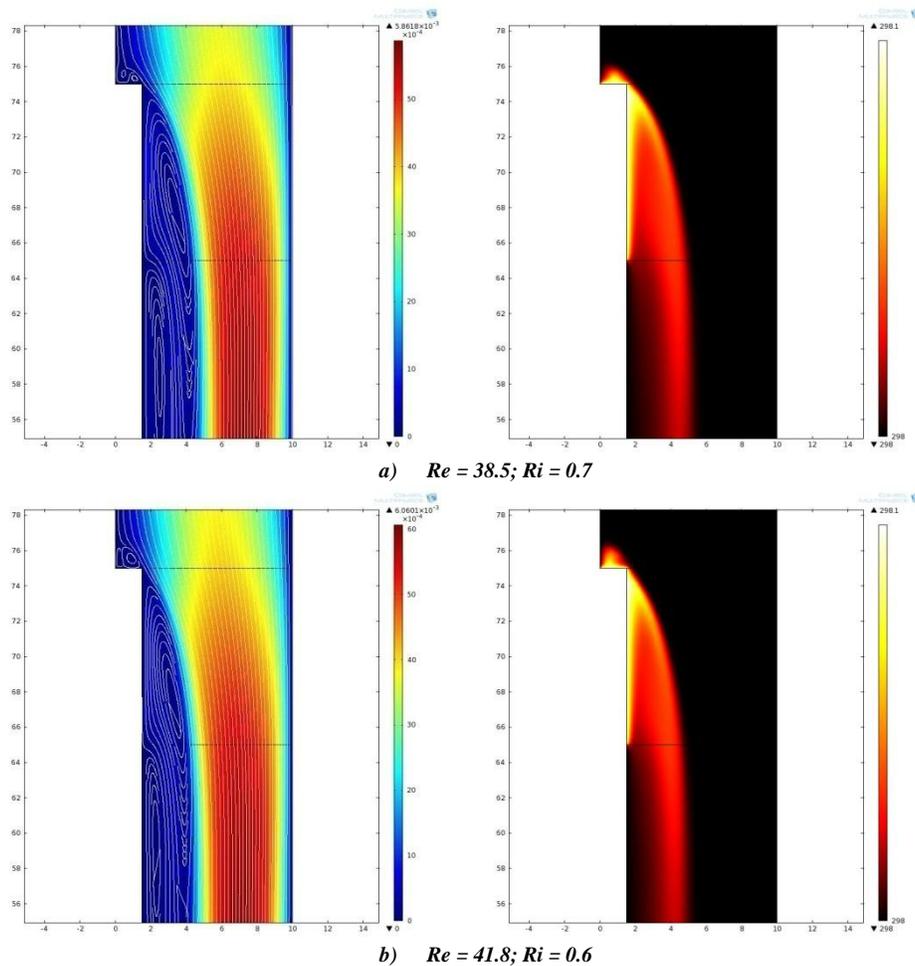
La gráfica 5.3 muestra la distribución del número de Nusselt local, como función de la posición Y , donde $Y=0$ corresponde al escalón y $Y=6.6$ el fin de la placa. El incremento del número de Grashof aumenta el número de Nusselt promedio, y el Nusselt local, parte de un valor máximo en el escalón disminuyendo hasta un valor mínimo y posteriormente se incrementa hasta un valor menor al inicial, el valor mínimo del Nusselt local se mueve aguas arriba conforme se incrementa el Ri lo que se atribuye a la influencia de la zona de recirculación que tiene una tendencia similar.

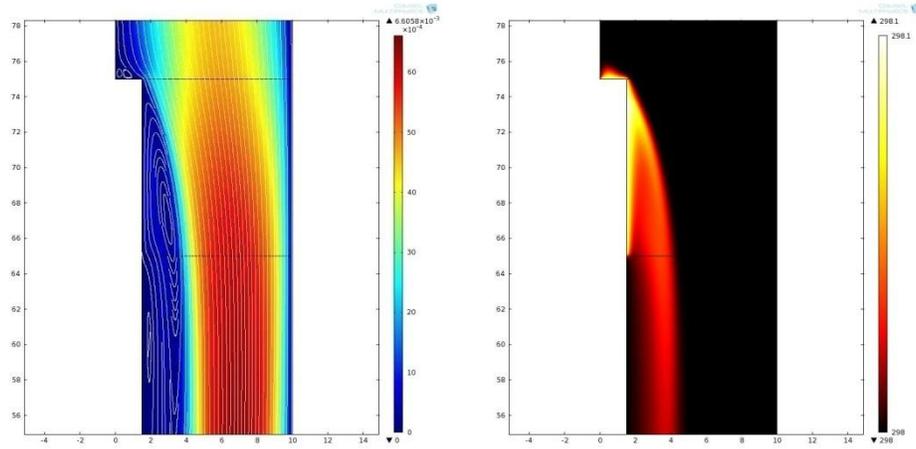


Graf. 5.3. Distribución del Nu_y en la placa

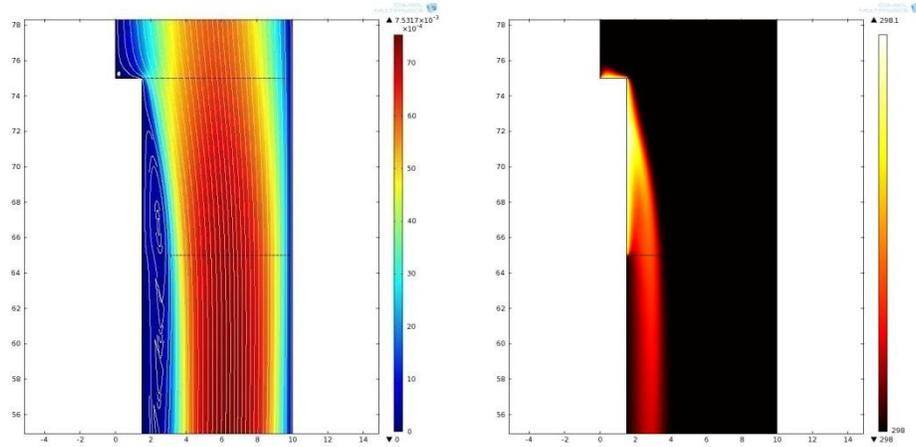
5.3.1.2. Influencia del número de Reynolds

La figura 5.10 muestra el efecto de la variación del número de Reynolds en los campos de velocidad y temperatura, se observa que cuando el valor del número de Reynolds es pequeño, la fuerza de flotación tiene mayor influencia en la estructura del flujo propiciando la aparición de una amplia zona de baja velocidad en la vecindad de la placa y el escalón, que desarrolla vórtices definidos dentro de ella; con el incremento en el número de Reynolds las fuerzas de inercia contrarrestan el efecto de la fuerza de flotación disminuyendo el tamaño de la zona de recirculación y aumentando la transferencia de calor global, tal como se ilustra en la gráfica 5.4. La gráfica 5.5 muestra la distribución del número de Nusselt local para diferentes valores de Reynolds, se observa que el incremento de este parámetro mueve la posición del Nusselt mínimo hacia una posición en la placa cada vez más alejada del escalón.

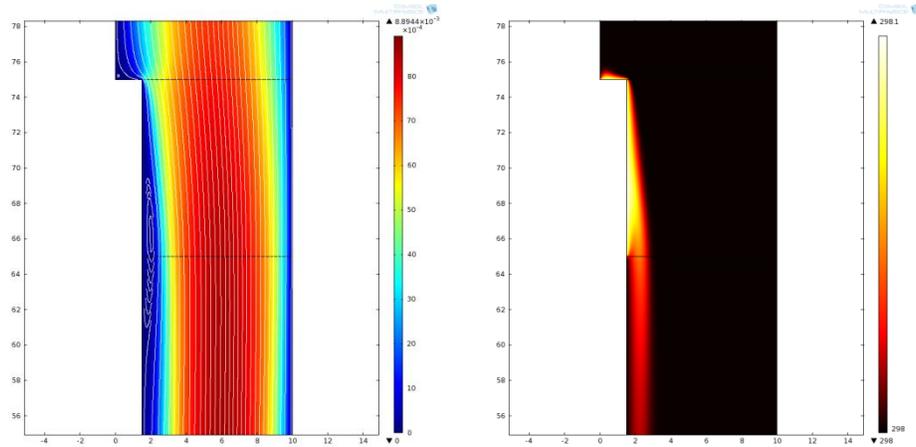




c) $Re = 50.2; Ri = 0.42$

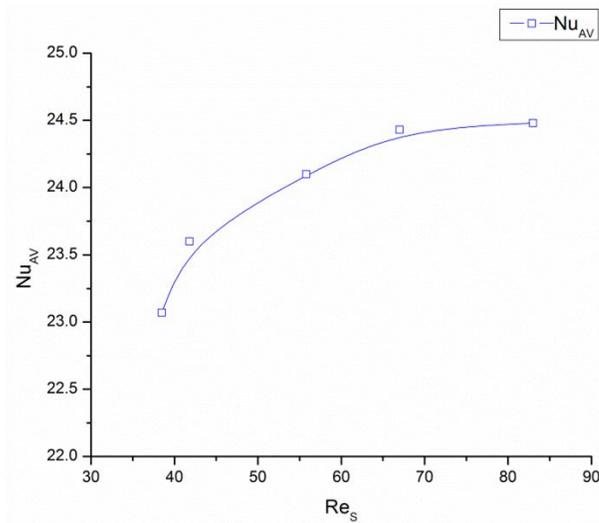


d) $Re = 67; Ri = 0.23$

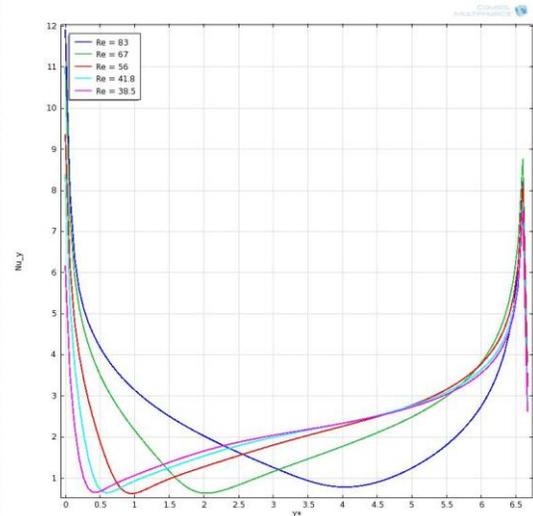


e) $Re = 83; Ri = 0.15$

Figura 5.10. Influencia del número de Reynolds



Graf. 5.4. Variación del Nu promedio en función del Re_s .



Graf. 5.5. Distribución del Nu_y para diferentes Re_s .

5.3.1.3. Validación numérica

A continuación se comparan los resultados numéricos y experimentales y se discuten las coincidencias cualitativas y cuantitativas observadas para los casos de $Ri = 0.36$ y $Ri = 0.7$.

En la figura 5.11 se comparan los campos de velocidad obtenidos experimental y numéricamente para el caso $Ri = 0.36$. Los resultados cualitativos de éstos muestran que el ancho de la zona de baja velocidad coincide en ambos estudios, mientras que la longitud de reinserción de flujo es menor para el caso experimental, esto puede estar asociado a la diferencia de temperatura entre la pared aguas abajo de la placa y la del medio ambiente, usualmente entre uno y dos grados por debajo de las obtenidas del flujo principal. En estas figuras se confirman los valores máximos de la velocidad en el campo de flujo.

La tabla 5.1 compara los resultados del análisis cuantitativo entre las dos metodologías. A pesar de que la posición relativa del vórtice no coincide entre ellos, el ancho de la zona de recirculación muestra una semejanza importante.

Tabla 5.1 Comparación de resultados experimentales y numéricos para $Ri=0.36$				
Posición del vórtice principal	PIV		COMSOL	
	X	Y	X	Y
	1.66	1.81	1.84	5.4
Ancho de la zona de recirculación [cm]	2.25		2.20	

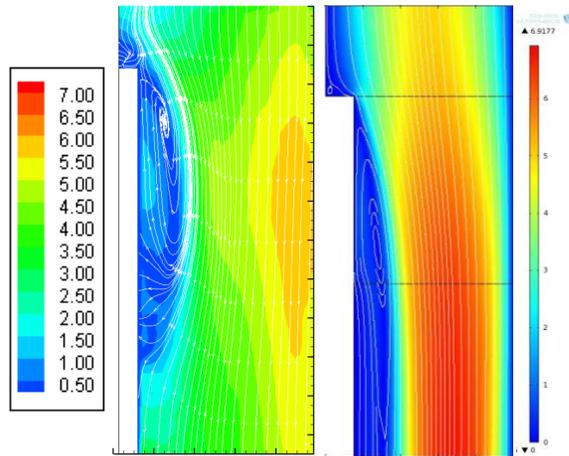
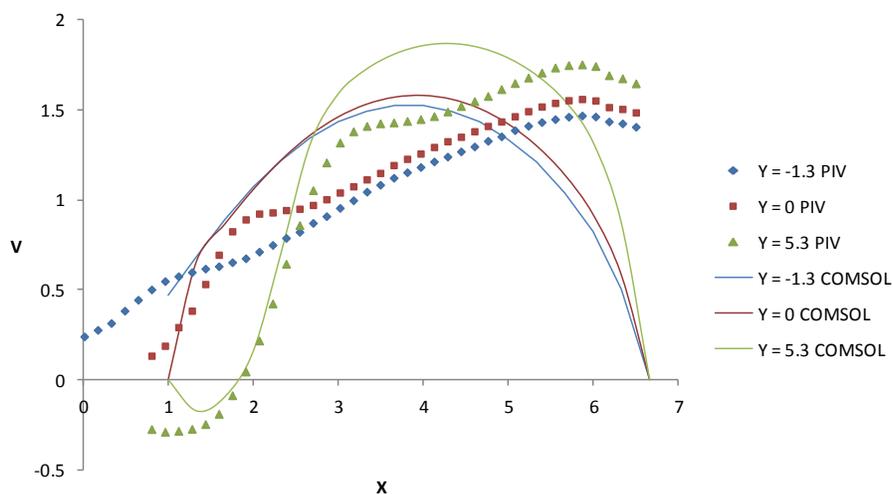


Figura 5.11. Comparación del campo de velocidad para $Ri = 0.36$

La gráfica 5.6 compara la componente de velocidad V en función de la coordenada transversal X , obtenidos a diferentes posiciones de Y para ambas metodologías.

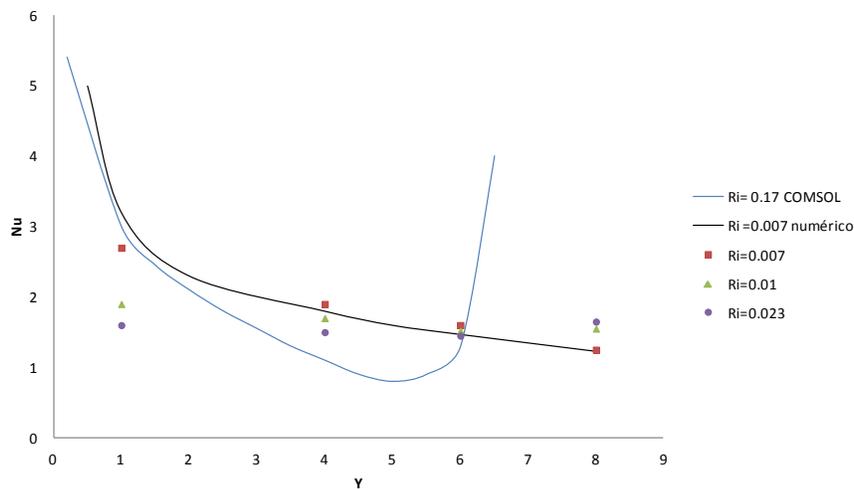
La velocidad máxima alcanzada para diferentes distancias del borde del escalón coincide en ambos casos, sin embargo, para el caso experimental el perfil es más asimétrico y la región de alta velocidad se ubica más cercana a la pared opuesta; en los perfiles experimentales no se muestra la condición de no deslizamiento porque nunca se mide la velocidad justo en la pared pero es clara una reducción más abrupta del perfil. Los perfiles son más similares en la zona de recirculación como puede notarse para el caso de $Y=0$ (justo en el borde) o mejor aún en el caso $Y = 5.3$ donde hay coincidencia en la región $1 < X < 2.5$.

Independientemente de las irregularidades presentes en los perfiles medidos, es claro que el efecto del escalón en el campo es más intenso en cuanto al desvío provocado, aunque también las diferencias pueden deberse entre otras cosas a las características físicas no controladas del modelo utilizado, como posibles irregularidades en las paredes o falta de paralelismo en algunas zonas aguas arriba del escalón, aunque la apariencia general del modelo no lo indique.



Graf. 5.6. Comparación del perfil de velocidad V para $Ri = 0.36$

La gráfica 5.7 presenta una comparación del comportamiento del Nusselt local en la placa para el caso $Ri_s = 0.17$ con los resultados obtenidos del caso más similar al aquí estudiado, el de Abu-Mulaweh et al. (1996). Se observa que la tendencia decreciente que muestran los valores del Nusselt de los datos experimentales a lo largo de la placa concuerda inicialmente con la predicción numérica de este caso y de forma más clara, con la solución numérica ahí presentada, la diferencia principal entre ellos se debe a que en este trabajo de investigación el calentamiento es finito, lo que ocasiona el incremento abrupto del Nu_y al final de la placa debido a la condición de frontera, mientras que en el caso estudiado por Abu-Mulaweh, con calentamiento a todo lo largo del canal, se tiende hacia un valor constante que se hace más evidente cuando se observan los resultados por ellos obtenidos para valores de Y mucho más elevados. Esto parece indicar que la zona de influencia o recirculación se mantendría a lo largo de la placa lo que no es el caso en este estudio.



Graf. 5.7. Comparación del Nu local para $Ri = 0.17$ con Abu-Mulaweh et al (1996)

La figura 5.12 compara los campos de velocidad obtenidos experimental y numéricamente para $Ri = 0.7$, los resultados cualitativos muestran coincidencias en el tamaño de la zona de recirculación y en el efecto de la fuerza de flotación aguas debajo de la placa que extiende la longitud de recirculación para este caso de estudio. El tamaño de la zona de recirculación aguas arriba del escalón coincide en ambos casos. Nuevamente se observa que la zona de alta velocidad para el caso experimental se ubica más alejada del escalón.

Se observa que los resultados numéricos muestran la formación de un segundo vórtice debajo del vórtice principal lo cual se asocia al salto térmico que involucra la condición de frontera aguas debajo de la placa y que no ocurre en el caso experimental probablemente debido a que las condiciones ambientales afectan la condición de temperatura en la pared.

La tabla 5.2 compara los resultados del análisis cuantitativo entre las dos metodologías. Se observa nuevamente que el ancho de la zona de recirculación coincide para ambos casos.

Tabla 5.2 Comparación de resultados experimentales y numéricos para $Ri=0.7$				
Posición del vórtice principal	PIV		COMSOL	
	X	Y	X	Y
	1.64	2.08	2.36	5.07
Ancho de la zona de recirculación [cm]	3.0		3.1	

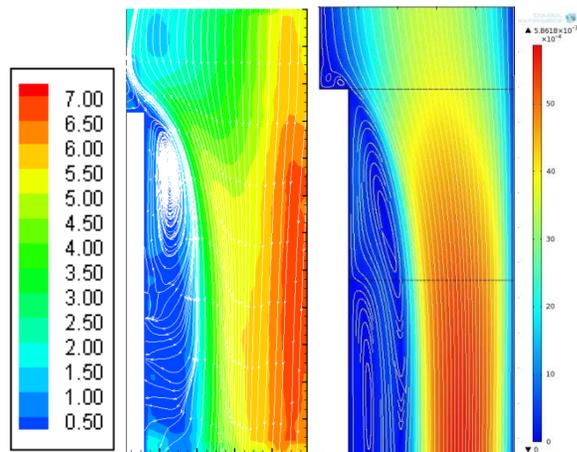
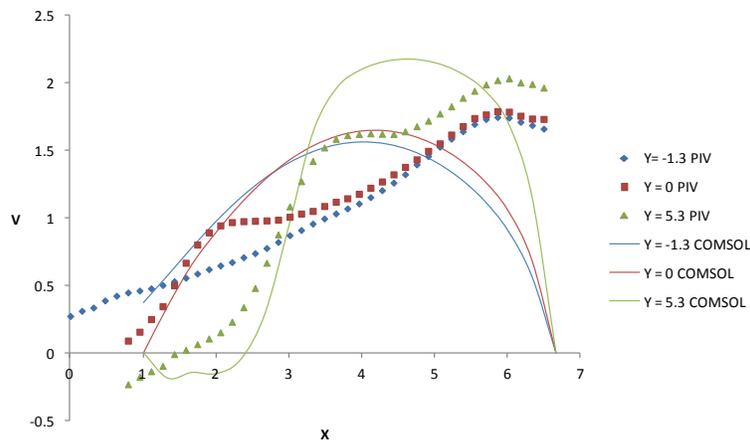


Figura 5.12. Comparación del campo de velocidad para $Ri = 0.7$

La gráfica 5.7 compara los perfiles de velocidad V como función de la coordenada transversal X , obtenidos a diferentes posiciones de Y para ambas metodologías. Se observa la misma tendencia en los perfiles de velocidad, es decir, una coincidencia en las velocidades mínimas y máximas alcanzadas, sin embargo la región de máxima velocidad en el caso experimental se ubica muy cercana a la pared opuesta, es decir, un flujo mucho más pegado a esa pared provocado por el escalón.

Se determinó el valor experimental y numérico del caudal medio en $Y = 5.3$, y aunque los resultados ($Q_{PIV}=3.7$ l/min, $Q_{COMSOL}=4.2$ l/min) no muestran una desviación significativa entre ellos ni con el valor de caudal deseado ($Q = 4$ l/min), las diferencias están asociadas a la forma del perfil de velocidad, particularmente al mayor efecto de desviación del flujo por el escalón, efecto que no se predice en las simulaciones.



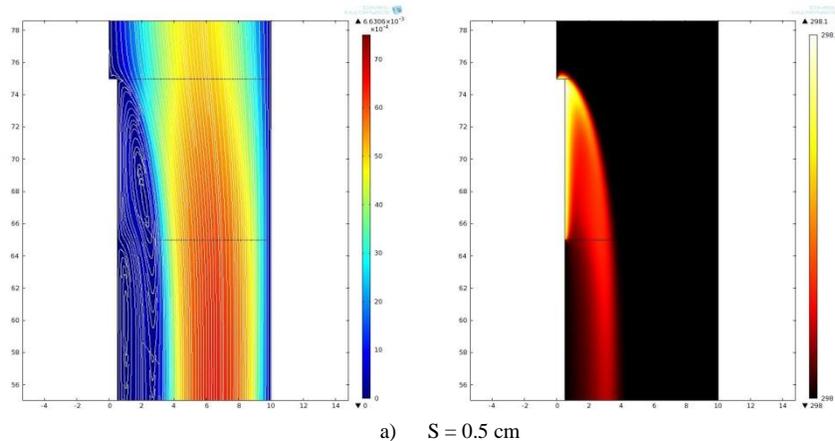
Graf. 5.8. Comparación de perfil de velocidad para $Ri = 0.7$

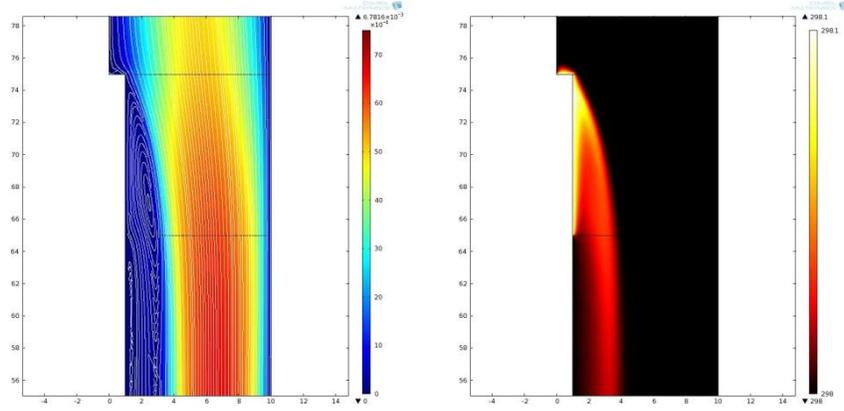
De la comparación de resultados se concluye que el código numérico permite obtener el comportamiento general del flujo sin alejarse considerablemente del comportamiento real del fenómeno físico y que las discrepancias entre ellos se deben a las condiciones impuestas al dominio computacional y a los parámetros no controlados en el experimento. Al incrementarse el efecto de la flotación el flujo se vuelve inestable y altamente dependiente del tiempo por lo que el código numérico es incapaz de obtener algún resultado del campo de flujo, esto ocurre para valores de $Ri > 1.0$ donde no se logró la convergencia.

5.3.1.4. Influencia del tamaño del escalón

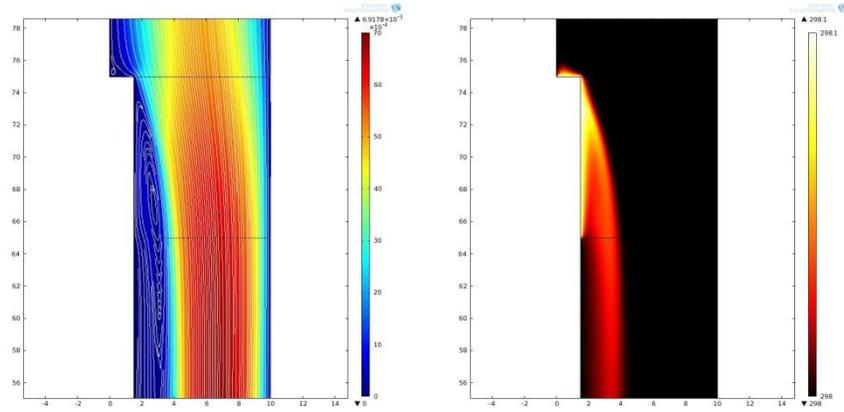
Los resultados presentados en la figura 5.13, muestran la influencia de la variación del tamaño del escalón en los campos de velocidad y temperatura para $Ri=0.36$. Como es sabido la reducción del área en un ducto involucra un incremento de la velocidad, entre mayor sea el tamaño del escalón, mayor será el incremento de la velocidad en el flujo principal, lo que permite una menor influencia de la fuerza de flotación en el fluido.

Se observa que la pluma térmica se aleja de la pared fría adyacente a la placa y propicia el desarrollo de dos vórtices bien definidos aguas abajo del escalón, formados uno debajo del otro. Al incrementarse el tamaño del escalón estos vórtices interactúan formando un solo vórtice de menor tamaño debido al incremento de la velocidad del flujo principal que obliga a la zona de recirculación a mantenerse cerca de la placa caliente. De la misma manera, al incrementarse el tamaño del escalón la región aguas arriba de éste, cobra importancia incrementando su tamaño en la que se desarrollan dos pequeños vórtices dentro de ella.

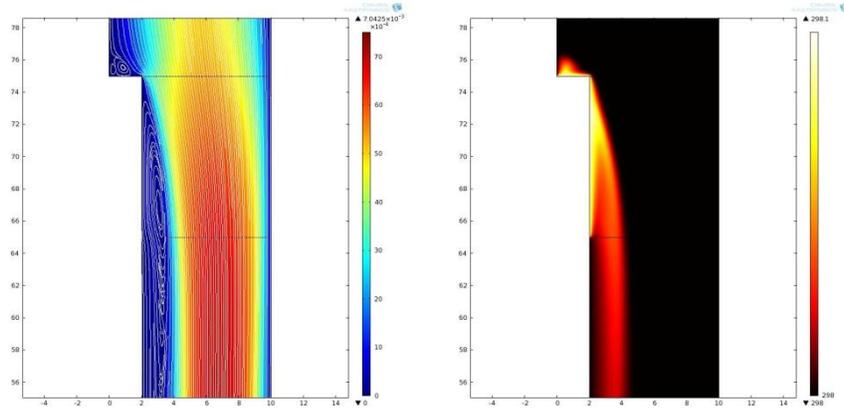




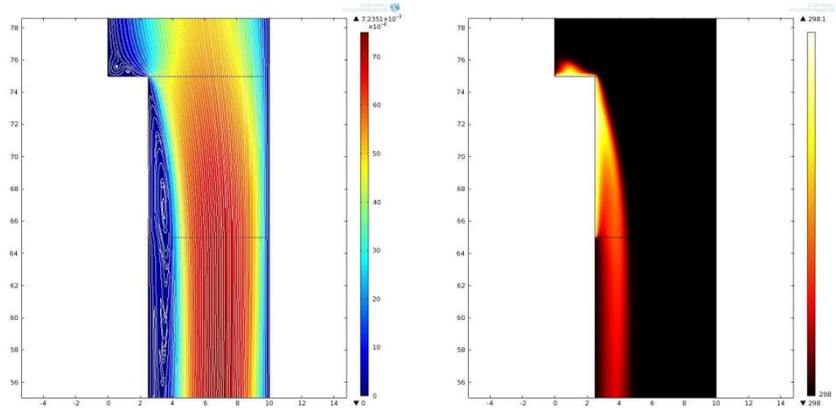
b) $S = 1.0$ cm



c) $S = 1.5$ cm



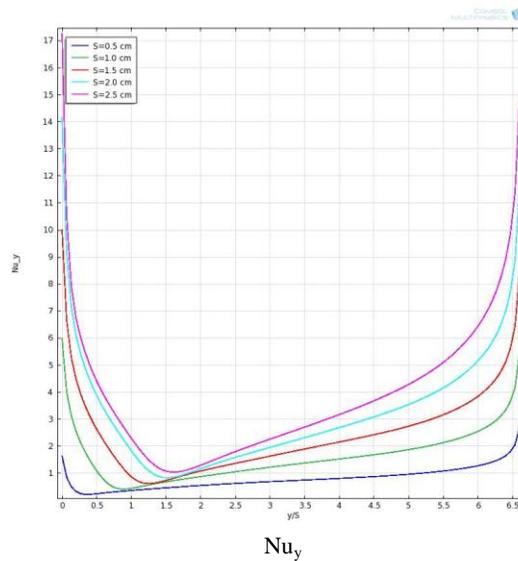
d) $S = 2.0$ cm



e) $S = 2.5 \text{ cm}$

Figura 5.13. Influencia del tamaño del escalón

La gráfica 5.8 permite observar un comportamiento similar del número de Nusselt a lo largo de la placa para diferentes tamaños de escalón, éste parte de un valor máximo cerca del escalón y disminuye rápidamente hasta un valor mínimo, incrementándose monótonamente hasta el extremo aguas abajo de la placa. El incremento del tamaño del escalón aleja la posición del valor mínimo del número de Nusselt aguas abajo del borde del escalón.



Graf. 5.9. Distribución del Nu local para diferentes S

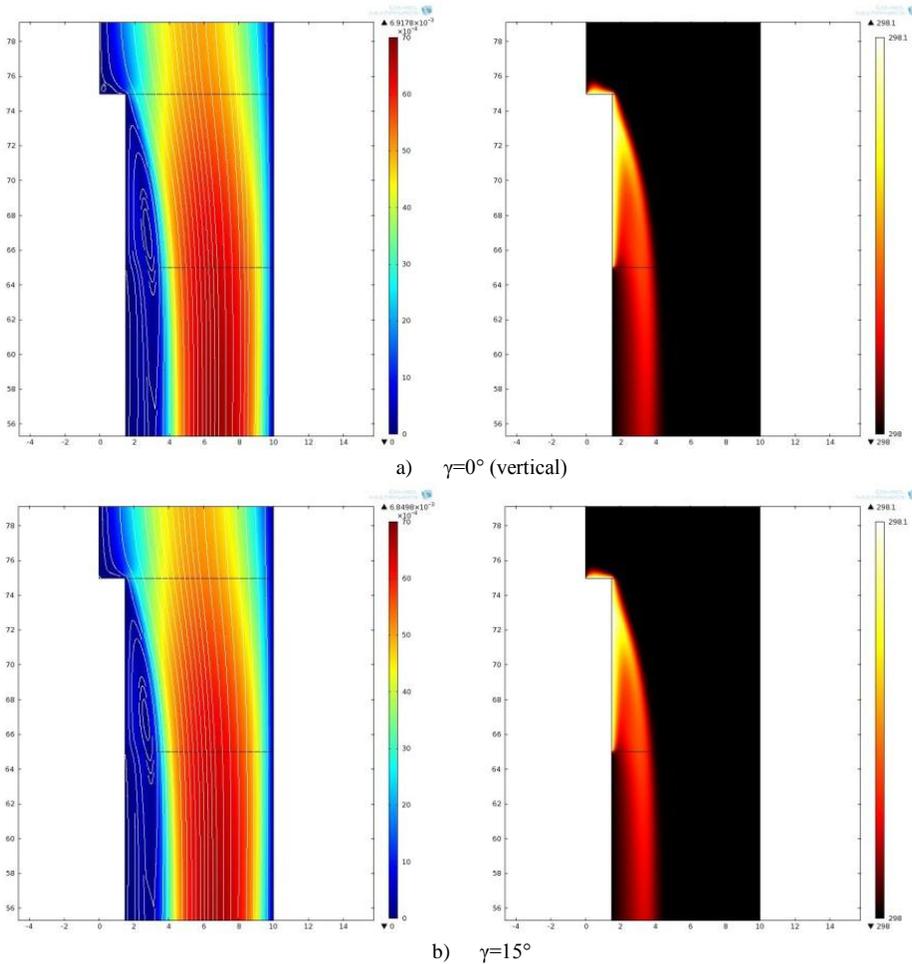
5.3.1.5. Influencia de la inclinación del canal

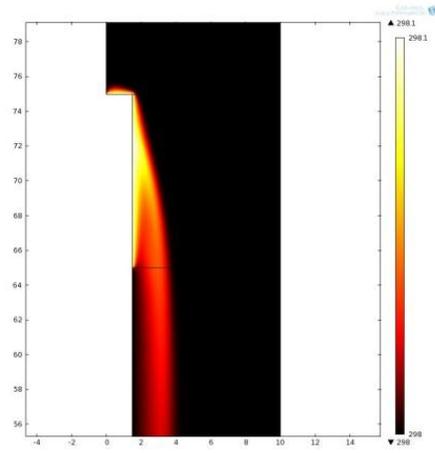
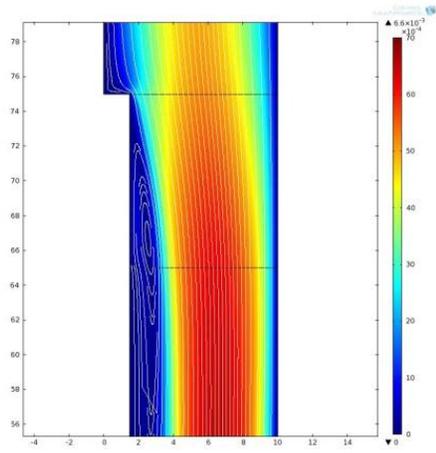
Los resultados presentados en la figura 5.14, muestran la influencia de la variación del ángulo de inclinación del canal en los campos de velocidad y temperatura para $Ri=0.36$.

La componente de la fuerza de flotación que se opone al flujo principal disminuye con el incremento del ángulo de inclinación del canal, lo que opone cada vez menor resistencia al flujo y ocasiona una disminución progresiva del tamaño de la zona de recirculación partiendo de un tamaño máximo en la posición vertical $\gamma=0^\circ$, hasta desvanecerla por

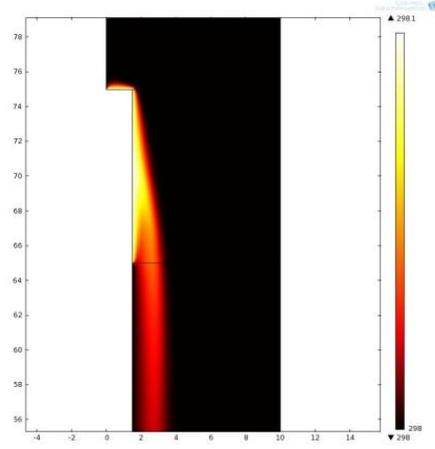
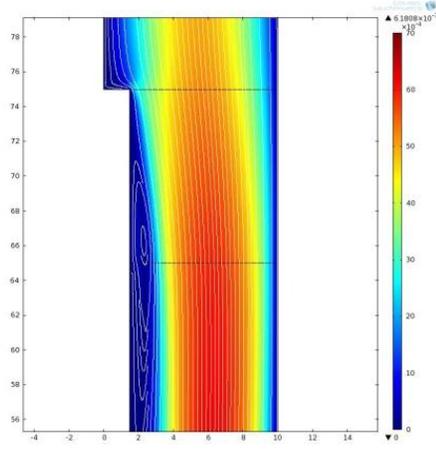
completo a partir de $\gamma=75^\circ$. La región de recirculación disminuye y se aleja del escalón, con el incremento del ángulo de inclinación.

La disminución de la componente de la fuerza de flotación que se opone al flujo mueve el valor mínimo del número de Nusselt local aguas abajo del escalón. Conforme se incrementa el ángulo se tienen valores del Nu_y mayores hacia el borde del escalón y menores hacia el final de la placa, este cambio a partir del valor mínimo. Como consecuencia la transferencia de calor global disminuye con el ángulo de inclinación del canal para $0 < \gamma < 60^\circ$ y aumenta para $\gamma > 60^\circ$, gráfica 5.10.

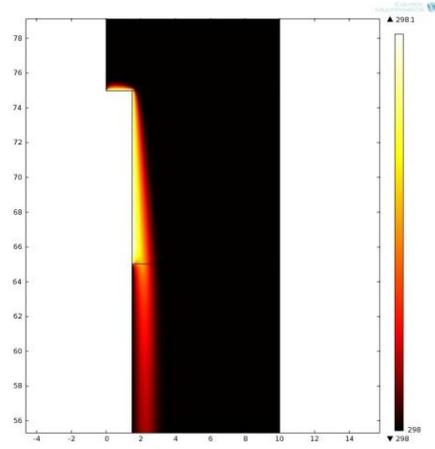
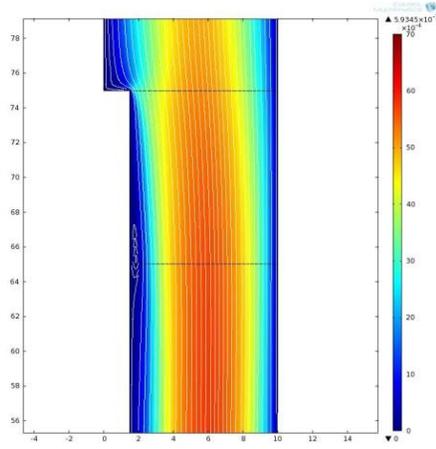




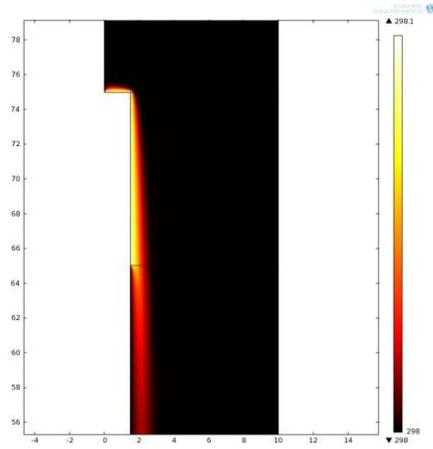
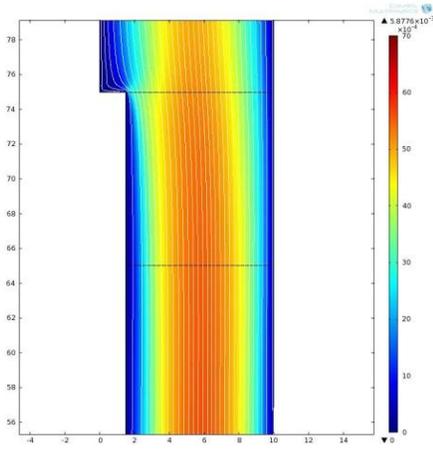
c) $\gamma=30^\circ$



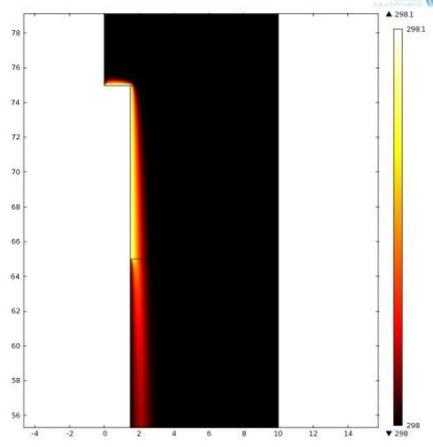
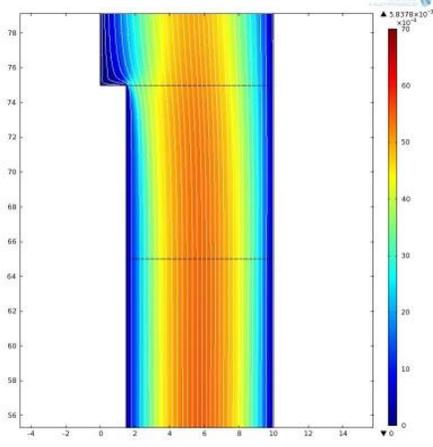
d) $\gamma=45^\circ$



e) $\gamma=60^\circ$

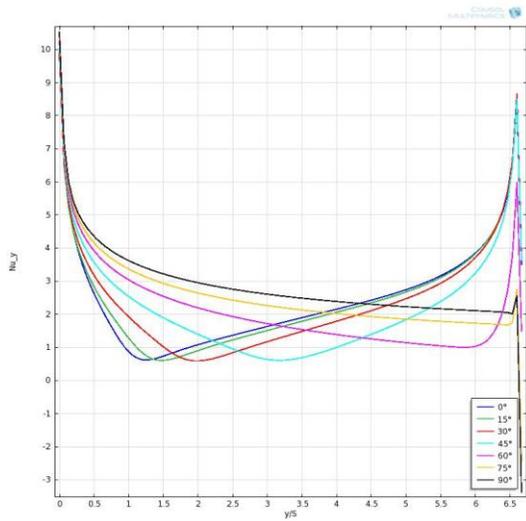


f) $\gamma=75^\circ$

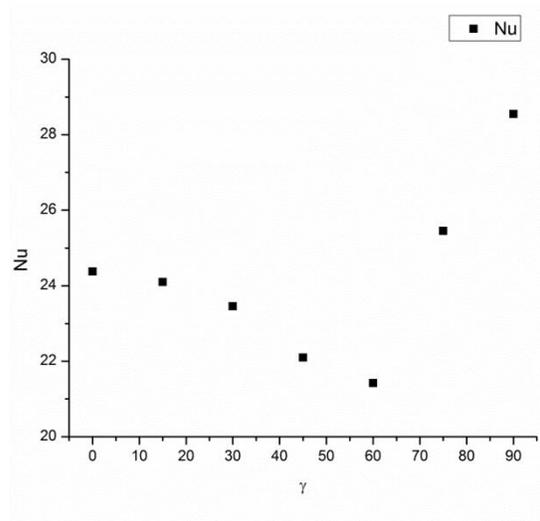


g) $\gamma=90^\circ$ (horizontal)

Figura 5.14. Influencia de la inclinación del canal



Graf. 5.10. Distribución del Nu_y para diferentes ángulos de inclinación del canal



Graf. 5.11. Variación del Nu promedio en función de γ

5.3.2. Backward Facing Step (BFS)

5.3.2.1. Influencia del número de Grashof.

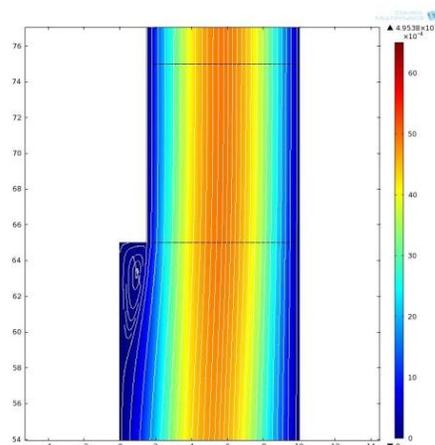
Se estudia en la geometría de escalón hacia atrás (BFS) el efecto de la variación del número de Grashof, bajo las mismas condiciones impuestas en el caso de escalón al frente.

Partiendo del caso isotérmico se observa en la figura 5.15 la presencia de una zona de recirculación aguas abajo del escalón, formada por la expansión brusca que sufre el canal.

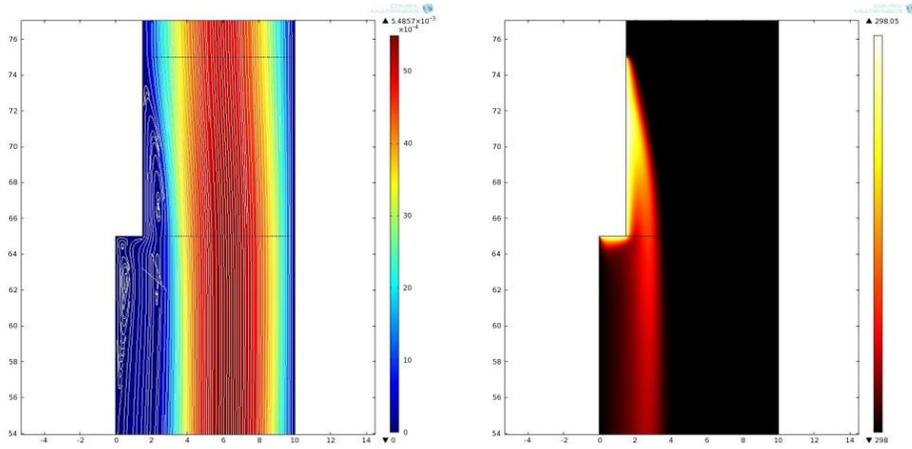
El incremento en la temperatura de pared, permite el desarrollo una segunda zona de recirculación, formada aguas arriba del escalón debido al incremento en la fuerza de flotación que se opone al flujo. Esta segunda zona inicialmente forma dentro de ella dos vórtices bien definidos que al incrementarse la temperatura interactúan y producen un sólo vórtice de mayor tamaño.

La zona de recirculación aguas abajo incrementa su tamaño debido al aislamiento que sufre del flujo principal vertical ocasionado por la formación y crecimiento de la segunda zona, en esta primera zona se observa también el desarrollo inicial de dos vórtices que con el incremento de la temperatura interactúan y forman un vórtice de mayor tamaño. El tamaño de ambas zonas se incrementa con el aumento del número de Grashof pero se conserva la presencia de una región sobre la otra. Un mayor incremento de la temperatura propicia la interacción de ambas regiones lo que inestabiliza el flujo, en estas condiciones la simulación numérica falla.

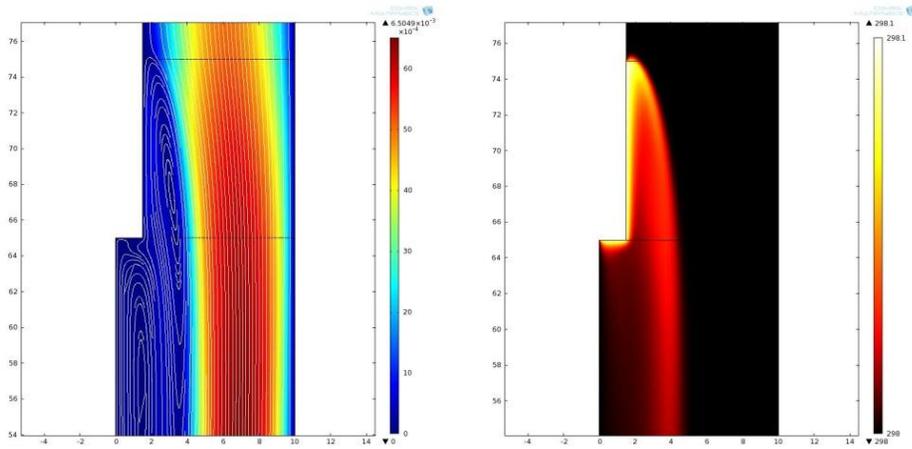
La gráfica 5.11 muestra la distribución del número de Nusselt local en función de la coordenada Y. El valor $Y = 0$ corresponde al escalón, los valores negativos para Y indican que la placa está aguas arriba del mismo, entonces $Y = -6.6$ ubica el extremo aguas arriba del escalón. Para números de Grashof pequeños el número de Nusselt local es mayor en el inicio de la placa, disminuye y luego aumenta monótonamente hacia el borde del escalón; al incrementarse el número de Grashof el Nusselt local en el extremo es significativamente más pequeño, disminuye al mínimo y luego se incrementa a valores más elevados que en el caso anterior en el resto de la placa ($Y > -5.3$).



a) Caso isotérmico, $Re_s = 55.8$

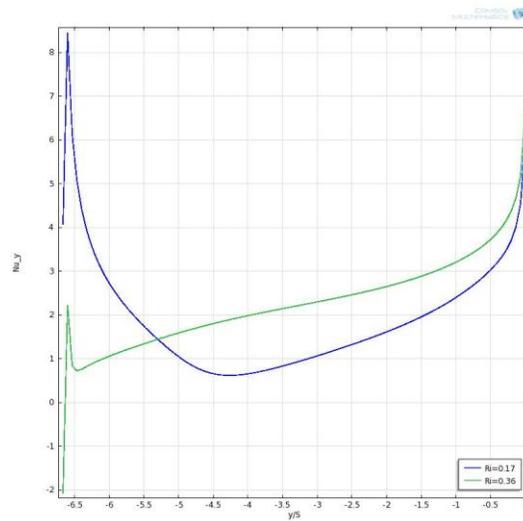


b) $Gr_s = 5 \times 10^2$; $Ri_s = 0.17$



c) $Gr_s = 1 \times 10^3$; $Ri_s = 0.35$

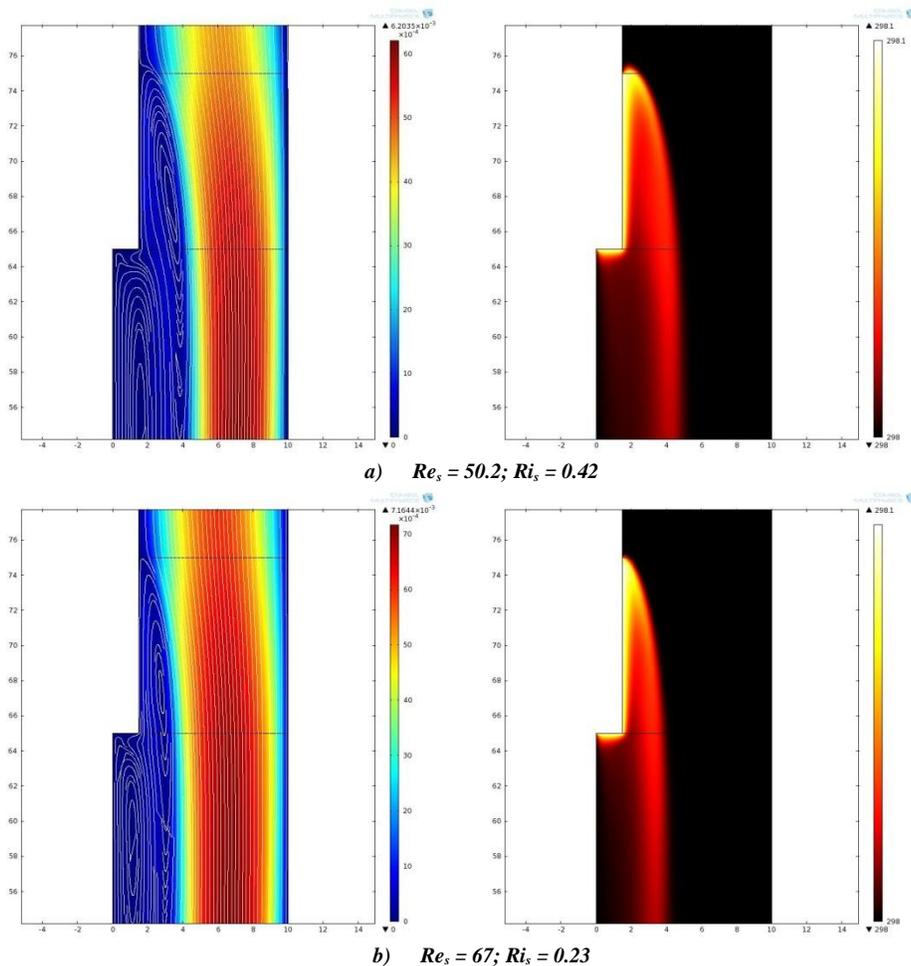
Figura 5.15 Influencia de la temperatura de pared

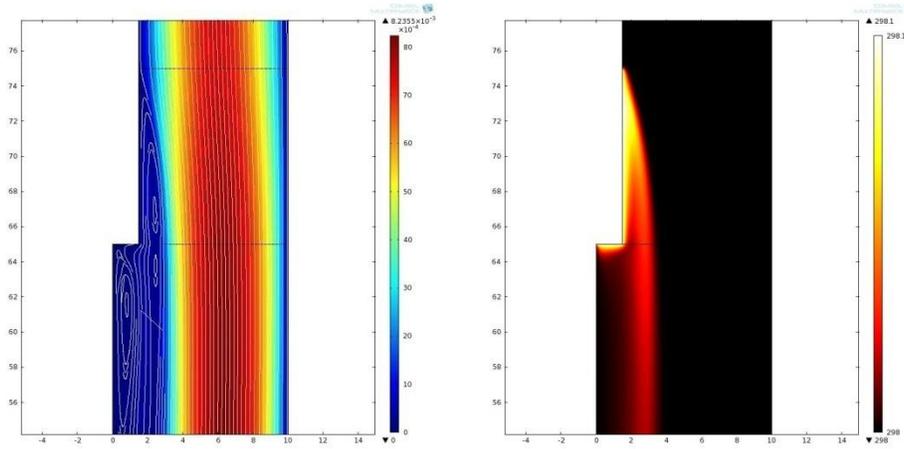


Graf. 5.12. Distribución del Nu_y .

5.3.2.2. Influencia del número de Reynolds.

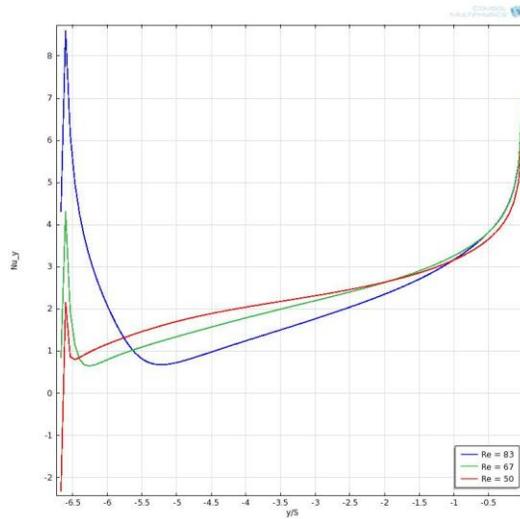
La figura 5.16 muestra el efecto de la variación de la velocidad de entrada al canal. Para bajos números de Reynolds, la fuerza de flotación se opone al flujo y desarrolla una zona de recirculación aguas arriba del escalón en la cercanía de la placa, la presencia de esta región aísla al flujo principal del fluido en la cercanía del escalón hacia atrás, lo que propicia el crecimiento de esta zona y su interacción con la zona formada debida al calentamiento de la placa, si el número de Reynolds disminuye lo suficiente, la fuerza de flotación vence a las fuerzas inerciales y desestabiliza al flujo; por otro lado, el incremento del número de Reynolds contrarresta el efecto de la fuerza de flotación, disminuyendo el tamaño de la zona de recirculación e incrementando la transferencia de calor en la placa, gráfica 5.12., si la velocidad de entrada se incrementa lo suficiente las fuerzas de inercia vencen a la flotación predominando la convección forzada sobre la convección natural.





c) $Re_s = 83; Ri_s = 0.15$

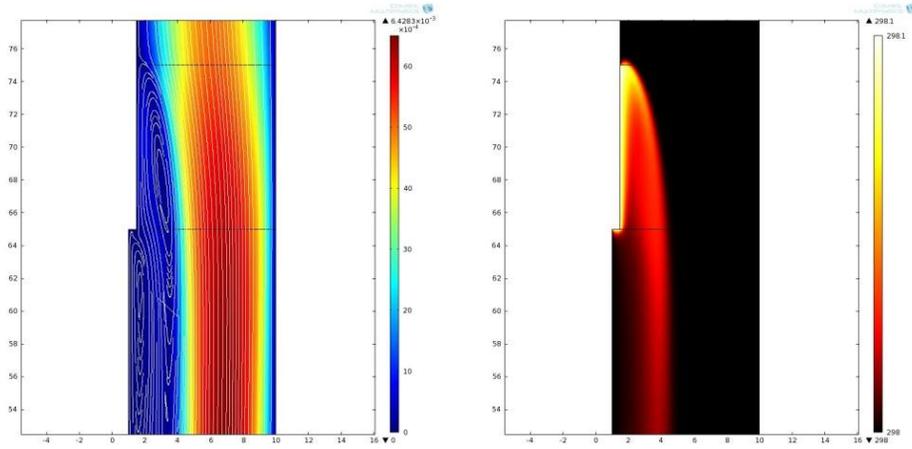
Fig. 5.16 Campos de velocidad y temperatura a diferentes valores de Re_s



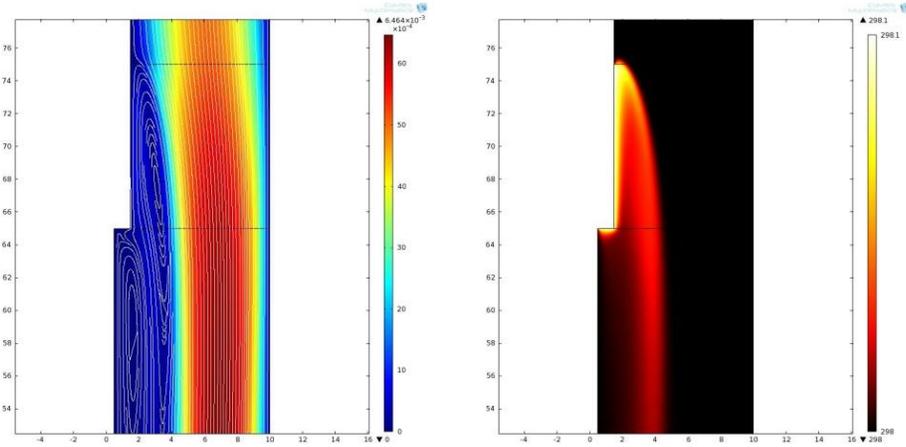
Graf. 5.13 Distribución de Nu_y para diferentes Re_s

5.3.2.3. Influencia del tamaño del escalón.

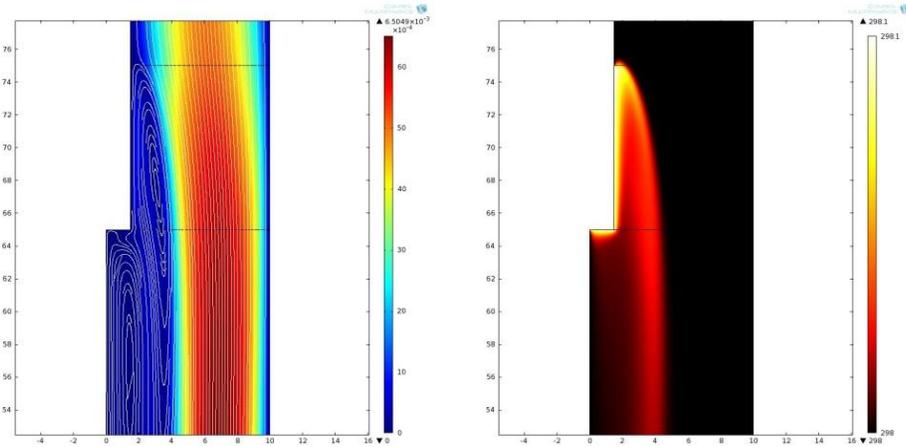
La figura 5.17 muestra el efecto de la variación del tamaño del escalón en los campos de velocidad y temperatura para tres valores de S . Puesto que los parámetros temperatura de pared y velocidad de entrada se mantienen fijos, el flujo aguas arriba del escalón permanece inalterado. Mientras que el tamaño de la zona de recirculación debida al calentamiento de la placa se conserva, el incremento del tamaño del escalón propicia el crecimiento de la zona de recirculación ubicada aguas abajo del mismo. Este crecimiento involucra la interacción de ambas zonas de recirculación cuyo comportamiento está influenciado por el calentamiento del escalón como se observa en los campos de temperatura.



a) S=0.5 cm



b) S=1.0 cm

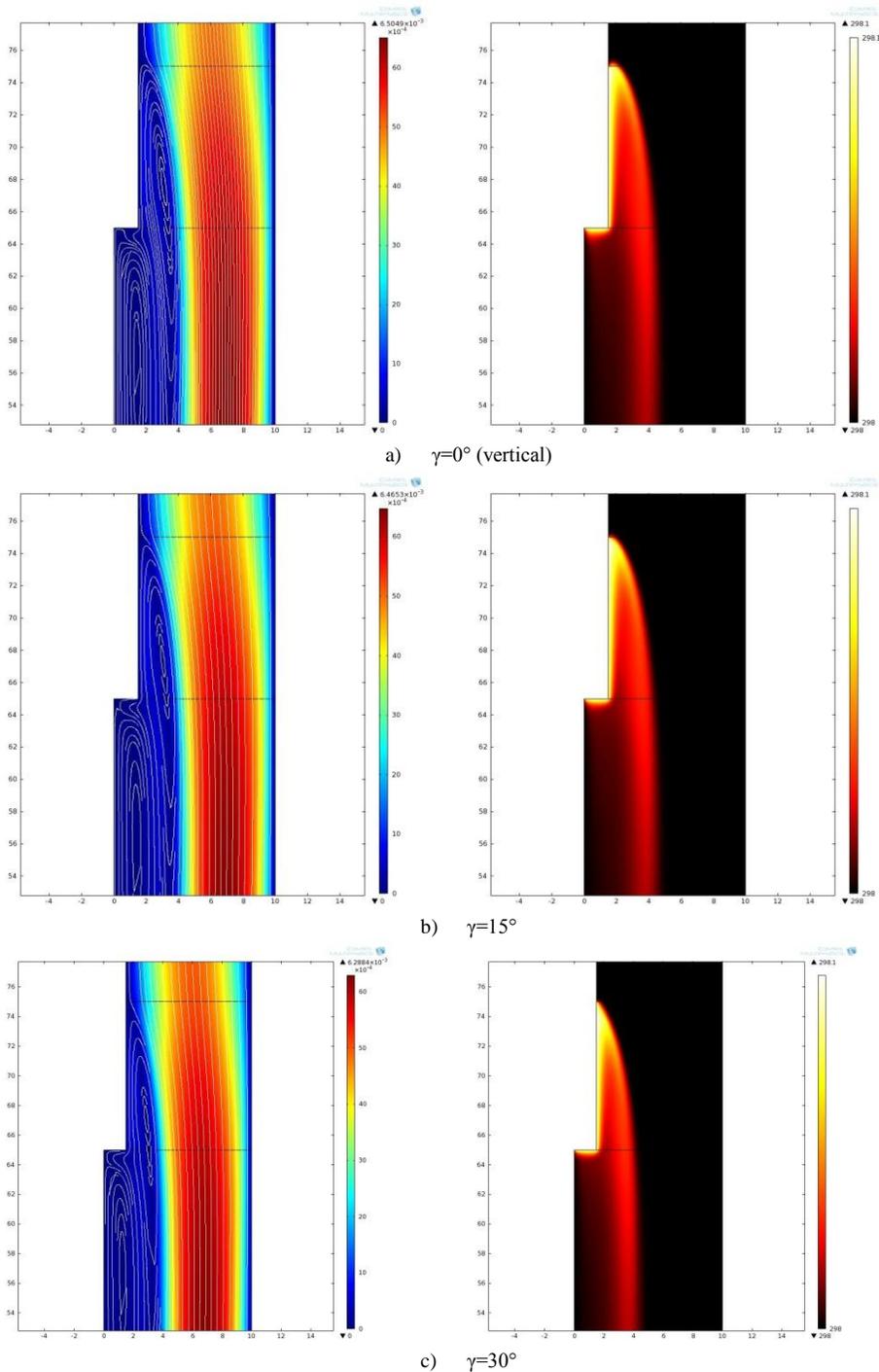


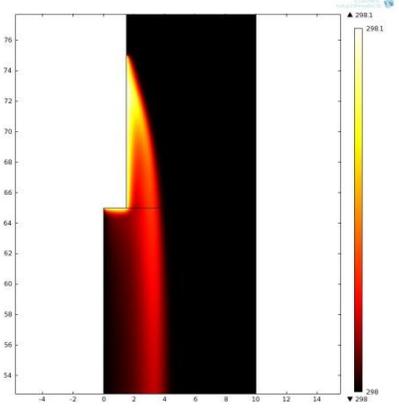
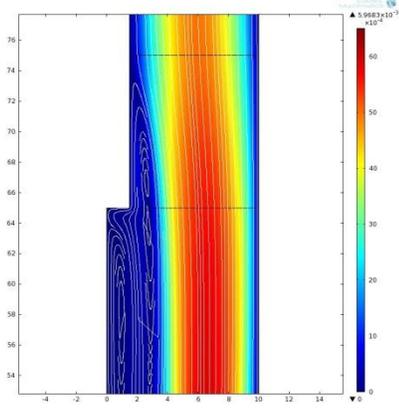
c) S=1.5 cm

Figura 5.17 Campos de velocidad y temperatura para diferentes valores de S

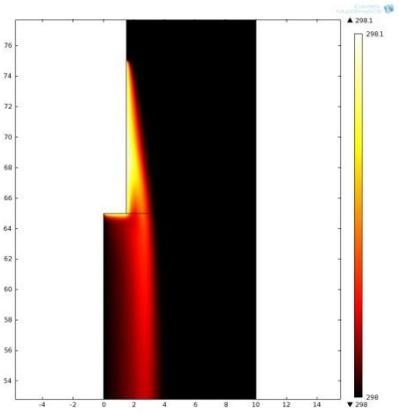
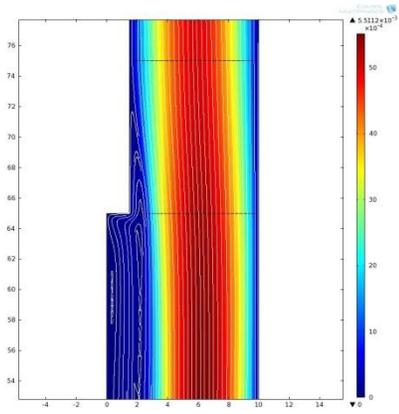
5.3.2.4. Influencia de la inclinación del canal

El efecto de la inclinación del canal en los campos de velocidad y temperatura se muestran en la figura 5.18. Al disminuir la componente de la fuerza de flotación opuesta al flujo con el incremento del ángulo de inclinación del canal, la región de recirculación formada aguas arriba disminuye su tamaño y desplaza a la región de recirculación formada aguas abajo del escalón, conservándose para el caso horizontal $\gamma=90^\circ$ sólo una zona de recirculación aguas abajo del escalón.

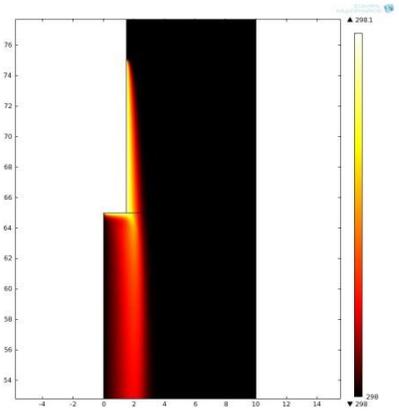
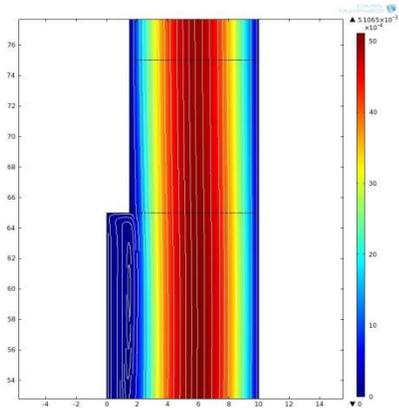




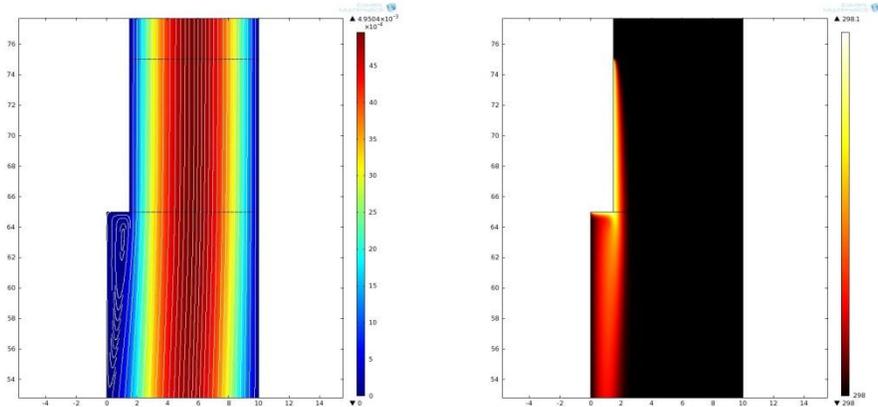
d) $\gamma=45^\circ$



e) $\gamma=60^\circ$



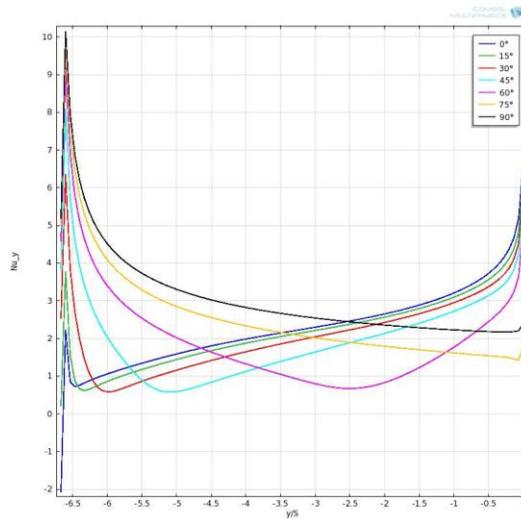
f) $\gamma=75^\circ$



g) $\gamma=90^\circ$ (horizontal)

Figura 5.18. Campos de velocidad y temperatura a diferentes valores de γ

La gráfica 5.13 muestra la distribución del Nusselt local en la placa para diferentes valores de γ , se observa que el número de Nusselt parte de un valor máximo que después disminuye hasta un valor mínimo y posteriormente se incrementa para los casos de $0^\circ < \gamma < 60^\circ$, mientras que los casos 75° y 90° presentan una disminución asintótica que se asocia a la ausencia de la zona de recirculación cerca de la placa pero con números de Nusselt mayores.



Graf. 5.14 Distribución de Nu_y para diferentes γ

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En este trabajo de investigación se estudió el problema de convección mixta para un flujo opuesto que se encuentra confinado dentro de un ducto vertical con escalón y que está sujeto a un calentamiento diferencial asimétrico. Se estudiaron los casos BFS y FFS. El problema se abordó empleando métodos numéricos para ambos casos y realizando mediciones experimentales para el caso FFS.

La metodología experimental utilizada fue velocimetría de imágenes de partículas (PIV) para obtener los campos de velocidad promedio y las dimensiones promedio de las estructuras vorticosas, se realizaron visualizaciones de la estructura del flujo con Rodamina 6G que permitieron observar el comportamiento del flujo.

El estudio experimental se realizó para un rango de números de Richardson de 0.3 a 9.5 en combinación con diversos valores del número de Reynolds y Grashof, determinándose la forma en que estos parámetros influyen en la estructura del flujo dentro del canal. Se determinó que es posible considerar al flujo en el canal como permanente y bidimensional para números de Richardson menores a 1, en este caso se obtuvo que el tamaño de la zona de recirculación y la longitud de reinserción se incrementan con el aumento del número de Richardson. Cuando este parámetro rebasa el valor de 1, las condiciones de flujo son altamente inestables y traen como consecuencia que la estructura del flujo resultante genere vórtices de diferentes escalas que interactúan en la vecindad de la placa y aguas arriba del escalón permaneciendo siempre en estado transitorio. Se observa un continuo desarrollo de vórtices y apareamiento entre ellos que se intensifica con el incremento del número de Richardson.

Para los valores de Richardson más grandes, los vórtices forman estructuras sumamente complejas y altamente tridimensionales, sin embargo, es muy evidente que el efecto del calentamiento para valores de Ri elevados va mucho más allá del borde del escalón, aguas arriba del mismo. Entre más

alto es el Ri , la zona de recirculación se desplaza aguas arriba con zonas vorticosas intermitentes que se contraen y alargan aguas arriba y separándose de la zona de origen.

Del análisis del rango de Ri estudiado experimentalmente es posible establecer una hipótesis acerca del comportamiento del flujo: Los casos de números de Ri pequeños ($Ri < 1$) desarrollan una zona de recirculación en la vecindad de la pared caliente cuyo tamaño incrementa con el incremento de la fuerza de flotación y muestra la presencia de un régimen laminar y un flujo permanente. El incremento de Ri ($1 < Ri < 4$) involucra una competencia mayor de las fuerzas inerciales y de flotación en el que el incremento el tamaño de la zona de recirculación desplazándose a su vez aguas arriba del escalón, y separándose posteriormente en dos vórtices de gran tamaño que permanecen uno aguas arriba y otro aguas abajo del escalón, dentro de los cuales puede observarse la separación y/o el apareamiento continuo de vórtices de menor tamaño. Un incremento mayor del Ri ($Ri > 4$) implica la inestabilización en el flujo que podría indicar la transición a la turbulencia.

Los resultados obtenidos con la solución numérica permitieron ampliar el estudio paramétrico del caso FFS e incluir el efecto de la variación del ángulo de inclinación del canal y del tamaño del escalón; fue posible también estudiar el caso BFS bajo los mismos parámetros de estudio y obtener para ambos casos los campos de velocidad y temperatura, sin embargo el inicio de la inestabilidad limita la aplicación de una solución bidimensional de flujo laminar para predecir las características de flujo y transferencia de calor en estas geometrías por lo que los resultados numéricos reportados son únicamente para números de Richardson menores a 1.

A partir de la comparación cuantitativa de los resultados experimentales y numéricos se obtuvo que el código numérico predice con bastante confiabilidad el tamaño (ancho) de la zona de recirculación ($\pm 3\%$) así mismo en los valores de la magnitud de la velocidad máxima alcanzada en los campos de velocidad.

Los resultados obtenidos para el caso de FFS muestran que el incremento del número de Gr , incrementa la longitud de reinserción del flujo y el tamaño de la zona de recirculación aguas abajo del escalón, mientras que el incremento del número de Reynolds disminuye el tamaño de esta zona. El incremento de ambos parámetros incrementa la transferencia de calor global en la placa y aleja del escalón la posición el valor del Nusselt local mínimo.

El incremento del tamaño del escalón incrementa ligeramente la transferencia de calor en la placa disminuyendo el tamaño de la zona de recirculación aguas abajo del escalón y aumentando el tamaño de la región de recirculación aguas arriba.

El estudio de la variación del ángulo de inclinación revela que el incremento de éste (desde la vertical hacia el plano horizontal) disminuye la transferencia de calor en la placa para el rango de 0 a 60° y lo incrementa para el rango 60 a 90° esto debido al desvanecimiento de la zona de recirculación aguas abajo del escalón para este último rango.

Por su parte los resultados obtenidos para el caso BFS demuestran que al igual que el caso FFS, el incremento del número de Grashof y del número de Reynolds incrementan la transferencia de calor en la placa, pero el incremento del Reynolds disminuye el tamaño de la zona de recirculación aguas arriba del escalón mientras que el incremento del Grashof lo aumenta y contribuye a la interacción de las zonas de recirculación aguas arriba y abajo del escalón.

El incremento del tamaño del escalón propicia la interacción de las zonas de recirculación pero parece no influir en la transferencia de calor de la placa, mientras que el incremento del ángulo de inclinación (desde la vertical hacia el plano horizontal) disminuye el tamaño de la zona de recirculación aguas arriba del escalón e incrementa la transferencia de calor.

Recomendaciones

- Se recomienda como trabajo posterior un estudio tridimensional (numérico y experimental) del flujo para números de Richardson altos, puesto que los efectos tridimensionales cobran importancia cuando se presenta la interacción continua de estructuras vorticosas.
- Se propone también la realización de un análisis de estabilidad para estos casos de estudio que permitan determinar el valor del número crítico de Richardson que inestabiliza al flujo.
- El estudio experimental de la variación del ángulo de inclinación puede ser trabajo de investigación posterior empleando el modelo utilizado en este trabajo puesto que éste, se diseñó bajo este propósito.
- Inicialmente uno de los objetivos de este trabajo era obtener los campos de temperatura con la técnica experimental PLIF sin embargo esto no pudo ser posible por diversas causas, por lo que se recomienda una ampliación de este caso de estudio experimental que permita comparar los campos de temperatura obtenidos numéricamente, con los resultados experimentales.

A g r a d e c i m i e n t o s

- Se agradece el apoyo otorgado por el **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT** a través de la beca **377176/246078**
- Al “*Laboratorio de Sistemas de Combustión*” del **Instituto Mexicano del Petróleo, IMP** por el uso de sus equipos e instalaciones para la realización de parte la experimental de este proyecto.
- Al “*Laboratorio de Termofluidos*” de la Facultad de Ingeniería de la **Universidad Nacional Autónoma de México** por los recursos computacionales que permitieron la realización de la parte numérica de este proyecto.

Referencias

Bibliográficas

1. Abu-Mulaweh, Armaly B. F., Chen T. S., **Measurements of laminar mixed convection in boundary-layer flow over horizontal and inclined backward-facing steps.** Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 36, No. 7, pp. 1883-1895, (1993).
2. Abu-Mulaweh H.I., Armaly B.F., Chen T.S. **Measurements in buoyancy-opposing laminar flow over a vertical Backward-Facing Step.** Journal of Heat Transfer Vol. 116, pp. 247-250. (1994)
3. Abu-Mulaweh H.I., Armaly B.F., Chen T.S. **Measurements in Buoyancy-Opposing Laminar Flow over a Vertical Forward-Facing Step.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 39, 9:1805-1813. (1996).
4. Armaly B. F., Durst F., Pereira J.C.F., Schönung B. **Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow.** J. Fluid Mech. Vol. 127, pp. 473-496. (1983)
5. Baek B.J., Armaly B.F., Chen T.S. **Measurements in Buoyancy-Assisting Separated Flow behind a Vertical Backward-Facing Step.** Journal of Heat Transfer vol. 115, pp. 403-408. (1993)
6. Barbosa S., Morales C., Gutiérrez C., Moreno, Quinto D. **Estudio Numérico-Experimental de Zona de Separación en Conducto Rectangular con Escalón.** Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo, Vol. 3 No. 5 187-194. (2010)
7. Barbosa S., Jiménez J., Gutiérrez C., Moreno L. **Análisis Numérico Tridimensional de la Convección Forzada para un Flujo Laminar sobre un Escalón al Frente.** 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (2007).
8. Barbosa S., Anand N. K., Sarin V. **Numerical Simulation of Mixed Convective Flow over a Three-Dimensional Horizontal Backward Facing Step.** Journal of Heat Transfer Vol. 127, 1027-1036. (2005).
9. Bruchhausen M, Guillard F, Lemoine F. **Instantaneous measurement of two-dimensional temperature distributions by means of two-color planar laser induced fluorescence (PLIF).** Exp Fluids 38:123-131(2005)
10. Coolen MCJ, Kieft RN, Rindt CCM, van Steenhoven AA. **Application of 2-D LIF temperature measurements in water using a Nd:YAG laser.** Exp Fluids 27:420-426 (1999)
11. Chiang T. P., Sheua W. H., **A numerical revisit of backward-facing step flow problem.** Physics of Fluids, Vol.11, No. 4, (1999).

12. Iwai H., Nakabe K., Suzuki K. **Flow and heat transfer characteristics of backward-facing step laminar flow in a rectangular duct.** International Journal of Heat and Mass Transfer 43 457-471. (2000)
13. Iwai H., Nakabe K., Suzuki K., Matsubara K. **The effects of duct inclination angle on laminar mixed convective flows over a backward-facing step.** Int. J. Heat Mass Transfer 43, 473-485. (2000)
14. Hishida K., Sakakibara J., **Combined planar laser induced fluorescence – Particle Image Velocimetry technique for velocity and temperature fields.** Exp Fluids 29:S129-S140.(2000).
15. Hong B., Armaly B. F., Chen T. S., **Laminar mixed convection in a duct with a backward-facing step: the effects of inclination angle and Prandtl number.** Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 36, No. 12, pp. 3059-3067, (1993).
16. Karasso PS, Mungal MG., **PLIF measurements in aqueous flows using the Nd:YAG laser.** Exp Fluids 23:382–387 (1997)
17. Kobayashi T., Hu H., Saga T. **Optical Diagnostics for Velocity, Temperature and Species Measurements of the Flow Field.** Proceeding of '99 Korea-Japan Joint Seminar on Particle Image Velocimetry pp15-31
18. Largeau J., Moriniere V. **Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward facing step.** Exp. Fluids. vol. 42 no.1, pp. 21-40, (2007).
19. Lin J. T., Armaly B.F., Chen T.S. **Mixed Convection in Buoyancy-Assisting, Vertical Backward-Facing Step Flows.** Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 33, No. 10, pp. 2121-2132, (1990).
20. Lin J. T., Armaly B. F., Chen T. S., **Mixed convection heat transfer in inclined backward-facing step flows.** Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 34, No. 6, pp. 1568-1571, (1991).
21. Mouza A.A., Pantzali M.N., Paras S.V. **Experimental & Numerical Study Of Backward-Facing Step Flow.** 5th National Chemical Engineering Conference, Thessaloniki, Greece, (2005)
22. Sakakibara J, Adrian RJ. **Whole field measurements of temperature in water using two-color laser-induced fluorescence.** Exp Fluids 26:7–15 (1999)
23. Stürer H., Gyr A., Kinzelbach W. **Laminar Separation on a Forward Facing Step.** European Journal of Mechanics B/Fluids, 18 issue 4: 675–692. (1999)

Virtuales

- Dantec Dynamics “Seeding Materials” obtenido de la red mundial en Junio de 2012. <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=731>

A n e x o A.

Cálculo de parámetros adimensionales

El cálculo de los parámetros adimensionales a partir de las propiedades termodinámicas del fluido para los casos experimentales y numéricos sea realizaron mediante el software EES Engineering Equation Solver, a continuación se presenta el código utilizado en el que se introducían los valores de las variables de acuerdo a las condiciones que se presentaban.

```
"!Declaración de Variables"
L=0.1[m]
S=0.015[m]
D_in=0.1[m]
D_out=0.085[m]
ancho=0.2[m]
A_in=D_in*ancho [m^2]
A_out=D_out*ancho [m^2]
Dh=(4*A_in)/(2*D_in+2*ancho)
Q=4[l/min]
U=((Q*0.1^3)/60)/A_in [m/s]
T_w=27.1+273[K]
T_infinity=27+273[K]
T_f=(T_w+T_infinity)/2
P_0=101,325[kPa]
g=g#

"!Propiedades termodinámicas del fluido"
"!Coeficiente de expansión volumétrica"
beta_f=-0.03667+3.65511e-4*T_f-1.36801e-6*T_f^2+2.30008e-9*T_f^3-
1.44402e-12*T_f^4
beta_a=VolExpCoef(Water;T=T_f;P=P_0)

"!Densidad"
rho_f=-975.64073+21.33427*T_f-0.08451*T_f^2+1.4731e-4*T_f^3-
9.8682e-8*T_f^4
rho_a=Density(Water;T_f;P=P_0)

"!Viscosidad dinámica"
mu_f=0.47073-0.00612*T_f+3.19752e-5*T_f^2-8.36287e-
8*T_f^3+1.09393e-10*T_f^4-5.72061e-14*T_f^5
mu_a=Viscosity(Water;T_f;P=P_0)
```

"Viscosidad cinemática"

$$\text{nu}_f = \mu_f / \rho_f$$

$$\text{nu}_a = \mu_a / \rho_a$$

"Conductividad térmica"

$$k_f = -49.93193 + 0.70706 * T_f - 0.00397 * T_f^2 + 1.11776e-5 * T_f^3 - 1.57066e-8 * T_f^4 + 8.8017e-12 * T_f^5$$

$$k_a = \text{Conductivity}(\text{Water}; T=T_f; P=P_0)$$

"Capacidad térmica específica a presión constante"

$$Cp_f = 18.53485 - 0.1557 * T_f + 6.34295e-4 * T_f^2 - 1.15681e-6 * T_f^3 + 8.02996e-10 * T_f^4$$

$$Cp_a = Cp(\text{Water}; T=T_f; P=P_0)$$

"!Parámetros adimensionales"

$$\text{Re}_L = U * L / \text{nu}_a$$

$$\text{Re}_{Dh} = (U * Dh) / \text{nu}_a$$

$$\text{Re}_S = (U * S) / \text{nu}_a$$

$$\text{Gr}_L = (g * \beta_a * (T_w - T_{\infty}) * L^3) / \text{nu}_a^2$$

$$\text{Gr}_S = (g * \beta_a * (T_w - T_{\infty}) * S^3) / \text{nu}_a^2$$

$$\text{Ri}_L = \text{Gr}_L / (\text{Re}_L)^2$$

$$\text{Ri}_S = \text{Gr}_S / (\text{Re}_S)^2$$

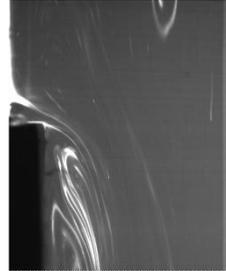
C:\Users\Diana Lissette\Documents\Tesis\num_adimensionales.EES

A n e x o B.

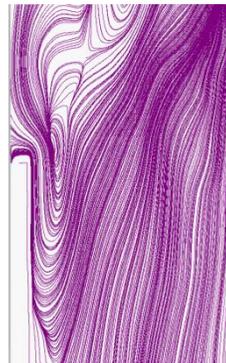
Resumen y descripción de animaciones de líneas de corriente

A continuación se presenta un resumen de las animaciones incluidas en el CD anexo a la presente. El CD incluye animaciones de líneas de corriente obtenidas con el software Flow Manager para los casos experimentales de Richardson más altos y que no fueron descritos en el capítulo V.

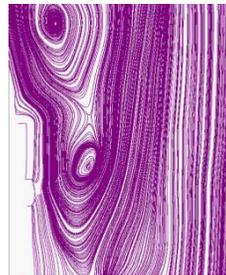
- El archivo **VisualizaciónRh6G**
Contiene una secuencia de imágenes de la visualización realizada con Rodamina 6G como trazador para el caso de Richardson 0.7, las imágenes fueron obtenidas en este caso con una de las cámaras CCD del equipo PIV.



- El archivo **$\Delta T1.5_Ri5.6$**
Forma parte del estudio de la variación del número de Grashof para Reynolds fijo (caudal 4 l/min). Para este caso la diferencia de temperatura entre la placa caliente y el fluido es de 1.5°C que corresponde a un Richardson de 5.6



- Archivo **$\Delta T2.0_Ri7.5$**
Forma parte del estudio de la variación del número de Grashof para Reynolds fijo (caudal 4 l/min). La diferencia de temperatura entre la placa caliente y el fluido en este caso es de 2°C que corresponde a un Richardson de 7.5



- Archivo **$\Delta T2.5_Ri9.5$**
Forma parte del estudio de la variación del número de Grashof para Reynolds fijo (caudal 4 l/min). La diferencia de temperatura entre la placa caliente y el fluido es de 2.5°C que corresponde a un Richardson de 9.5

