



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO SOBRE UN ESCALÓN
MEDIANTE LA TÉCNICA PIV”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA
ING. ADÁN JUÁREZ MONTALVO

DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ ALFREDO JIMÉNEZ BERNAL

MÉXICO D.F. 2011





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 13:00 horas del día 29 del mes de Abril del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E. para examinar la tesis de titulada: "ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO SOBRE UN ESCALÓN MEDIANTE LA TÉCNICA PIV".

Presentada por el alumno:

JUÁREZ

Apellido paterno

MONTALVO

Apellido materno

ADÁN

Nombre(s)

Con registro:

B	0	8	1	1	9	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECÁNICA

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

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

DR. JOSÉ ALFREDO JIMENEZ BERNAL

Presidente

DR PEDRO QUINTO DIEZ

Tercer Vocal

M. EN C. JUAN ABUGABER FRANCIS

Segundo Vocal

DR. LUIS ALFONSO MORENO PACHECO

Secretario

DRA. CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCIA





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México D.F. el día 25 del mes de Abril del año 2011, el (la) que suscribe Juárez Montalvo Adán alumno (a) del Programa de Maestría en ciencias en Ingeniería Mecánica con número de registro B081192, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. José Alfredo Jiménez Bernal y cede los derechos del trabajo intitulado “ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO SOBRE UN ESCALÓN MEDIANTE LA TÉCNICA PIV”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

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

Juárez Montalvo Adán

Nombre y firma

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta un estudio experimental; llevado a cabo en el labinthap, en un canal rectangular que contiene un escalón. El canal utilizado para los experimentos tiene una longitud, $L = 1400$ mm, un ancho $w = 100$ mm y una altura $H = 20$ mm, construido de acrílico transparente con un espesor de pared de 9 mm. El escalón tiene una longitud, $l_c = 600$ mm, un ancho $w = 100$ mm y una altura $h = 10$ mm. Esto da una relación de aspecto $w/h=10$. Este es el valor mínimo de relación de aspecto que permite reducir el efecto de las paredes laterales sobre el flujo.

Los números de Reynolds basados en la altura del escalón Re_h , utilizados en este trabajo son: 281, 562, 843, 1124, 1404 y 1685. Estos corresponden a los números de Reynolds basados en el diámetro hidráulico $Re_\phi = 1021, 2043, 3064, 4086, 5107$ y 6128. En el primer Re_ϕ se observó en los perfiles de velocidad que el flujo presentaba un perfil de tipo turbulento debido a que la distancia a la que se colocó el escalón es muy pequeña, comparada con la distancia necesaria para obtener flujo desarrollado a régimen laminar.

Los experimentos se realizaron en una zona localizada en la base del escalón a la cual se le llamo zona A y en una zona posterior localizada 120 mm de la base del escalón llamada zona B. La región total de visión del flujo corresponde a un área de 1600 pix x 1186 pix (22.77 mm x 16.89 mm). El flujo se analizó en las dos regiones mencionadas anteriormente para el caso del flujo hacia el frente del escalón (FFS) y flujo hacia atrás del escalón (BFS).

La técnica experimental que se empleó para la medición es velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV). Esta es una técnica óptica laser no intrusiva. El empleo de esta técnica permitió que se evaluaran los siguientes parámetros del flujo: campos de velocidad instantáneos y promedio, perfiles de velocidad, evaluación de la u_{rms} y v_{rms} para fluctuaciones de la velocidad, vorticidad, posición del centro del vórtice y tamaño del vortice.

Los campos de velocidad muestran para el caso FFS un único vórtice, mientras que para el caso BFS muestran un vórtice secundario y parte del vórtice primario. Las dimensiones de estos vórtices, así como la posición de su centro (x_e, y_e) se encontró que

varían con el Re_ϕ . Los perfiles de velocidad en la zona del escalón presentan velocidades negativas en ambos casos (FFS y BFS) lo cual indica recirculación del flujo.

Las u_{rms} y v_{rms} de las fluctuaciones de la velocidad en la zona B resultaron ser de magnitud similar para ambos casos de dirección del flujo analizados, para la zona A la u_{rms} resulto ser mayor para el caso BFS que el FFS, lo cual podría ser una indicación de que el caso BFS es más inestable que el caso FFS en la base del escalón.

La vorticidad promedio para la zona B es de magnitud similar en ambas direcciones del flujo analizadas, para la zona A la magnitud de la vorticidad es mayor en el caso FFS. Fue observado que cuando la vorticidad se incrementa, u_{rms} disminuye.

La posición del centro del vórtice para el caso FFS esta relacionada con el número de Re_ϕ . En el caso BFS no se encontró una tendencia específica pero si se observaron rangos de variación de la posición del centro a diferentes Re_ϕ . Para la capa de separación del vórtice primario-secundario del caso BFS se observaron valores crecientes en la coordenada horizontal al aumentar Re_ϕ .

Abstract

In this work an experimental study is presented. This study was carried out in the Labinthap, in a rectangular channel containing a step. This channel is 1400 mm length, 100 mm width, and 20 mm height; and it is built in cast acrylic with a wall thickness of 9 mm. The contained step is 700 mm length, 100 mm width and 10 mm height. This means its aspect ratio $w/h=10$. This aspect ratio value is the minimum value that allows a reduction of wall effects on the flow.

Reynolds number was calculated using step height as characteristic length (Re_h). In this work the following cases for Re_h were studied: 281, 562, 843, 1124, 1404 and 1685. For the same flow conditions a different Reynolds number calculation was performed using hydraulic diameter as characteristic length obtaining: $Re_\phi = 1021, 2043, 3064, 4086, 5107,$ and 6128. For the first value of Re_ϕ , it was observed that average velocity profiles were similar to turbulent profiles because the test area was placed at a distance from flow entrance that was not enough for fully developed laminar flow.

The experiments were performed at two different zones: zone A placed at step base, and zone B separated 120 mm from the step base. The test area is 1600 x 1186 pix (22.77 x 16.89 mm) both, Forward facing step (FFS) and Backward facing step (BFS) flows were analyzed in both zones.

For the FFS case, only a vortex appeared. Meanwhile, for the BFS case two vortices appeared: a main vortex and a secondary one. It was found that the vortex dimensions and core position change with Re_ϕ . Velocity profiles at the step zone show negative velocities in both cases (FFS and BFS) which illustrates flow recirculation.

u_{rms} and v_{rms} at zone B turned out to be of similar magnitude for both cases. On the other hand, at zone A u_{rms} for BFS is larger than u_{rms} for FFS, which could be a sign of instability for that case.

Average vorticity at zone B is similar in both cases. However, at zone A FFS average vorticity is larger. It was observed that when vorticity increases, u_{rms} decreases.

Vortex core position for the FFS case is directly related to Re_φ . For the BFS case no tendency was found, but variation ranges for vortex core position were observed for different Re_φ .

For the interface layer observed between main and secondary vortices in the BFS case, horizontal position changes as Re_φ increases



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO SOBRE UN ESCALÓN
MEDIANTE LA TÉCNICA PIV”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA
ING. ADÁN JUÁREZ MONTALVO

DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ ALFREDO JIMÉNEZ BERNAL

MÉXICO D.F. 2011



ÍNDICE TEMÁTICO

	Pág.
Relación de Figuras	IV
Lista de Tablas	VIII
Nomenclatura	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
Introducción	XV
CAPÍTULO 1. Generalidades	
1.1 Flujo sobre un escalón	1
1.2 Métodos de control de la separación y readherencia del flujo	4
CAPÍTULO 2. Velocimetría Mediante imágenes de Partículas	
2.1 Principios de operación	11
2.2 Componentes del sistema	15
2.3 Algoritmos de correlación	20
2.4 Calibración del sistema PIV	22
CAPÍTULO 3. Montaje experimental	
3.1 Matriz de pruebas	23
3.2 Diseño del área de pruebas	23
3.3 Montaje del sistema PIV	30
CAPÍTULO 4. Análisis de resultados	
4.1 Campos de velocidad instantáneos	36
4.2 Campos de velocidad promedio	41
4.3 Perfiles de velocidad	47
4.4 Evaluación de la rms para fluctuaciones de velocidad	58
4.5 Vorticidad promedio	66
4.6 Posición del centro del vórtice	80

Conclusiones	83
Bibliografía	85

Relación de figuras

Capítulo 1

Fig. 1.1	Flujo sobre un escalón atrás	2
Fig. 1.2	Flujo sobre un escalón hacia el frente	3
Fig. 1.3	Zona de separación cerrada en el escalón	4

Capítulo 2

Fig. 2.1	Sistema PIV	12
Fig. 2.2	Principio de funcionamiento del sistema PIV	13
Fig. 2.3	Plano dividido en 36 regiones de interrogación	14
Fig. 2.4	Arreglo óptico integrado para producir la hoja de luz	17
Fig. 2.5	Sincronización del láser con la cámara CCD	18
Fig. 2.6	Dos imágenes de PIV divididas en zonas de interrogación	21

Capítulo 3

Fig. 3.1	Dimensiones del túnel de pruebas	25
Fig. 3.2	Cabezales para entrada y/o salida del flujo de agua	25
Fig. 3.3	Túnel experimental	25
Fig. 3.4	Bomba sumergible de ¼ HP	26
Fig. 3.5	Recipiente de vidrio	27
Fig. 3.6	Válvula de control del sistema	28
Fig. 3.7	Rotámetro graduado en LPM	28
Fig. 3.8	Componentes del circuito hidráulico y zonas de pruebas del montaje experimental	29
Fig. 3.9	Cámara Flowsense M2-8bit	30
Fig. 3.10	Láser Nd: YAG de la marca New Wave Gemini	31
Fig. 3.11	Fuente de poder del laser ND:YAG	31
Fig. 3.12	Dispositivo sincronizador del sistema PIV (HUB).	32
Fig. 3.13	Arquitectura del dispositivo sincronizador	33
Fig. 3.14	Flujo de datos hacia la computadora personal	33
Fig. 3.15	Diagrama de funcionamiento de sistema eléctrico del PIV	34
Fig. 3.16	Diagrama de funcionamiento de sistema control del PIV	35

Capítulo 4

Fig. 4.1a	Fotografía de la zona de pruebas A (FFS)	37
Fig. 4.1b	Fotografía de la zona de pruebas B (FFS)	37
Fig. 4.2 a	Fotografía de la zona de pruebas A (BFS)	38
Fig. 4.2 b	Fotografía de la zona de pruebas A (BFS)	38
Fig. 4.3	Campo de velocidad instantáneo a $Re_{\phi} = 6128$ (FFS)	39
Fig. 4.4	Campo de velocidad instantáneo a $Re_{\phi} = 6128$ (BFS)	39
Fig. 4.5	Campo de velocidad instantáneo a $Re_{\phi} = 6128$ zona B(FFS)	40
Fig. 4.6	Campo de velocidad instantáneo a $Re_{\phi} = 6128$ zona B(BFS)	40

Fig. 4.7	Campo de velocidad promedio para FFS a $Re_{\phi} = 6128$	41
Fig. 4.8	Campo de velocidad promedio para FFS a $Re_{\phi} = 5107$	42
Fig. 4.9	Campo de velocidad promedio para FFS a $Re_{\phi} = 4086$	42
Fig. 4.10	Campo de velocidad promedio para FFS a $Re_{\phi} = 3064$	43
Fig. 4.11	Campo de velocidad promedio para FFS a $Re_{\phi} = 2043$	43
Fig. 4.12	Campo de velocidad promedio para FFS a $Re_{\phi} = 1021$	44
Fig. 4.13	Campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi} = 6128$ (BFS)	45
Fig. 4.14	Campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi} = 6128$ (BFS)	45
Fig. 4.15	Campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi} = 5107$ (BFS)	46
Fig. 4.16	Campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi} = 4086$ (BFS)	46
Fig. 4.17	Campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi} = 3064$ (BFS)	47
Fig. 4.18	Imagen representativa de los perfiles de velocidad para un $Re_{\phi} = 6128$	48
Fig. 4.19a	Perfil de velocidad de la componente u zona B para diferentes Re_{ϕ} (FFS)	49
Fig. 4.19b	Perfil de velocidad de la componente u zona B (FFS) adimensionalizados	49
Fig. 4.20	Perfil de velocidad de la componente v zona B para diferentes Re_{ϕ} (FFS)	50
Fig. 4.21	Perfil de velocidad componente u zona A para diferentes Re_{ϕ} (FFS)	51
Fig. 4.22	Perfil de velocidad componente V zona del escalón (FFS)	52
Fig. 4.23	Imagen representativa de los perfiles de velocidad para un $Re_{\phi} = 6128$	53
Fig. 4.24	Perfil de velocidad de la componente u zona B (BFS)	54
Fig. 4.25	Perfil de velocidad de la componente u zona B (BFS) adimensionalizados	55
Fig. 4.26	Perfil de velocidad de la componente v zona B para diferentes Re_{ϕ} (BFS)	55
Fig. 4.27	Perfil de velocidad de la componente u en la zona A para diferentes Re_{ϕ} (BFS)	56
Fig. 4.28	Perfil de velocidad de la componente v en la zona A para diferentes Re_{ϕ} (BFS)	57
Fig. 4.29	Perfil de la rms componente u zona B para diferentes Re_{ϕ} (FFS)	59
Fig. 4.30	Perfil de la rms componente v zona B para diferentes Re_{ϕ} (FFS)	59
Fig. 4.31	Perfil de la rms componente u zona A para diferentes Re_{ϕ} (FFS)	61
Fig. 4.32	Perfil de la rms componente v en la zona A para diferentes Re_{ϕ} (FFS)	62

Fig. 4.33	Perfil de la rms componente u zona B para diferentes Re_ϕ (BFS)	63
Fig. 4.34	Perfil de la rms componente v zona B para diferentes Re_ϕ (BFS)	63
Fig. 4.35	Perfil de la rms componente u zona A para diferentes Re_ϕ (BFS)	65
Fig. 4.36	Perfil de la rms componente v zona A para diferentes Re_ϕ (BFS)	66
Fig. 4.37	Mapas de vorticidad $Re_\phi = 2043$	67
Fig. 4.38	Mapas de vorticidad $Re_\phi = 3064$	68
Fig. 4.39	Mapas de vorticidad $Re_\phi = 4086$	68
Fig. 4.40	Mapas de vorticidad $Re_\phi = 5107$	69
Fig. 4.41	Mapas de vorticidad $Re_\phi = 6128$	69
Fig. 4.42	Mapa de vorticidad para un flujo hacia el frente del escalón (FFS)	70
Fig. 4.43	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 1021$	71
Fig. 4.44	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 2043$	71
Fig. 4.45	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 3064$	72
Fig. 4.46	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 4086$	72
Fig. 4.47	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 5107$	73
Fig. 4.48	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 6128$	73
Fig. 4.49	Mapa de vorticidad para BFS zona B $Re_\phi = 3064$	74
Fig. 4.50	Mapa de vorticidad para BFS zona B $Re_\phi = 4086$	75
Fig. 4.51	Mapa de vorticidad para BFS zona B $Re_\phi = 5107$	75
Fig. 4.52	Mapa de vorticidad para BFS zona B $Re_\phi = 6128$	76
Fig. 4.53	Mapa de vorticidad para flujo hacia atrás del escalón (BFS $Re_\phi = 6128$)	77
Fig. 4.54	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 3064$	78
Fig. 4.55	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 4086$	78
Fig. 4.56	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 5107$	79
Fig. 4.57	Mapa de vorticidad $Re_\phi = 6128$	79
Fig. 4.58	Centro del vórtice flujo hacia el frente (FFS)	81
Fig. 4.59	Centro del vórtice flujo hacia atrás (BFS)	81
Fig. 4.60	Coordenadas utilizadas para el centro del vórtice	83

Lista De Tablas

Tabla	Capítulo 2	pág.
2.1	Tipos de partículas sembradas para flujos líquidos.	16
2.2	Tipos de partículas sembradas para flujos gaseosos	16
Capítulo 3		
3.1	Matriz experimental de pruebas escalón al frente (FFS)	23
3.2	Matriz experimental de pruebas escalón atrás (BFS)	24
Capítulo 4		
4.1	Valores máximos de velocidad para las componentes u y v	48
4.2	Velocidades máximas para la componente u	53
4.3	Porcentaje de variación entre velocidades máximas	54
4.4	Valores de rms y posición para las componentes u y v	58
4.5	Valores de rms y posición para las componentes u y v	60
4.6	Valores de rms y posición para las componentes u y v	62
4.7	Valores de rms y posición para las componentes u y v	64
4.8	Posición del centro del vórtice aguas arriba (FFS)	82
4.9	Posición del centro del vórtice aguas abajo (BFS)	83

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Zona de pruebas del canal en la base del escalón	[---]
AR	Relación de aspecto w/h	[--]
B	Zona de pruebas del canal alejada 120 mm del escalón	[---]
BFS	Escalón hacia atrás	[--]
FFS	Escalón hacia el frente	[--]
H	Altura del canal	[mm]
h	Altura del escalón	[mm]
l_d	Longitud para obtener un perfil turbulento totalmente desarrollado	[m]
l_{cl}	Longitud total del canal	[m]
Px	Píxeles	[--]
Q	Flujo volumétrico	[m ³ /s]
Re_h	Numero de Reynolds basado en la altura del escalón ($\rho v h / \mu$)	[--]
Re_ϕ	Numero de Reynolds basado en el diámetro hidráulico ($\rho v \phi / \mu$)	[--]
rms	Raíz cuadrada de las fluctuación de la velocidad	[m/s]
R(s)	Función de de auto correlación	[m]
s	Tiempo	[s]
t piv	Tiempo del disparo del laser entre una exposición y otra	[μ s]
u	Componente de la velocidad en la dirección x	[m/s]
\bar{u}	Valor medio de la velocidad con respecto al tiempo.	[m/s]
u'	Fluctuación de la velocidad en la dirección x	[m/s]
u_{rms}	Raíz cuadrada de la fluctuación de velocidad en dirección x $\sqrt{u'}$	[m/s]
v	Componente de la velocidad en la dirección y	[m/s]
\bar{v}	Componente de la velocidad en la dirección y	[m/s]
v'	Fluctuación de la velocidad en la dirección y	[m/s]
v_{rms}	Raíz cuadrada de la fluctuación de velocidad en dirección y $\sqrt{v'}$	[m/s]
w	Espesor del canal	[mm]
X_v	Distancia a partir del origen (0,0) de la imagen de flow manager	[mm]
X_e	Distancia del escalón al centro del vórtice	[mm]
X_e/h	Distancia del escalón al centro del vórtice adimensionalizada	[----]
X_{lc}	Distancia de la entrada del canal al centro del vórtice	[mm]
X_{lc}/h	Distancia de la entrada del canal al centro del vórtice adimensionalizada	[--]
y	Coordenada vertical de posición	[mm]
y_e	Coordenada vertical de posición para el centro del vórtice	[mm]

y_e/h	Coordenada vertical del vórtice adimensionalizada	[mm]
y/h	Distancia coordenada vertical adimensionalizada	[-]

ALF. GRIEGO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
τ	Esfuerzo cortante	[N/m ²]
ρ	Densidad	[Kg/m ³]
φ	Diámetro hidráulico $4Hw/(H+2w)$	[m]
μ	Viscosidad dinámica	[Ns/m ²]
ω_z	Vorticidad en el eje z	[s ⁻¹]

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta un estudio experimental; llevado a cabo en el labinthap, en un canal rectangular que contiene un escalón. El canal utilizado para los experimentos tiene una longitud, $L = 1400$ mm, un ancho $w = 100$ mm y una altura $H = 20$ mm, construido de acrílico transparente con un espesor de pared de 9 mm. El escalón tiene una longitud, $l_c = 600$ mm, un ancho $w = 100$ mm y una altura $h = 10$ mm. Esto da una relación de aspecto $w/h=10$. Este es el valor mínimo de relación de aspecto que permite reducir el efecto de las paredes laterales sobre el flujo.

Los números de Reynolds basados en la altura del escalón Re_h , utilizados en este trabajo son: 281, 562, 843, 1124, 1404 y 1685. Estos corresponden a los números de Reynolds basados en el diámetro hidráulico $Re_\phi = 1021, 2043, 3064, 4086, 5107$ y 6128. En el primer Re_ϕ se observó en los perfiles de velocidad que el flujo presentaba un perfil de tipo turbulento debido a que la distancia a la que se colocó el escalón es muy pequeña, comparada con la distancia necesaria para obtener flujo desarrollado a régimen laminar.

Los experimentos se realizaron en una zona localizada en la base del escalón a la cual se le llamo zona A y en una zona posterior localizada 120 mm de la base del escalón llamada zona B. La región total de visión del flujo corresponde a un área de 1600 pix x 1186 pix (22.77 mm x 16.89 mm). El flujo se analizó en las dos regiones mencionadas anteriormente para el caso del flujo hacia el frente del escalón (FFS) y flujo hacia atrás del escalón (BFS).

La técnica experimental que se empleó para la medición es velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV). Esta es una técnica óptica laser no intrusiva. El empleo de esta técnica permitió que se evaluaran los siguientes parámetros del flujo: campos de velocidad instantáneos y promedio, perfiles de velocidad, evaluación de la u_{rms} y v_{rms} para fluctuaciones de la velocidad, vorticidad, posición del centro del vórtice y tamaño del vortice.

Los campos de velocidad muestran para el caso FFS un único vórtice, mientras que para el caso BFS muestran un vórtice secundario y parte del vórtice primario. Las dimensiones de estos vórtices, así como la posición de su centro (x_e, y_e) se encontró que

varían con el Re_ϕ . Los perfiles de velocidad en la zona del escalón presentan velocidades negativas en ambos casos (FFS y BFS) lo cual indica recirculación del flujo.

Las u_{rms} y v_{rms} de las fluctuaciones de la velocidad en la zona B resultaron ser de magnitud similar para ambos casos de dirección del flujo analizados, para la zona A la u_{rms} resulto ser mayor para el caso BFS que el FFS, lo cual podría ser una indicación de que el caso BFS es más inestable que el caso FFS en la base del escalón.

La vorticidad promedio para la zona B es de magnitud similar en ambas direcciones del flujo analizadas, para la zona A la magnitud de la vorticidad es mayor en el caso FFS. Fue observado que cuando la vorticidad se incrementa, u_{rms} disminuye.

La posición del centro del vórtice para el caso FFS esta relacionada con el número de Re_ϕ . En el caso BFS no se encontró una tendencia específica pero si se observaron rangos de variación de la posición del centro a diferentes Re_ϕ . Para la capa de separación del vórtice primario-secundario del caso BFS se observaron valores crecientes en la coordenada horizontal al aumentar Re_ϕ .

Abstract

In this work an experimental study is presented. This study was carried out in the Labinthap, in a rectangular channel containing a step. This channel is 1400 mm length, 100 mm width, and 20 mm height; and it is built in cast acrylic with a wall thickness of 9 mm. The contained step is 700 mm length, 100 mm width and 10 mm height. This means its aspect ratio $w/h=10$. This aspect ratio value is the minimum value that allows a reduction of wall effects on the flow.

Reynolds number was calculated using step height as characteristic length (Re_h). In this work the following cases for Re_h were studied: 281, 562, 843, 1124, 1404 and 1685. For the same flow conditions a different Reynolds number calculation was performed using hydraulic diameter as characteristic length obtaining: $Re_\phi = 1021, 2043, 3064, 4086, 5107,$ and 6128. For the first value of Re_ϕ , it was observed that average velocity profiles were similar to turbulent profiles because the test area was placed at a distance from flow entrance that was not enough for fully developed laminar flow.

The experiments were performed at two different zones: zone A placed at step base, and zone B separated 120 mm from the step base. The test area is 1600 x 1186 pix (22.77 x 16.89 mm) both, Forward facing step (FFS) and Backward facing step (BFS) flows were analyzed in both zones.

For the FFS case, only a vortex appeared. Meanwhile, for the BFS case two vortices appeared: a main vortex and a secondary one. It was found that the vortex dimensions and core position change with Re_ϕ . Velocity profiles at the step zone show negative velocities in both cases (FFS and BFS) which illustrates flow recirculation.

u_{rms} and v_{rms} at zone B turned out to be of similar magnitude for both cases. On the other hand, at zone A u_{rms} for BFS is larger than u_{rms} for FFS, which could be a sign of instability for that case.

Average vorticity at zone B is similar in both cases. However, at zone A FFS average vorticity is larger. It was observed that when vorticity increases, u_{rms} decreases.

Vortex core position for the FFS case is directly related to Re_ϕ . For the BFS case no tendency was found, but variation ranges for vortex core position were observed for different Re_ϕ .

For the interface layer observed between main and secondary vortices in the BFS case, horizontal position changes as Re_ϕ increases

Introducción

La separación del flujo es frecuentemente encontrada en un largo número de aplicaciones prácticas de la ingeniería, ocurre en lugares de repentinos cambios de la geometría, una capa de separación se desarrolla en la discontinuidad de la superficie y se readhiere alguna distancia más abajo si la superficie de la geometría lo permite, formando una zona de recirculación, estas estructuras del flujo tienen un efecto importante en el diseño de muchos productos de ingeniería, debido a esto muchos experimentos han sido llevados a cabo para su estudio, sin comprender en su totalidad el comportamiento del fenómeno.

Una geometría bastante conocida de la separación del flujo es el flujo sobre un escalón; ésta es de bastante interés debido a la simplicidad de la misma y al gran número de aplicaciones que de ella se pueden derivar. Así mismo, los resultados experimentales obtenidos permiten a los investigadores que se dedican a desarrollar estudios numéricos tener una base de datos para validar sus códigos. En base a la información presentada anteriormente, se plantea en este trabajo un estudio experimental sobre un escalón para flujo hacia el frente (FFS) y flujo hacia atrás (BFS) a diferentes números de Reynolds (Re) en la zona donde existe recirculación de flujo (base del escalón) y en una zona alejada del escalón, con la finalidad de evaluar el comportamiento del flujo turbulento en las zonas mencionadas y poder comparar los parámetros del flujo: campos de velocidad instantáneos, campos de velocidad promedio, evaluación de la rms para fluctuación de la velocidad, vorticidad, posición del centro del vórtice y tamaños del vórtice, de cada caso. La técnica experimental que se emplea es Velocimetría Mediante Imágenes de Partículas (PIV). Este trabajo de tesis se desarrolla en 4 capítulos:

En el primer capítulo se realiza una síntesis de los trabajos realizados por otros investigadores en el área de análisis del flujo sobre un escalón, en éste se resalta el trabajo hecho por cada investigador; así como los resultados más relevantes obtenidos y las dimensiones de la sección de pruebas utilizadas en su trabajo.

En el capítulo dos se da una descripción del funcionamiento básico de la técnica experimental de medición velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV). Principios de operación del sistema, componentes del sistema, algoritmos de operación para procesamiento de imágenes y calibración del sistema.

En el capítulo tres se hace mención del procedimiento a través del cual se llevó a cabo la experimentación en este trabajo; así como, una descripción del equipo utilizado, y del funcionamiento del sistema PIV utilizado.

El capítulo cuatro reporta los resultados obtenidos: campos de velocidad instantáneos y promedio, perfiles de velocidad, perfil de las rms, vorticidad y posición del centro del vórtice para Flujo Hacia el Frente (FFS) y Flujo Hacia Atrás (BFS) del escalón.

Conclusiones, en ellas se describe el análisis de los resultados obtenidos y las observaciones realizadas en el desarrollo de la tesis.

Referencias.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

En el primer capítulo se realiza una síntesis de los trabajos realizados por otros investigadores en el área de análisis del flujo sobre un escalón, en éste se resalta el trabajo hecho por cada investigador; así como los resultados más relevantes obtenidos y las dimensiones de la sección de pruebas utilizadas en su trabajo.

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1 Flujo sobre un escalón

La separación y readherencia del flujo es un fenómeno que se encuentra en muchas aplicaciones prácticas de la ingeniería tales como flujo en difusores, flujo en cámaras de combustión, turbomaquinaria, flujo alrededor de perfiles, flujo en cámaras de mezclado, flujo en válvulas, en medicina. A pesar de la amplia gama de estudios acerca de estos fenómenos, no se tienen aún un consenso sobre los aspectos hidrodinámicos y térmicos relacionados con ellos.

Por todo lo anterior, el flujo sobre un escalón ha recibido una atención considerable, a pesar de que es una de las geometrías más simples que existen en las investigaciones de fluidos. La información hidrodinámica y térmica que de éste se obtienen provee datos para modelos de turbulencia y validación de códigos numéricos; por otro lado, la configuración de flujo sobre un escalón hacia adelante (FFS) ha sido menos estudiada que la de flujo sobre un escalón hacia atrás (BFS). Entre los trabajos reportados en la literatura se encuentran estudios realizados con diferentes técnicas experimentales: tubo de Pitot, anemometría de hilo caliente (HWA), anemometría de laser Doppler (LDV) y velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV).

Considerando el flujo principal, el BFS se puede dividir en distintas regiones de flujo en el plano de la sección transversal. Las fronteras del sistema se pueden definir por los perfiles de velocidad de entrada y salida, y las variables correspondientes a la geometría del escalón (H, h, l, w) como se muestra en la fig. 1.1.

La capa límite en la región cercana al borde del escalón se separa de éste y evoluciona en una capa límite de espesor mayor con forma curvada hacia abajo. Ésta contiene las estructuras principales de flujo del BFS. En la parte baja, la capa de separación se readhiere a la pared inferior, dividiéndose en porciones de flujo superior e inferior. La porción inferior es influenciada por la pared y eventualmente vuelve a

ser una capa de flujo completamente desarrollada. La porción superior se mueve hacia el escalón transfiriendo masa y momento al vórtice de recirculación primario lo cual lo ayuda a mantener su rotación. La capa de separación transfiere masa y momento adicional al vórtice primario a través de la viscosidad, mezclado turbulento y la transferencia de masa. La baja presión creada por el vórtice primario es la responsable por la curvatura hacia abajo de la capa de separación. La estructura final del BFS es el vórtice secundario, la porción baja del vórtice primario viaja hacia la parte superior de la esquina del escalón, el flujo no se dirige completamente hacia la esquina del escalón, debido a su propia inercia presenta un cambio rápido en su dirección, este fluido recibe masa y momento del vórtice primario causando que el mismo gire en sentido contrario del vórtice primario dando origen al vórtice secundario.

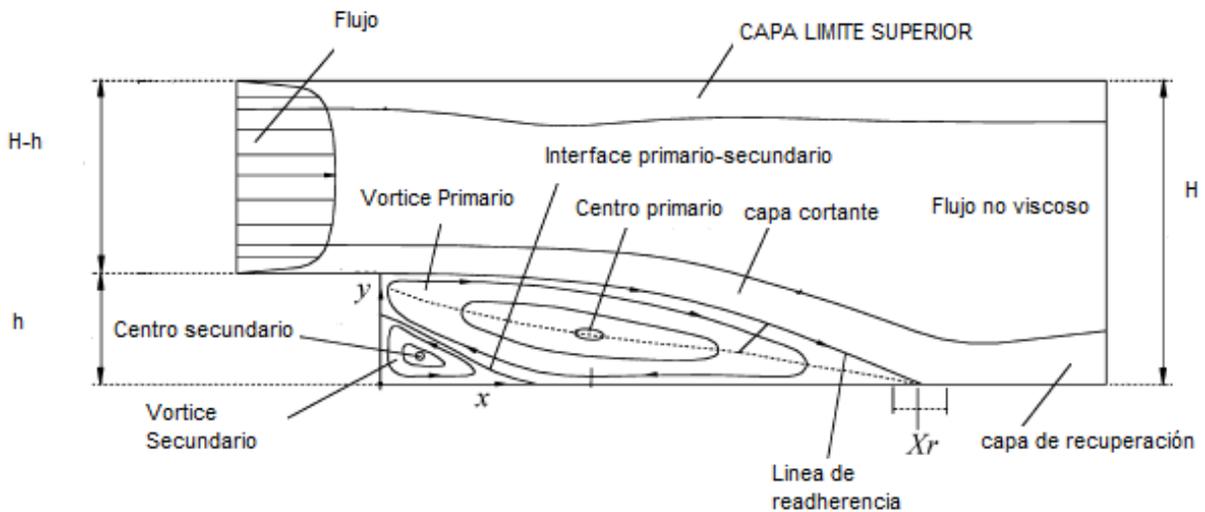


Fig. 1.1 Flujo sobre un escalón atrás [9]

Por otra parte, el escalón hacia adelante corresponde a un caso bidimensional de una contracción abrupta como la que se muestra en la fig. 1.2. En la mayoría de los experimentos, el flujo antes de la base del escalón se encuentra totalmente desarrollado (perfil de velocidad de flujo laminar o turbulento).

Existen fluctuaciones conforme el flujo se acerca al escalón y alrededor del mismo, después de una cierta distancia aguas abajo del escalón el perfil de velocidad vuelve a ser parabólico para el caso de flujo laminar.

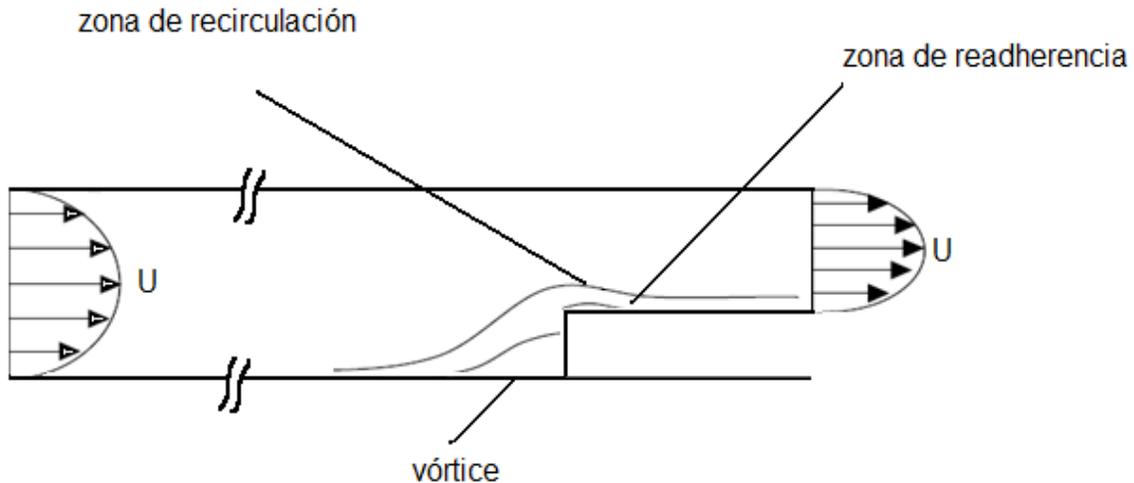


Fig. 1.2 flujo sobre un escalón hacia el frente

Estudios experimentales demuestran que el flujo sobre un FFS está compuesto de tres regiones principales una zona de recirculación antes de la parte frontal del escalón, una región conocida como burbuja en la parte superior del escalón y un punto de readherencia aguas abajo del escalón, Para un flujo bidimensional la región de recirculación es cerrada como se muestra en la fig. 1.3 ninguna partícula entra o deja la zona de recirculación, la longitud de esta zona es una función del número de Reynolds.

Posterior a la zona de recirculación el flujo continúa hacia arriba en donde se readhiere a la pared un pequeño porcentaje del mismo, continuando hasta que el perfil de velocidad se vuelve a desarrollar totalmente; la posición del punto de separación y readherencia están determinados por la geometría del escalón (inclinado, modificado en el borde).

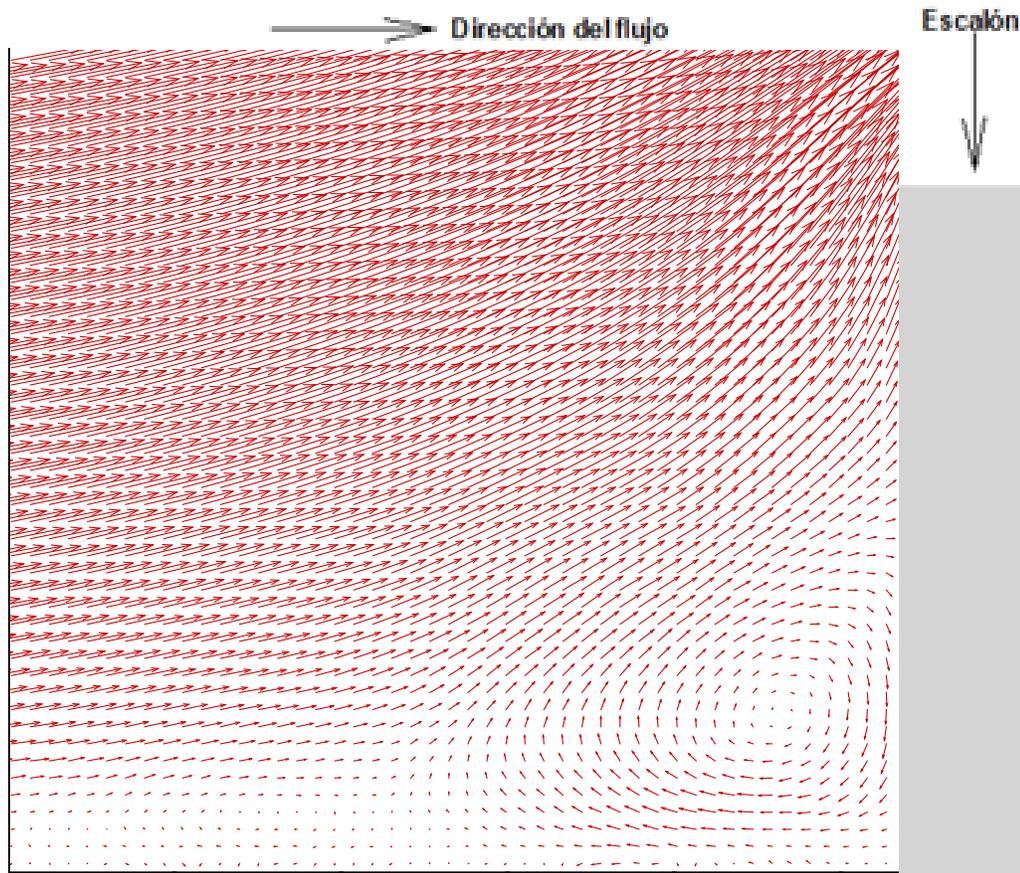


Fig. 1.3 Zona de recirculación bidimensional

1.2 Métodos de control de la separación y readherencia del flujo

El control de la separación y readherencia del flujo es un tema de suma importancia en la ingeniería pues se encuentra involucrado en toda una gama de fenómenos dentro de la industria desde los más simples hasta algunos de elevada complejidad [1, 2, 3, 4, 5]. A continuación se muestra una síntesis de los métodos y formas que distintos investigadores han desarrollado para el estudio de la separación y readherencia del flujo, tomando como parámetro base el flujo sobre un escalón.

En su estudio en un escalón J. Tihon et al. [1] utilizaron la técnica de electrodifusión, en la cual mediante el uso de un electrodo dividido en tres secciones de prueba, se puede estudiar las zonas de readherencia y recirculación del flujo. El canal experimental utilizado tiene las siguientes dimensiones: 220 mm de espesor, 70 mm de altura, 1.6 m de longitud con un escalón de plexiglás de 20 mm de altura con

una relación de aspecto (AR) de 11. Tihon da una descripción detallada de las zonas de recirculación detectadas, de la posición del punto de readherencia; así mismo encontró que la intensidad de las fluctuaciones de velocidad en la dirección del flujo principal en la región cercana a la pared son del mismo orden de magnitud que la de la velocidad local.

C. Schram et al. [2] analizaron la estructura de los vórtices en un escalón mediante el uso de la técnica láser Velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV). En este trabajo se desarrolla la caracterización de este flujo en términos de estructuras vorticales instantáneas para lo cual desarrolla un algoritmo de detección de vórtices; con esto realiza una base de datos para encontrar una función de probabilidad de la regiones donde se pueden encontrar vórtices. Las dimensiones del canal experimental utilizado en este trabajo son: 200 mm de espesor, 100 mm de altura, 1 m de longitud con un escalón de 20 mm de altura y una longitud del escalón de 765 mm

En su trabajo experimental N. Furiuchi et al. [3] consideraron la variación de la componente de velocidad del campo de flujo en la dirección de la envergadura del escalón utilizando un ecógrafo ultrasónico de pulsos (uvp). La velocidad medida muestra una alternación del flujo entre valores positivos y negativos cerca de la pared, la intensidad de la turbulencia es mayor en el centro cerca de la pared en la zona de readherencia, el campo de flujo encontrado (en función del ancho del canal z (spanwise)) sugiere que existe una estructura no estacionaria tridimensional. Las dimensiones del canal experimental utilizado en este trabajo son: un espesor de 240 mm, altura de 60 mm, longitud de 2300 mm con un canal de 20 mm de altura con una relación de aspecto de 12.

La forma que presenta el borde de un escalón influye en la estructura que presenta el flujo en el mismo como lo demuestran Y. X. Wang y M. Gaster [4] en su trabajo experimental. La presencia de un escalón con borde afilado en una placa plana lisa apresura la transición de la capa límite de laminar a turbulenta. La posición de transición aumenta en dirección hacia el escalón con un incremento en

la altura del mismo o un incremento en la velocidad del flujo libre. Los movimientos de transición son más fuertes en un escalón hacia el frente que en un escalón hacia atrás a las mismas condiciones de altura y de velocidad. Las dimensiones del canal experimental son: longitud de 1300 mm de longitud, una longitud del escalón de 300 mm y una altura del escalón de 1 mm.

Conocer la estructura que presenta el flujo dentro de un escalón es de suma importancia; ya que de esta forma se puede tener un mayor conocimiento y mejor control del fenómeno de separación y readherencia como lo demuestran J. Kostas et al. [5] en su trabajo. La técnica utilizada denominada análisis de descomposición ortogonal de datos del PIV ayuda en la identificación de las estructuras de flujo de los vórtices que se presentan en un escalón. Los resultados sugieren que es preferible un análisis de descomposición ortogonal de un plano de campo de vorticidad que un análisis bidimensional de un campo de velocidad. Las dimensiones del canal de este trabajo son: una longitud de canal de 1m, 500 mm de espesor, 500 mm de altura con un canal de altura de 8 mm dando una relación de aspecto de 62 y una relación de expansión de 1.02.

Un trabajo interesante es el llevado a cabo por Ruck y Makiola [6]. En este trabajo experimental se desarrolla una investigación referida al efecto de la inclinación del ángulo de la pared del escalón sobre la longitud de readherencia del flujo, utilizando un rango de variación de ángulos de 90° - 15° . En este trabajo experimental se empleo una relación de expansión (ER) de 3.27 y diferentes números de Re; para cada condición de flujo se vario el ángulo de inclinación (α), con lo que se logro una disminución de la longitud de readherencia. Los cambios en la longitud de readherencia en el rango de 90° a 45° no son significativos; ocurre lo contrario por debajo de los 45° , en donde la longitud de readherencia es acortada rápidamente por la inclinación de α . Esto indica que la propagación de la capa libre cortante (free shear layer) es amortiguada por pequeños ángulos en el escalón debido a la cercanía de la pared. Las dimensiones del canal utilizado están reportadas en función de la altura H

del escalón y son: posición del escalón $100 H$ de la entrada, relación de aspecto de 2, altura igual a $2 H$, espesor de $40 H$.

M. Pirto et al. [7] realizan un estudio experimental para evaluar la energía turbulenta producida en un escalón utilizando la técnica PIV. Los parámetros reportados en su estudio son: la energía turbulenta, ecuaciones de transporte de turbulencia para convección, turbulencia del transporte, producción de turbulencia, difusión viscosa, disipación viscosa y esfuerzos de Reynolds. Este estudio se lleva a cabo en la capa cortante de separación que se forma en el escalón, los resultados indican que el nivel de la intensidad de la turbulencia es mayor en los datos experimentales obtenidos en este trabajo que en los presentados a partir de emplear la herramienta computacional simulación numérica directa (DNS). Las dimensiones del canal son: altura del escalón $h = 10 \text{ mm}$, relación de expansión $ER = 1.5$, la longitud del canal es $90 h$, la posición del canal es $45 h$ y $45 h$ hacia la salida, el espesor del canal es $4 h$ y una relación de aspecto de 4.

En su trabajo experimental S.D. Hall et al. [8] estudian el vórtice secundario generado dentro de un escalón como resultado del paso del flujo. El motivo de enfocarse en esta estructura del flujo es debido a la pobre representación en la literatura del mismo y por el alto potencial que este vórtice puede aportar para evaluar modelos de turbulencia. Los resultados obtenidos muestran que el vórtice secundario es irregular, turbulento y contiene flujo reversible. Además se menciona que esta estructura es altamente tridimensional lo cual indica que las líneas de corriente en un flujo tridimensional se representarían como espirales. Este vórtice presenta puntos de separación y readherencia bien definidos pero un centro del vórtice que varía en el tiempo. El canal para este trabajo experimental consta de 600 mm de longitud, $ER = 1.5$, una altura del escalón $h = 46.66 \text{ mm}$ y una longitud del mismo de 100 mm , con una $AR = 5$.

En su trabajo experimental Noriyuki et al. [9] analizan la estructura de la separación y readherencia del flujo usando una correlación espacio-tiempo, logrando obtener dos campos de velocidad espacio-tiempo en las regiones de separación y

recirculación del flujo utilizando la técnica LDV. Los resultados reportados indican que la velocidad en el vórtice es la mitad que la velocidad en el flujo principal además de que el centro del mismo varía con el tiempo, también se menciona que la intensidad de turbulencia es mayor en la zona de la capa cortante. Las dimensiones de este canal son 2300 mm de longitud, 240 mm de espesor, 60 mm de altura con un escalón de $h = 20$ mm de altura, una $ER = 1.5$ y una $AR = 12$.

En investigaciones realizadas por Lai et al. [10] para controlar la separación y readherencia del flujo se utiliza un perfil oscilador en el escalón dentro de la región de recirculación, los resultados indican que el perfil disminuye la distancia de readherencia del flujo si se encuentra en la zona de separación, concluyendo que la posición más efectiva para el perfil es lo más cercana posible al escalón y a la pared. Las dimensiones del montaje experimental son: altura del escalón $h = 30$ mm, espesor de 380 mm dando una $AR = 12.33$, el canal tiene una longitud de 1610 mm, una altura de 272 mm.

Además de trabajos experimentales llevados a cabo por distintos autores, también se han llevado a cabo investigaciones numéricas en un escalón, Jung Yul Yoo et al. [11]. Utilizan en su trabajo numérico un modelo de esfuerzo de Reynolds modificado los resultados son comparados contra el modelo $\mathcal{K} - \varepsilon$ estándar encontrando que el método utilizado brinda mejores resultados de la longitud de readherencia del flujo que el método $\mathcal{K} - \varepsilon$ y también demuestran que la intensidad de la turbulencia calculada con el método modificado es más cercana a los datos obtenidos experimentalmente que la intensidad de turbulencia obtenida con el método $\mathcal{K} - \varepsilon$ estándar.

La separación y readherencia del flujo también se presenta en un escalón hacia el frente conocido por sus siglas en inglés como FFS (forward facing step).

Marino y Luchini [12] desarrollan una investigación numérica acerca de la separación y readherencia del flujo sobre un escalón hacia el frente. La investigación se centra en la inestabilidad lineal del flujo. La respuesta del flujo a perturbaciones

externas y modificaciones en la entrada se calcula empleando una matriz adjunta (adjoint analysis). Los resultados indican que la distribución espacial de los valores característicos (eigen values) son fuertemente influenciados por el tamaño de las burbujas de recirculación y conforme se incrementa el número de Reynolds la burbuja localizada después del escalón viene a ser mas grande. En proximidad al Reynolds crítico la burbuja antes del escalón es la principal causante de la inestabilidad del flujo. Las perturbaciones entrantes influyen fuertemente en el comportamiento de las burbujas de recirculación. Por otro lado la sensibilidad de los valores característicos para encontrar perturbaciones estructurales depende del número de Reynolds.

Una aplicación del estudio del flujo sobre un escalón la realizan G. alosio et al. [13]. El enfoque es el estudio del campo de velocidad y la fluctuación de la presión sobre la pared por la presencia de capas límites bidimensionales incompresibles sobre un escalón. Para correlacionar las estructuras del flujo (capas límites) al campo de presión inducido en la pared medidas tomadas del analizador en tiempo PIV son acopladas con medidas de los niveles de la presión del sonido en la pared.

Distintas formas de estudiar el fenómeno de separación y readherencia de flujo sobre un escalón han sido desarrolladas como lo demuestran J. F. Largeau et al. [14] en su trabajo experimental en el cual el interés se centra en medir la fluctuación de la presión sobre la pared en el escalón y los campos de velocidad para llevar a cabo esto, tomas de presión fueron colocadas en dirección del flujo y en la dirección de el ancho de el escalón. Los resultados indican un comportamiento del flujo dependiente de la relación de aspecto a altos números de Reynolds. Las correlaciones espacio tiempo entre la presión en la pared y los campos de velocidad son resaltados en este trabajo. Los resultados indican que altos niveles de correlación se presentan en la burbuja de recirculación superior principalmente en la capa de separación y extendiéndose hacia el punto de readherencia. Además los resultados indican que la frecuencia del movimiento en la separación es importante en la organización del flujo en el punto de readherencia. Las dimensiones del canal son: 2.35 m de longitud,

sección transversal de $5 \times 6 \text{ m}^2$, con tres escalones de diferente altura h , $h=30, 40$ y 50 mm

En su trabajo realizado Wilhelm y Kleiser [15] estudian un flujo laminar bidimensional en un escalón empleando un método computacional (métodos espectrales). Los resultados reportados indican que la longitud y altura de la zona de recirculación enfrente del escalón son casi constantes para flujos de baja velocidad $Re < 0.1$ y se incrementa proporcional a $Re^{0.6}$ y $Re^{0.2}$ respectivamente (L_r y h_r) para altos números de Reynolds.

C. Hahn et al. [16] presentan en su trabajo experimental un estudio acerca del efecto en el flujo por el ruido provocado en un escalón. El sonido generado está en la frecuencia de banda ancha en el rango de 2 a 10 kHz a un Reynolds de 24,000. Los resultados muestran que sólo en la región cerrada antes y alrededor del borde modificado del escalón se puede encontrar una conexión entre la distribución de la velocidad y la presión local en la pared al campo de presión del sonido esta región contiene una estructura bidimensional de vórtice sumamente larga. Las dimensiones del canal son: 1m de longitud, espesor de .66 m, un escalón de 12 mm de altura con una longitud de 63 mm el cual es colocado a 37 mm de la entrada del flujo.

Las investigaciones anteriores reportan principalmente diferentes métodos para controlar la separación y readherencia del flujo, así como la forma en que es afectada la zona de recirculación del flujo debido a los mismos, en este trabajo la atención es centrada en la zona donde existe recirculación del flujo, con la finalidad de poder comparar el comportamiento del flujo turbulento en ambas direcciones (FFS y BFS) a diferentes números de Reynolds y poder definir que parámetros (vorticidad, rms, tamaño del vórtice) gobiernan el comportamiento del mismo en cada caso.

Capítulo 2

Velocimetría Mediante Imágenes de Partículas

En el capítulo dos se da una descripción del funcionamiento básico de la técnica experimental de medición velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV): Principios de operación del sistema, componentes del sistema, algoritmos de operación para procesamiento de imágenes y calibración del sistema.

CAPÍTULO 2 Velocimetría Mediante Imágenes de Partículas

2.1 Principios de operación

La velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV) es una técnica experimental que ha evolucionado significativamente en las últimas tres décadas. En un inicio su desarrollo se vio limitado por el estado de la tecnología; por ejemplo, los primeros estudios se desarrollaron a partir de fotografías tradicionales, en las cuales se capturaban en la misma fotografía a las partículas en dos tiempos diferentes. Para el análisis de estas se empleaban algoritmos de autocorrelación que provocaban errores en la dirección de los vectores.

En la década de los 90 el desarrollo de la tecnología digital provocó un avance significativo en el desarrollo de los sistemas de PIV. En este caso era posible capturar información en un formato digital y de manera independiente la imagen en el tiempo inicial y en el final; esto permitió la aplicación de nuevos algoritmos para la evaluación de los desplazamientos de las partículas y ocasionó el desuso de los algoritmos de autocorrelación.

La técnica laser PIV es una técnica óptica de medición no intrusiva que es empleada en investigación y optimización de procesos que involucran el flujo de fluidos; ya sea en régimen laminar o turbulento. Entre las aplicaciones que se tienen se encuentran: estudios de capa límite, procesos de atomización, mezclado etc.

Para realizar un experimento, empleando la técnica PIV se debe proceder a agregar en el fluido una serie de partículas trazadoras, las cuales deben seguir el movimiento real del fluido; para de esta forma y de manera indirecta se obtenga la velocidad instantánea del fluido en base a los desplazamientos direccionales de las partículas (entre imagen 1 e imagen 2) y el tiempo entre ambas imágenes. El fluido y el recipiente que los contenga (en caso de estar confinado), deben ser transparentes para que las partículas puedan ser visibles.

La forma básica de operación de esta técnica requiere que la región en la que se desea conocer el campo de velocidades sea iluminada por una luz láser (debido al tamaño de las partículas); en el mismo instante (sincronización) en que el laser dispara una cámara digital debe capturar la imagen de la luz reflejada por las partículas. Ambos deben ser colocados perpendicularmente uno con respecto al otro.

El tiempo entre dos pulsos de luz dependerá de la velocidad media del flujo. La cámara y la fuente de luz son sincronizadas por medio de una computadora (unidad de sincronización, HUB). Cuando el fluido es iluminado, la luz dispersada por las partículas que atraviesan el plano de luz, es capturada por la cámara en una imagen o en una secuencia de imágenes que son almacenadas en la computadora. Las imágenes generadas son la representación bidimensional del volumen formado por la región del fluido iluminada por el plano laser. El grosor de este plano es menor a un milímetro. Para poder determinar la velocidad es necesario contar con las imágenes de al menos dos exposiciones de las partículas. En la figura 2.1 se ilustra de manera grafica el funcionamiento básico de la técnica láser PIV.

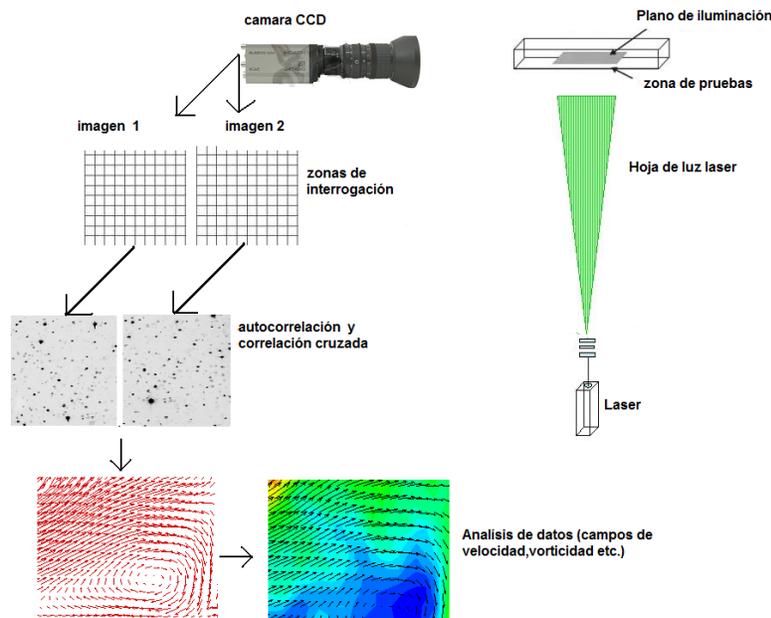


Fig. 2.1 Sistema PIV

En la primera etapa del cálculo de la velocidad instantánea se necesita conocer el desplazamiento de las partículas en la dirección-x (Δx) y en la dirección -y (Δy) (2-D). Para lograr esto dos imágenes consecutivas se dividen en varias regiones conocidas como ventanas de interrogación (ver figura 2.2). El análisis toma lugar en cada una de ellas y trata de identificar mediante un algoritmo de correlación los desplazamientos de los grupos de partículas que se encuentran en cada ventana de interrogación de un tiempo t_0 a un tiempo t_1 . Una vez que se conocen ambos desplazamientos se aplican las siguientes ecuaciones en cada ventana de interrogación:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad 2.1$$

$$v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad 2.2$$

En las ecuaciones anteriores, Δt se conoce como el tiempo PIV. Éstas corresponden a las velocidades instantáneas en la dirección -x, u y en la dirección -y, v.

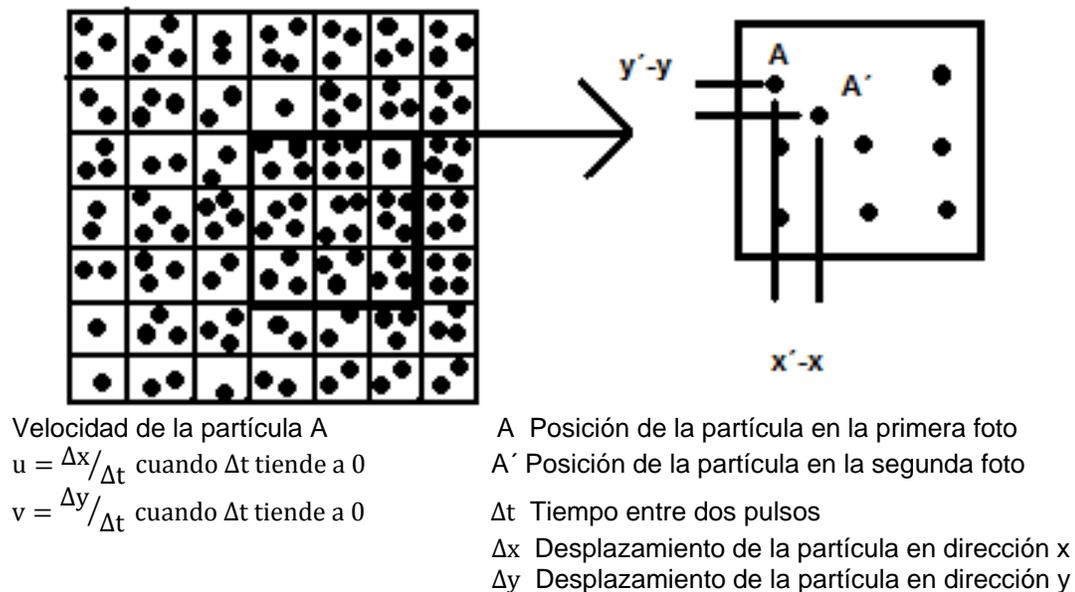


Fig. 2.2 Principio de funcionamiento del sistema PIV

Los algoritmos que se presentan en los equipos comerciales de PIV dividen el plano estudiado en cientos de ventanas de interrogación (Fig. 2.3). Mediante la aplicación de técnicas estadísticas de correlación cruzada se determinan las velocidades para cada una de las regiones de interrogación formando al menos un campo de velocidades característico del flujo que se esté analizando. La mayoría de los software comerciales tienen la opción de mostrar estos campos directamente en la pantalla de la computadora sin embargo para la mayoría de los análisis del flujo turbulento los datos tienen que ser exportados y analizados con software construidos por el usuario.

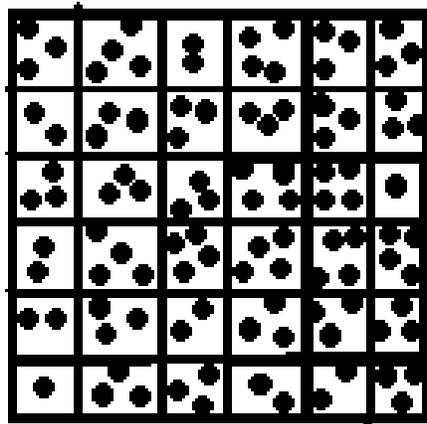


Fig. 2.3 plano dividido en 36 regiones de interrogación

Principales características de la técnica PIV

El PIV permite obtener campos de velocidad instantáneos en dos dimensiones y en el caso de los equipos actuales en tres dimensiones. Es una técnica considerada como no intrusiva debido a que las partículas trazadoras que se emplean para determinar la velocidad no perturban el flujo. Para lograr una correcta medición se debe de buscar que las partículas se distribuyan homogéneamente en el fluido; con el objetivo de no tener ventanas de interrogación vacías [18].

2.2 Componentes del sistema.

Partículas trazadoras

Las partículas empleadas en PIV deben ser capaces de seguir las líneas de trayectoria del fluido sin retraso excesivo, y reflejar la suficiente luz del láser para ser capturadas adecuadamente por la cámara. Lo ideal es encontrar partículas que al ser insertadas en el fluido sigan el movimiento del fluido de forma exacta, sin modificar el flujo, ni interactuar entre ellas. Sin embargo es difícil satisfacer estas condiciones y en la práctica se utilizan aquellas que simplemente siguen el flujo sin perturbarlo demasiado. Las partículas y el fluido deben tener aproximadamente la misma densidad, para que al insertar las partículas estas permanezcan suspendidas en el fluido. Si las densidades de la partículas y del fluido son diferentes, las partículas flotarían o se hundirían y no seguirían apropiadamente el movimiento del fluido.

También es necesario que las partículas dispersen bien la luz del láser, pues de lo contrario estas no serían captadas apropiadamente por la cámara. La luz dispersada por las partículas está en función de su índice de refracción y del índice del fluido que las rodea, así como del tamaño y forma de las partículas. La luz dispersada también depende del ángulo de observación el cual generalmente es a 90° de la luz incidente, por ser una de las posiciones con mayor dispersión de la luz.

Partículas muy pequeñas deben ser usadas en flujos de alta velocidad. Las partículas de carburo de silicio (diámetro medio $1.5 \mu\text{m}$) son adecuadas tanto para el estudio de flujos líquidos como gaseosos, las partículas de dióxido de titanio (diámetro $0.2 \mu\text{m}$) por lo general son usadas para el flujo de gases y son adecuadas para aplicaciones de altas temperaturas, y las partículas de poliéster (diámetro $1.0 \mu\text{m}$) son adecuadas para aplicaciones de bajas temperaturas. Si se requieren estudiar varios tipos de flujos sean estos de gases o de agua existen varios tipos de partículas que varían en distintos diámetros y materiales como es mostrado en las tablas 2.1 y 2.2

Tabla 2.1 Tipos de partículas sembradas para flujos líquidos.

Tipo	Material	Diámetro medio en μm
Sólido	Poliéster	10-100
	Aluminio	2-7
	Esferas de vidrio	10-100
	Gránulos con forrajes sintéticos	10-500
Líquido	Diferentes aceites	50-500
Gaseoso	Burbujas de oxígeno	50-1000

Tabla 2.2 Tipos de partículas sembradas para flujos gaseosos

Tipo	Material	Diámetro medio en μm
Sólido	Poliéster	0.5 - 10
	Aluminio	2 - 7
	Magnesio	2 - 5
	Micro esferas de vidrio	30 - 100
	Gránulos con forros sintéticos	
	Diocil ftalato (material plastificante)	1 - 10
Humo		< 1
Líquido	Diferentes aceites	0.5 - 10

Fuente de luz

La técnica PIV requiere la generación de un plano de luz con características bien definidas de área, grosor, color e intensidad. Los rayos laser son muy utilizados en la técnica de PIV por la elevada potencia que pueden emitir en periodos de tiempo muy cortos (del orden de nanosegundos). El plano producido se hace incidir sobre un fluido para iluminar uniformemente la región de interés.

En algunos láseres el arreglo óptico es interno y viene encapsulado en un cilindro metálico en un extremo del dispositivo ver figura 2.4



Fig. 2.4 Arreglo óptico integrado para producir la hoja de luz

El láser emitido por pulsos es sincronizado, usualmente por medio de una computadora u otro dispositivo de hardware, con la cámara de modo que el obturador de la cámara sólo permanezca abierto por un intervalo de tiempo muy corto, mientras se tenga iluminada la región de interés del fluido. Así la cámara sólo capturará la posición de las partículas en un instante, transfiriendo esta información a la computadora por medio de una interface (software flowmanager) donde se llevara a cabo el algoritmo de correlación para procesar la misma.

El tipo de láser más utilizado en PIV es el Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet) de estado sólido para la obtención de hojas de luz.

Dispositivo sincronizador del láser

Los pulsos entre cada imagen tienen la secuencia tal que el primer pulso de luz láser ocurre inmediatamente antes de que la información se termine de transferir, mientras que el segundo pulso ocurre inmediatamente después de que la transferencia de la imagen ocurra. A este tipo de secuencia de pulsaciones se le conoce igual como ajuste por tiempo entre imágenes y es ilustrada mediante la figura 2.5. Actualmente, los dispositivos láseres cuentan con un complemento electrónico acoplado al sistema láser y a la cámara de carga acoplada (CCD) que permite el control automático del tiempo entre los 2 pulsos de luz láser por separado y las fotografías tomadas mediante la cámara [17].

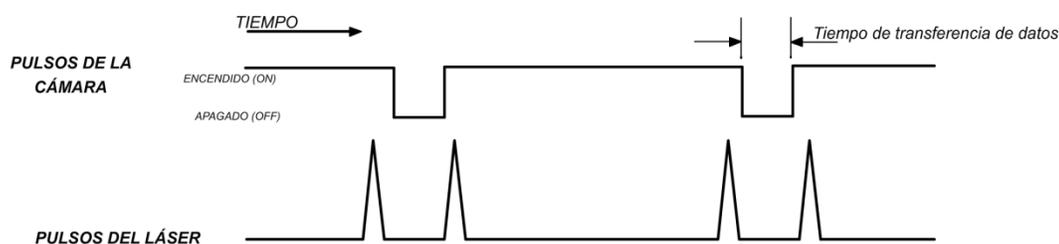


Fig. 2.5 Sincronización del láser con la cámara CCD

Cámara de carga acoplada CCD

En general las cámaras de carga acopladas se caracterizan por poseer un sensor que es capaz de convertir la luz, que es formada de fotones emitidos, en carga eléctrica (por ejemplo electrones). Cuando se habla de una cámara fotográfica CCD, en realidad nos referimos a un componente especial de estos aparatos que consiste en un arreglo de varios sensores CCD ordenados en forma de línea, o en forma rectangular o en cualquier otra disposición dependiendo de la compañía manufacturera. A cada uno de los elementos individuales que conforman un sensor CCD se les llama píxeles, y consisten en un elemento muy pequeño de imagen. Su tamaño es generalmente del orden de $10 \times 10 \mu m^2$, o de 100 píxeles por milímetro.

Análisis de datos

Las investigaciones que emplean la técnica PIV usualmente dan como resultado un gran número de imágenes las cuales deberán de ser procesadas. Si nos basamos en las cantidades estadísticas, la cantidad de datos adquiridos puede ser del tamaño de varios Gigabytes, lo que presenta la necesidad de un procesamiento posterior automático y confiable y poderoso [17]. El post procesamiento de los datos adquiridos por el PIV se puede caracterizar mediante la siguiente secuencia.

- Validación de los datos inicialmente adquiridos: Después de una evaluación automática de los datos adquiridos por el PIV, un cierto número de vectores de velocidad inminentemente incorrectos pueden ser fácilmente detectados en mediante una inspección visual. Para detectar estos valores incorrectos del campo de flujo, los datos tienen que ser posteriormente validados mediante algoritmos automatizados especialmente desarrollados.
- Reemplazo de datos incorrectos: La mayoría de los algoritmos post procesadores trabajan con datos que representan un campo de flujo completo. Estos algoritmos no trabajarán si se encuentran agujeros (ceros) en los datos experimentales obtenidos, lo que hace indispensable un algoritmo que se encarga de llenar los vacíos de los datos experimentales y que usualmente funciona realizando interpolaciones entre valores extremos.
- Reducción de datos: Es un tanto difícil el analizar cientos de mapas de vectores de velocidad y describir sus características mecánicas. Usualmente técnicas como el promediado (que se usa para extraer la información acerca del flujo y sus fluctuaciones), muestreos condicionados (de manera que se logre distinguir entre características periódicas y no periódicas del flujo), y operadores del campo vectorial (estimaciones de la vorticidad, divergencia de manera que se pueda determinar las estructuras del flujo) son aplicadas para reducir el tiempo de procesamiento y la cantidad de datos manejados.

- **Presentación de la información:** los paquetes de software comercialmente disponibles (flowmanager) permiten presentar los datos adquiridos en forma gráfica. Esto se realiza mediante la impresión de campos de velocidad, de perfiles de velocidad, gráficas de contorno, gráficas de vorticidad etcétera.
- **Análisis de la información:** Hasta ahora, es la tarea de mayor dificultad del usuario del PIV. Siendo el PIV la primera técnica en ofrecer información del campo vectorial de velocidades instantáneo de un flujo, proporciona nuevas pistas en la resolución de problemas clásicos y modernos de la mecánica de fluidos. Para eso nuevas herramientas matemáticas experimentales se han desarrollado o adaptado para permitir una mejor comprensión del fenómeno rector del comportamiento del flujo.

2.3 Algoritmos de Correlación

El método de evaluación para PIV mas usado es la correlación cruzada de las imágenes. En el procesamiento de imágenes, la correlación cruzada es utilizada para encontrar la posición de mayor semejanza entre dos imágenes. Para la evaluación con correlación cruzada, las imágenes de PIV son divididas en pequeñas áreas rectangulares llamadas “zonas de interrogación”. Una zona de interrogación es una región de una imagen f , es decir es una subimagen de f . Se asume que todas las partículas que están dentro de una de estas zonas, se mueven de manera uniforme. El algoritmo consiste en procesar dos zonas de interrogación del mismo tamaño y con las mismas coordenadas dentro de la imagen [17, 18, 20]. Una zona es de la primera imagen y la otra de la segunda imagen como se muestra en la figura 2.6.

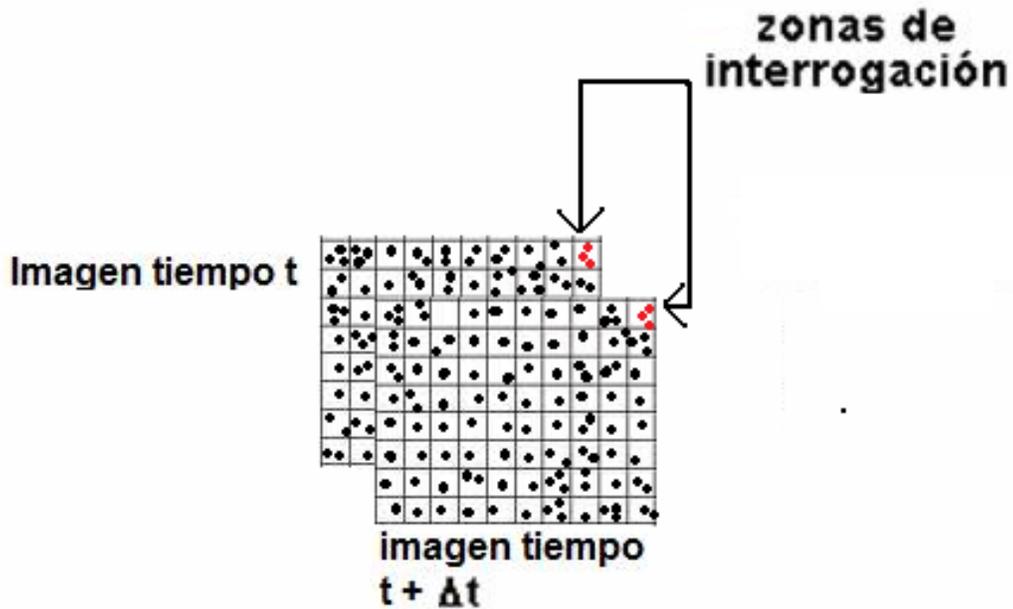


Figura 2.6 Dos imágenes de PIV divididas en zonas de interrogación

Una vez capturadas las imágenes, un programa computacional aplica la correlación cruzada $c(s)$ de los patrones de intensidad $I_1(X)$ y de $I_2(X)$ del área de interrogación.

$$C(S) = \int_{\text{punto}} I_1(X)I_2(X+S)dX \quad 2.3$$

Usando la transformada rápida de Fourier, se llega a:

$$C(S) = F^{-1}\{F\{I_1(X)\} - F^*\{I_2(X)\}\} \quad 2.4$$

2.4 Calibración del Sistema PIV

La calibración del sistema PIV es un proceso que permite cuantificar cuantos píxeles están contenidos en una unidad de medida estandarizada como lo pueden ser milímetros, centímetros, metros etcétera, con la finalidad de poder calcular los desplazamientos y otras cantidades involucradas en el flujo estudiado.

Este procedimiento se realiza sin complicaciones mayores cuando se conoce una relación de conversión entre píxeles y unidades en el sistema de medidas en el que se estudia el fenómeno. Por ejemplo si un píxel es igual a una décima de milímetro, una medida recta previamente conocida que ocupe 100 píxeles equivaldrá a un centímetro.

Esta conversión no es directa ya que la perspectiva y distorsión de los lentes afectan a las mediciones en píxeles. La calibración toma en cuenta los posibles errores, sacando curvas y mapas que se pueden utilizar para convertir píxeles a unidades del sistema estandarizado usado. La calibración también se usa para reducir los errores de perspectiva o distorsiones permitiendo mejores cálculos.

Para calibrar la instalación óptica, se utiliza una imagen patrón de dimensiones conocidas, puede ser un objeto o bien una regla con una escala que relacione los píxeles con las unidades del sistema estandarizado utilizado. Con el software de adquisición de datos se obtienen imágenes en píxeles que pueden asociarse con dimensiones convencionales. El software de calibración usa estos patrones conocidos para calcular píxel por píxel, las dimensiones de la imagen completa. El sistema ahora calibrado, podrá arrojar resultados satisfactorios siempre y cuando no se cambie la posición de las cámaras o el haz de luz láser.

Este proceso es inevitable cuando se requiere tener mediciones de mucha exactitud con las imágenes capturadas.

Capítulo 3

Montaje Experimental

En el capítulo tres se hace mención del procedimiento a través del cual se llevó a cabo la experimentación en este trabajo; así como, una descripción del equipo utilizado, y del funcionamiento del sistema PIV utilizado.

Capítulo 3 Montaje Experimental

3.1 Matriz de pruebas

Las condiciones de flujo a las que se realizaron los experimentos se muestran en las tablas 3.1 para FFS y 3.2 para BFS respectivamente. En la primera columna se presenta el número de Reynolds en base a la altura del escalón $Re_h = \frac{uh\rho}{\mu}$ en donde u es igual a la velocidad promedio en m/s, h corresponde a la altura del escalón en m, ρ representa la densidad del fluido en kg/m^3 y μ es la viscosidad absoluta del fluido en kg/ms . La segunda columna corresponde al número de Reynolds basado en el diámetro hidráulico del canal φ este se calcula mediante la ecuación $\varphi = \frac{4Hw}{2H+2w}$; en donde H es la altura del canal en m, w es el ancho del canal en m. Así mismo Q representa el caudal en m^3/s mostrado en la última columna.

Tabla 3.1 Matriz experimental de pruebas escalón al frente (FFS)

Re_h	Re_φ	$Q \times 10^{-3}$ (m^3/s)
281	1021	0.05
562	2043	0.1
843	3064	0.15
1124	4086	0.2
1404	5107	0.25
1685	6128	0.3

3.2 Diseño de la zona de pruebas

La zona de pruebas está formada de los siguientes elementos: un canal de acrílico transparente de 10 cm de ancho y 2 cm de alto, con una longitud total de 1.4 m, un recipiente de vidrio para almacenar el agua, una bomba sumergible de $\frac{1}{4}$ de Hp, accesorios hidráulicos y el sistema laser PIV. En los siguientes párrafos se describen cada uno de estos elementos

Tabla 3.2 Matriz experimental de pruebas escalón atrás (BFS)

Re_h	Re_φ	$Q \times 10^{-3}$ (m ³ /s)
562	2043	0.1
843	3064	0.15
1124	4086	0.2
1404	5107	0.25
1685	6128	0.3

El área de pruebas se diseñó en acrílico transparente con un espesor de 9 mm. Esto debido a que la técnica experimental PIV es óptica, y opera únicamente en un medio transparente. La investigación experimental se llevo a cabo en un canal de longitud $L = 120$ cm, altura $H = 2$ cm y espesor $w = 10$ cm (Fig. 3.1), dos cabezales de $L = 10$ cm, $H = 2$ cm y $w = 10$ cm cada uno (Fig. 3.2), un escalón de $L = 60$ cm, $h = 1$ cm y $w = 10$ cm, la relación de aspecto del canal $w/h = 10$, se encuentra en el rango propuesto por diferentes autores para reducir el efecto de las paredes laterales del canal sobre el flujo [1, 3, 5, 7, 9, 11]. La distancia mínima necesaria para obtener un perfil turbulento de agua completamente desarrollado se calculó mediante la ecuación 3.1, para un Reynolds de 6128 y un diámetro hidráulico, $\varphi = 0.03$ m; el valor obtenido fue de 0.564 m, por lo que finalmente el escalón fue colocado a 0.7 m de la sección de entrada del flujo (23.33φ y $7 h$) y 0.7 m a partir de la sección de salida del mismo. El túnel experimental montado es mostrado en la figura 3.3, la posición del mismo es debida a los requerimientos de la técnica PIV, para poder analizar la zona de pruebas deseada. En la figura se puede observar que los cabezales funcionan como tomas de entrada y salida del flujo.

$$l_d = 4.4\varphi Re_\varphi^{1.666} \quad 3.1$$

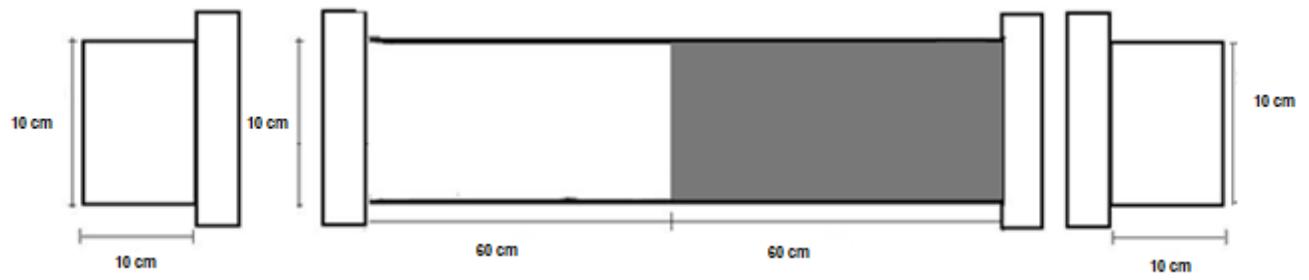


Fig. 3.1 Dimensiones del túnel de pruebas

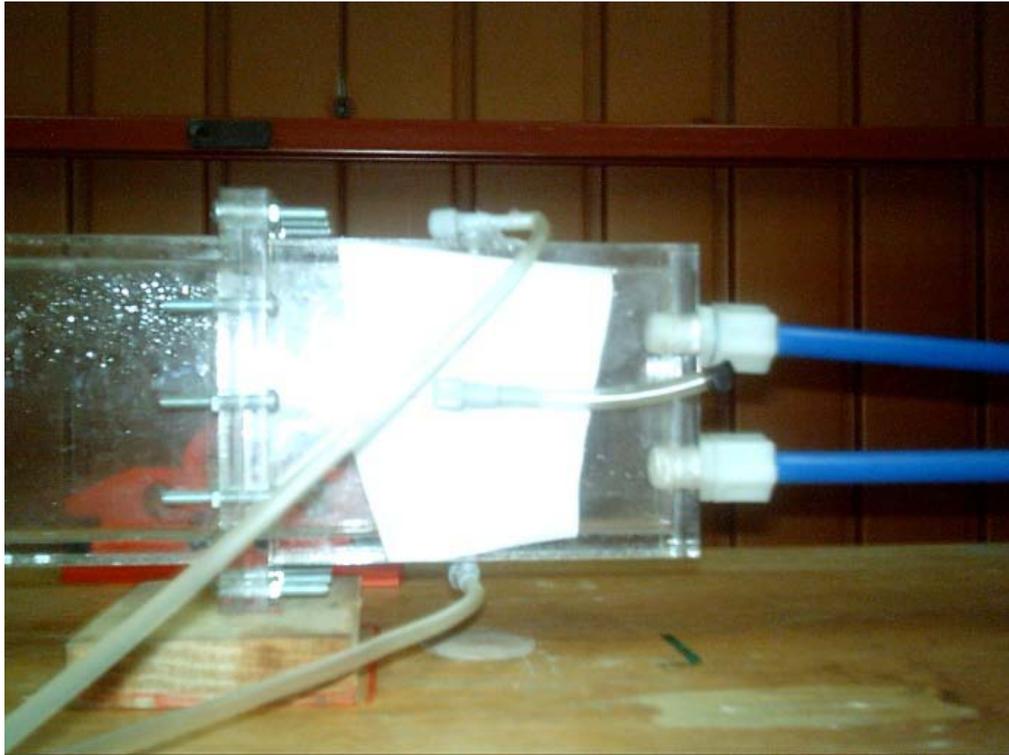


Fig. 3.2 cabezales para entrada y/o salida del flujo de agua



Fig. 3.3 Túnel experimental

Cálculo de la bomba

Para el cálculo de la bomba utilizada en estos experimentos se emplea la ecuación clásica de Bernoulli, tomando en cuenta las pérdidas energéticas ocasionadas por los componentes hidráulicos y los materiales de los cuales están elaborados (primordialmente acrílico y plástico). A partir de esto se tiene la energía requerida para mantener un flujo de agua a un número de Reynolds de 6128. De esto se concluye que con una bomba de 1/4 HP como la mostrada en la figura 3.4 es suficiente para cumplir con las condiciones de flujo programadas en la matriz experimental.



Fig. 3.4 Bomba sumergible de ¼ HP

Sistema hidráulico

Los componentes básicos del sistema hidráulico necesarios para el montaje son:

- Tubería de plástico de 1.27 cm de diámetro interno
- Rotámetro graduado en LPM
- Manguera conduit de plástico de 1.27 cm de diámetro interno
- Una válvula de bola
- Un recipiente de vidrio
- 8 Válvulas de plástico

Se procedió a ensamblar todo el sistema para construir un circuito hidráulico cerrado; es decir el punto de succión sería el punto de descarga; en este caso un recipiente de

vidrio el cual es mostrado en la figura 3.5 es utilizado como punto de succión y descarga. El circuito fue alimentado con agua, hasta llenarse completamente. Se realizó una inspección visual en busca de fugas; una vez efectuada la inspección y comprobando que no existía ningún tipo de riesgo para el equipo PIV se procedió a realizar la experimentación, en base a la matriz experimental de pruebas definida en la tabla 3.1.

La válvula de bola (Fig. 3.6) sirve como control de flujo para poder obtener diferentes velocidades (diferentes Re_ϕ). El rotámetro (Fig. 3.7) mide la cantidad de litros por minuto (LPM). La figura 3.8 a corresponde al caso del flujo FFS y 3.8 b al caso del flujo BFS, en ellas se pueden observar los componentes del circuito hidráulico y las zonas de prueba analizadas que corresponden al plano $x = 10$ mm para la zona A y $x = 120$ mm para la zona B tomando como referencia la pared del escalón.



Fig. 3.5 recipiente de vidrio

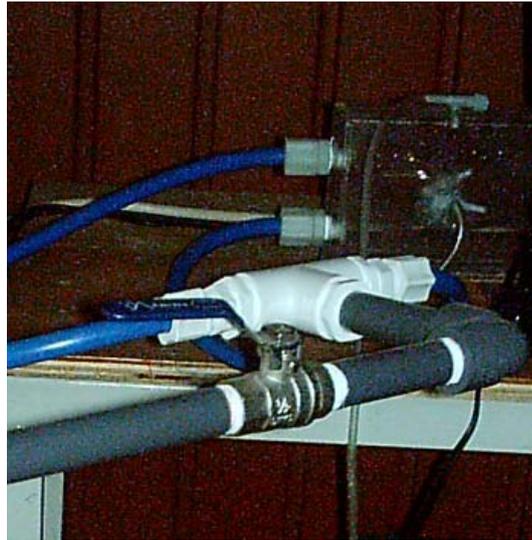


Fig. 3.6 válvula de control del sistema



Fig. 3.7 Rotámetro graduado en LPM

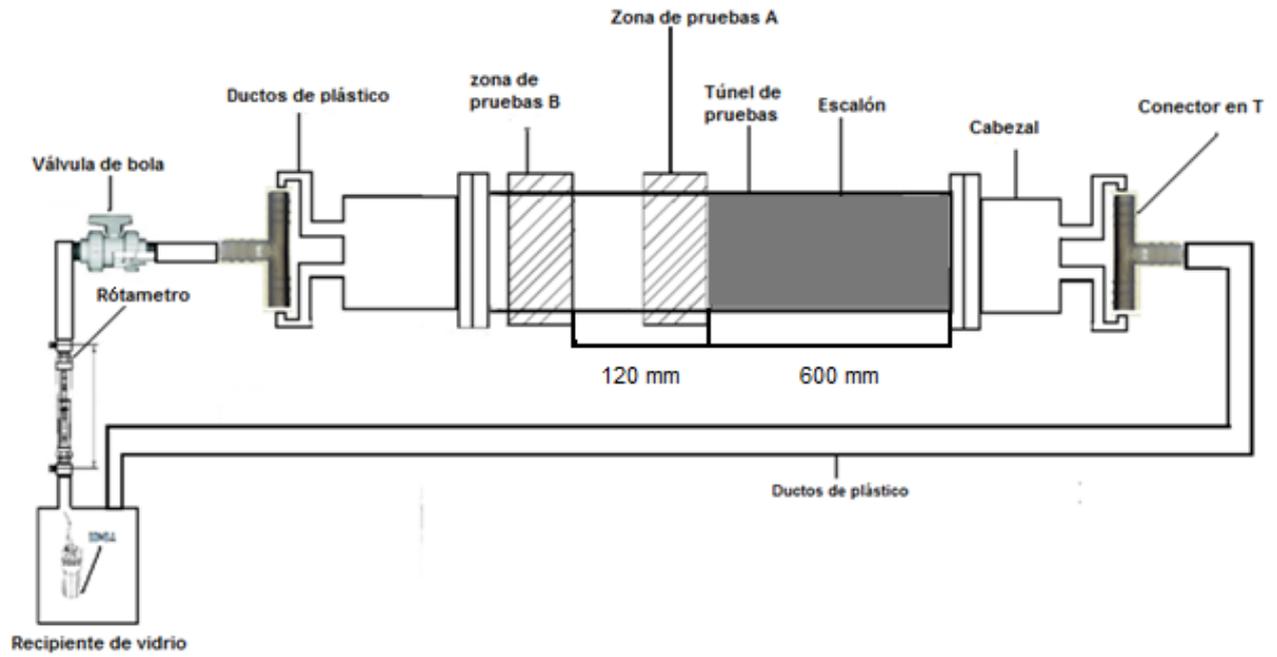


Fig. 3.8 a Componentes del circuito hidráulico y zonas de pruebas para flujo FFS

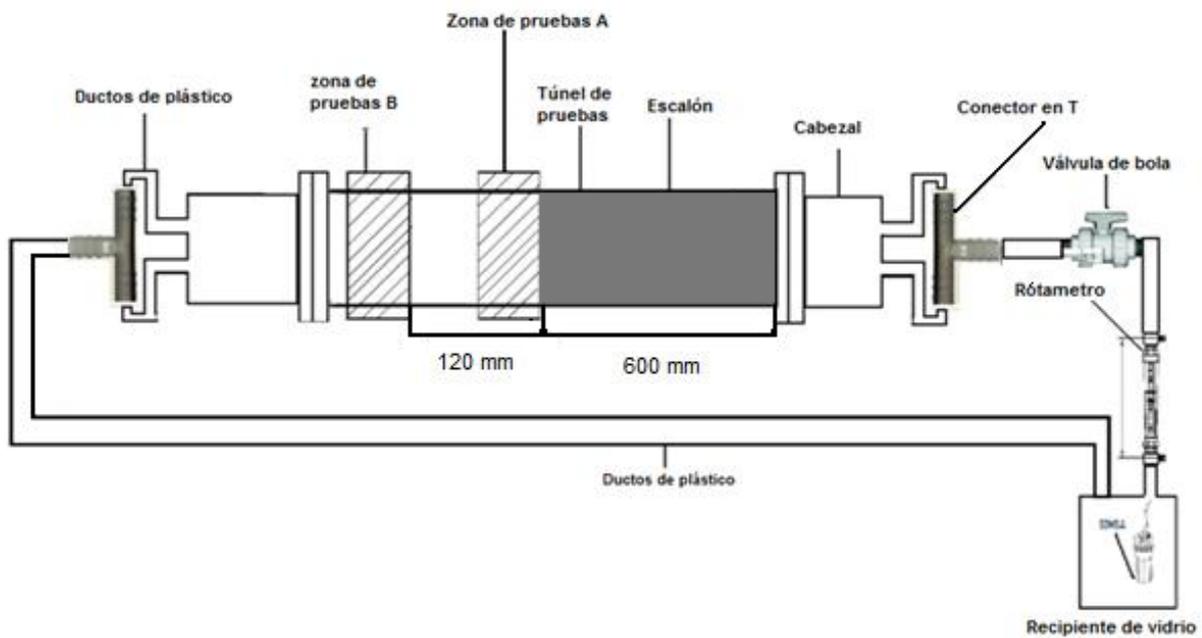


Fig. 3.8 b componentes del circuito hidráulico y zona de pruebas para flujo BFS

3.3 Montaje del sistema PIV

El sistema PIV utilizado en este estudio consta de la cámara Flowsense M2-8bit mostrada en la figura 3.9 Esta cámara contiene un sensor de carga acoplada CCD de un 1610px x 1100px, además, funciona en conjunto con un modulo de control electrónico especial que permite la adquisición de pares de imágenes a altas velocidades. Las imágenes son transferidas al procesador alojado en la tarjeta de almacenamiento del sistema sincronizador vía un conector digital a velocidades incluso de $1 \mu s$.



Fig. 3.9 Cámara Flowsense M2-8bit

El dispositivo utilizado para la creación de la hoja de luz láser es mostrado en la figura 3.10. Este dispositivo es capaz de proporcionar una hoja de luz láser angularmente orientable hasta una distancia de 1.8m del objetivo. La radiación láser emitida tiene una energía concentrada de 500 mJ por pulso. Esta energía es concentrada gracias a la acción del interruptor Q. La hoja de luz láser emitida tiene una longitud de onda de 532 nm y tiene una duración de pulso de menos de 10ns, es por eso que las partículas añadidas al flujo, prácticamente no se mueven durante el proceso de fotografiado. La fuente de poder mostrada en la figura 3.11 es donde se regula la potencia del laser y también funciona como sistema de enfriamiento del sistema



Figura 3.10 Láser Nd: YAG de la marca New Wave Gemini



Fig. 3.11 Fuente de poder del laser ND: YAG

El sistema de iluminación de la hoja de luz láser y la cámara CCD están conectados al sincronizador de la marca Dantec mostrado en la figura 3.12. Este dispositivo se encarga de darle la sintonía a la hoja de luz láser con las imágenes capturadas (hasta 32 por segundo), además le permite al usuario conectar diversos aparatos externos al sistema, tales como sensores de presión y temperatura.



Fig. 3.12 Dispositivo sincronizador del sistema PIV (HUB)

La figura 3.13 ilustra la configuración interna del elemento sincronizador consiste en un tablero de sincronización, una tarjeta electrónica de correlación, que se encarga de convertir la información en forma de imagen a un mapa vectorial, una tarjeta electrónica de almacenamiento que recibe la información de la cámara y la envía sistema de correlación, y un dispositivo de reconocimiento, el cual se acopla a la tarjeta de almacenamiento permitiendo entre otras cosas de enviar la información de los mapas vectoriales obtenidos a una computadora personal de manera continua, permitiendo un almacenaje en tiempo real de procesamiento vectorial.

El programa Flowmanager es básicamente la interface entre el usuario y el sistema PIV. Al ejecutarlo, nos permite determinar y modificar los diferentes parámetros claves y ajustes con los que funcionará el sistema. Cuando todos los parámetros son capturados, estos son cargados al procesador del sincronizador desde una PC, y las mediciones pueden ser iniciadas. Si algún parámetro necesita ser modificado, basta con detener momentáneamente el sistema, realizar el ajuste requerido y reiniciar de nuevo de manera muy sencilla. La carga y recepción de las imágenes o mapas vectoriales es realizada vía la interface Ethernet de comunicación.

Cabe señalar que los mapas recibidos hasta este punto se encuentran sin ningún filtrado, es decir el software antes de entregarnos las imágenes que vemos al final, les aplica ciertos algoritmos de corrección y validación como se mencionó en el capítulo 2. La figura 3.14, nos muestra el diagrama de flujo de la información entre la computadora y los distintos dispositivos controlados por el software Flowmap.

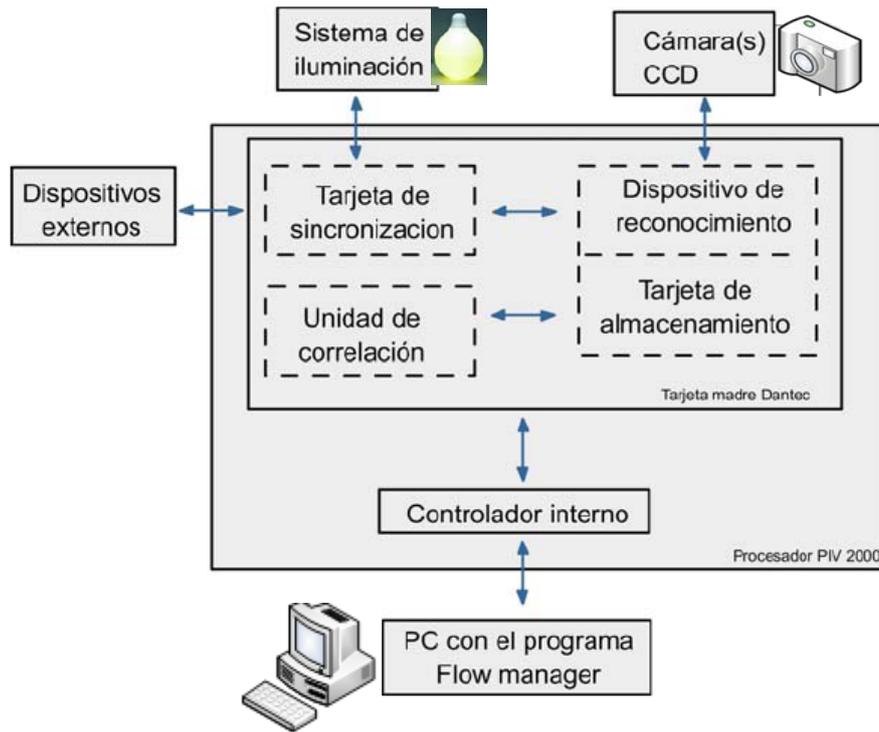


Fig. 3.13 Arquitectura del dispositivo sincronizador

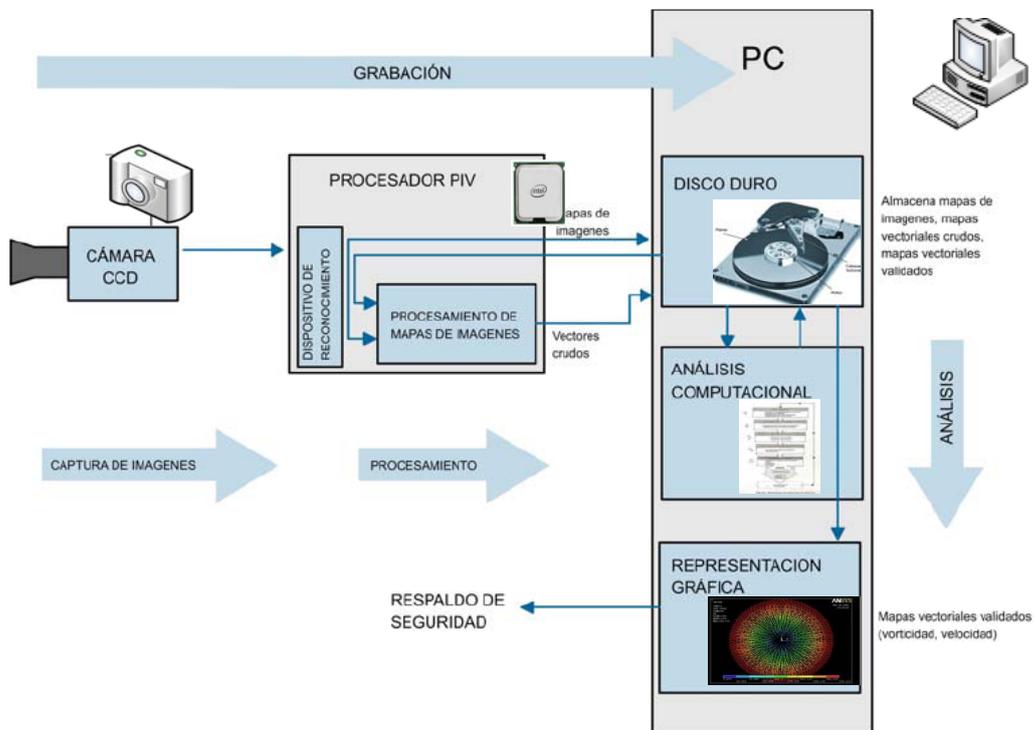


Fig. 3.14 Flujo de datos hacia la computadora personal

El funcionamiento del sistema eléctrico y de control de la técnica óptica de medición PIV es resumido en la figura 3.15 y 3.16 respectivamente donde se pueden observar los componentes básicos del PIV y su distribución

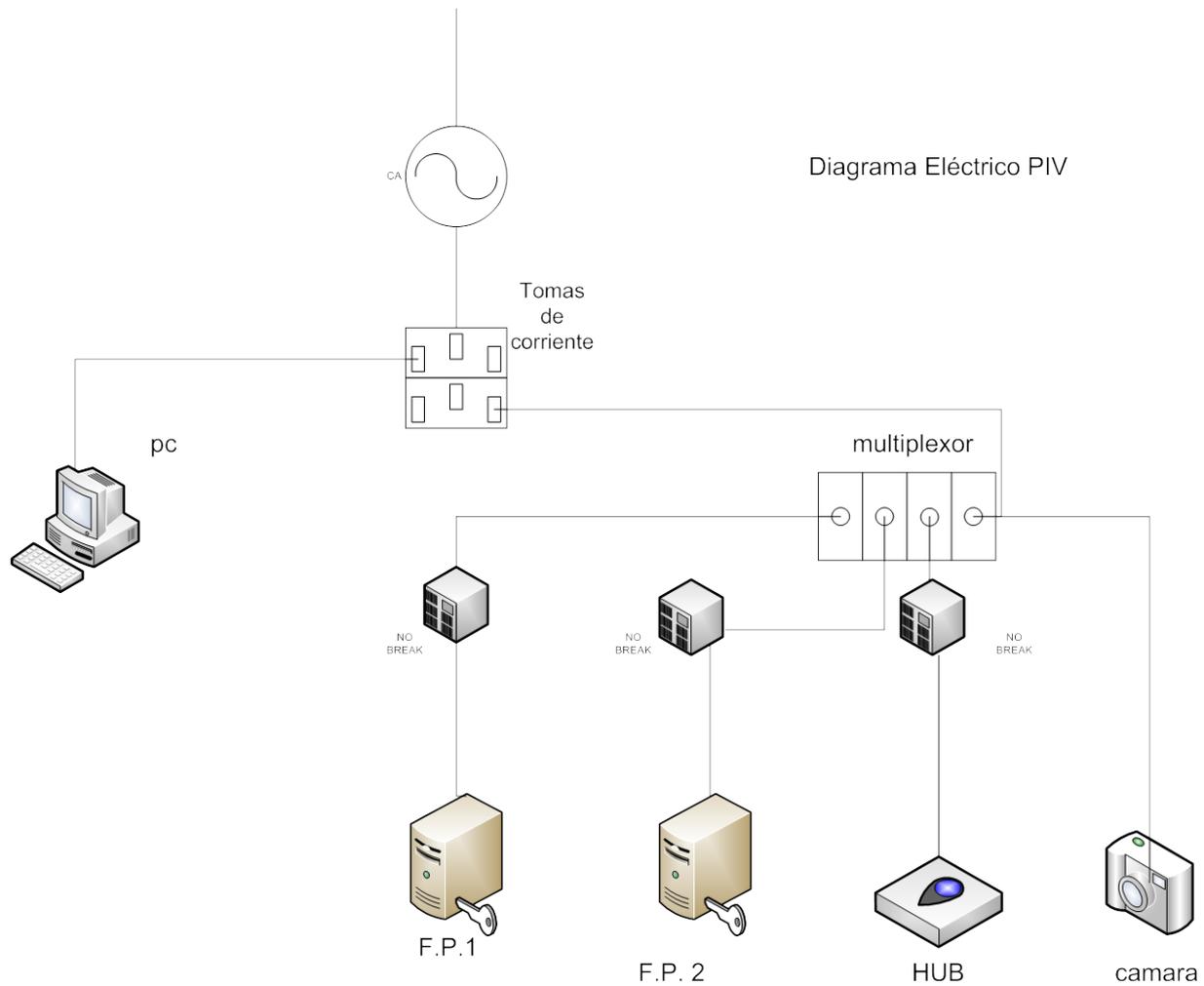


Fig. 3.15 Diagrama de funcionamiento del sistema eléctrico del PIV

Diagrama de control

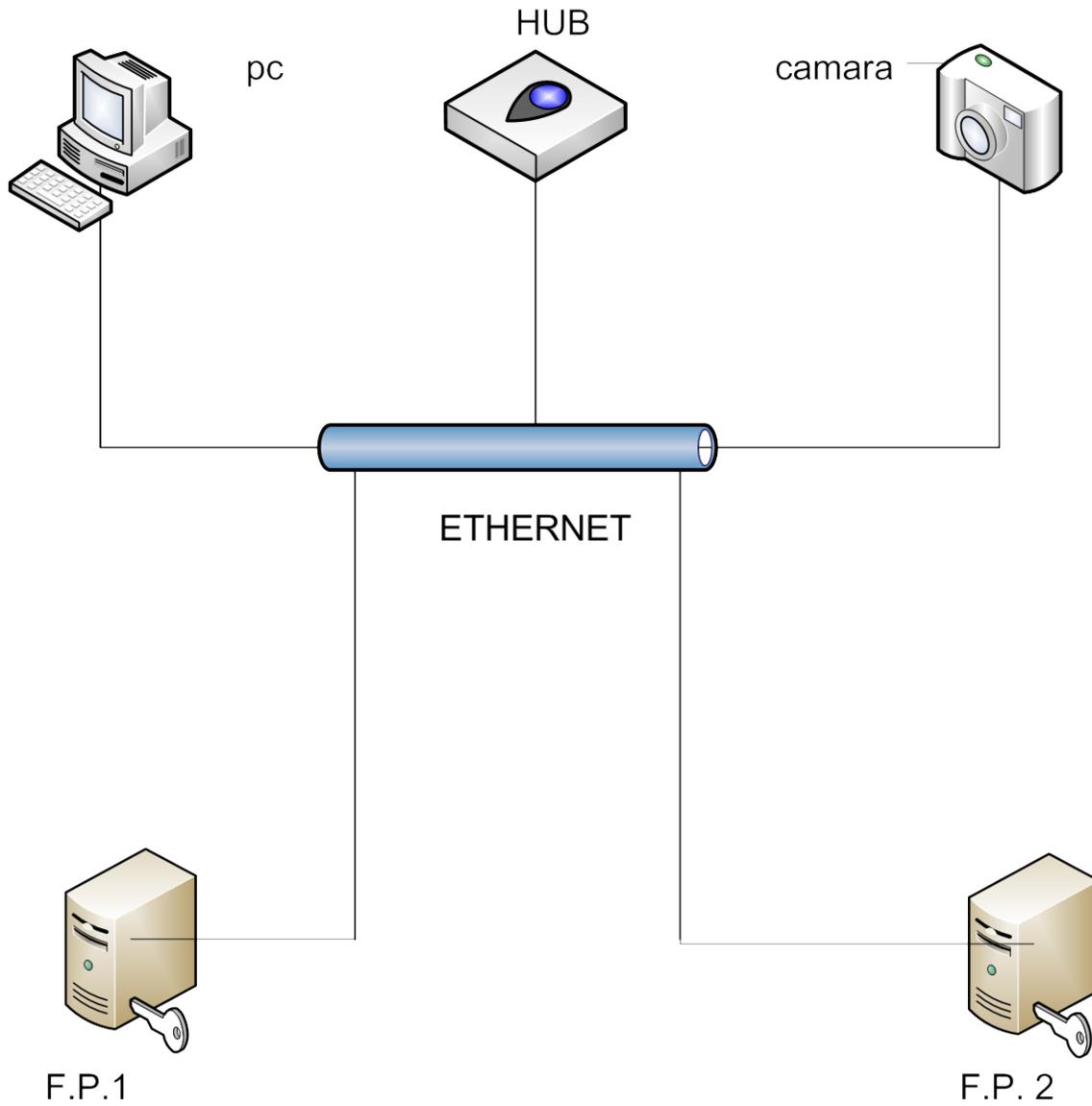


Fig. 3.16 Diagrama de funcionamiento del sistema de control del PIV

Capítulo 4

Análisis De Resultados

El capítulo cuatro reporta los resultados obtenidos: campos de velocidad instantáneos y promedio, perfiles de velocidad, perfil de las rms, vorticidad y posición del centro del vórtice para Flujo Hacia el Frente (FFS) y Flujo Hacia Atrás (BFS) del escalón.

Capítulo 4 Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos a diferentes números de Reynolds (Re) para flujo sobre un escalón en ambas direcciones: hacia el frente (FFS) y hacia atrás (BFS). Entre las estadísticas reportadas se tienen: campos de velocidad, perfiles de velocidad, u_{rms} , v_{rms} , vorticidad, posición del centro del vórtice en cada caso.

Entre las aplicaciones que tiene el estudio del flujo sobre un escalón se puede mencionar que: los resultados de estas investigaciones se emplean como estándar de comparación para validar diferentes modelos de turbulencia en códigos computacionales, así mismo los resultados pueden ser aplicados en el mezclado en cámaras de combustión, flujo en válvulas, flujo en difusores y en aplicaciones medicas (flujo sanguíneo).

4.1 Campos de velocidad instantáneos

Empleando el software flowmanager y el sistema PIV se capturaron 100 pares de imágenes de la zona de pruebas para cada configuración: FFS, BFS a diferentes Re_{ϕ} . Estas imágenes tienen una resolución de 1600 pix x 1186 pix y fueron divididas en regiones de 32 pix x 32 pix para FFS y 64 pix x 64 pix para flujo BFS; con un traslape en ambos de 50 %. Para calcular el factor de calibración se consideró la imagen que incluye la altura del escalón. La fotografía que se muestra en la figura 4.1a corresponde a una imagen de la zona de pruebas A y la figura 4.1b es una imagen de la zona de pruebas B para flujo hacia el frente del escalón (FFS), para flujo hacia atrás del escalón (BFS) la figura 4.2a y 4.2b ilustran la zona de pruebas A y B respectivamente. De acuerdo al factor de escala el área total de la imagen de 1600 pix x 1186 pix equivale a un área de 22.77 mm x 16.89 mm. En estas figuras se muestra una región inferior (zona sin partículas) que no corresponde a la región interna del canal; ésta fue eliminada de cada imagen (con esto se reduce el tiempo de cálculo a 40 min por set de 100 pares de imágenes). De este análisis se obtienen 100 campos de velocidad instantáneos.

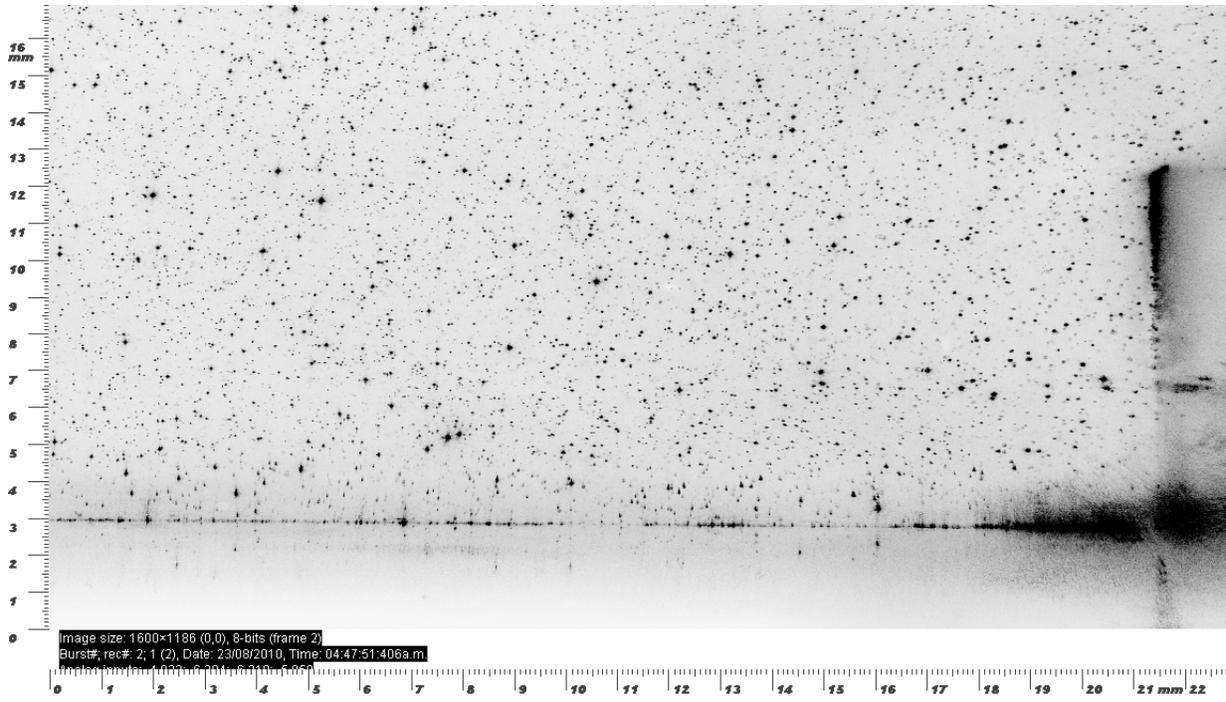


Fig. 4.1a Fotografía de la zona de pruebas A (FFS)

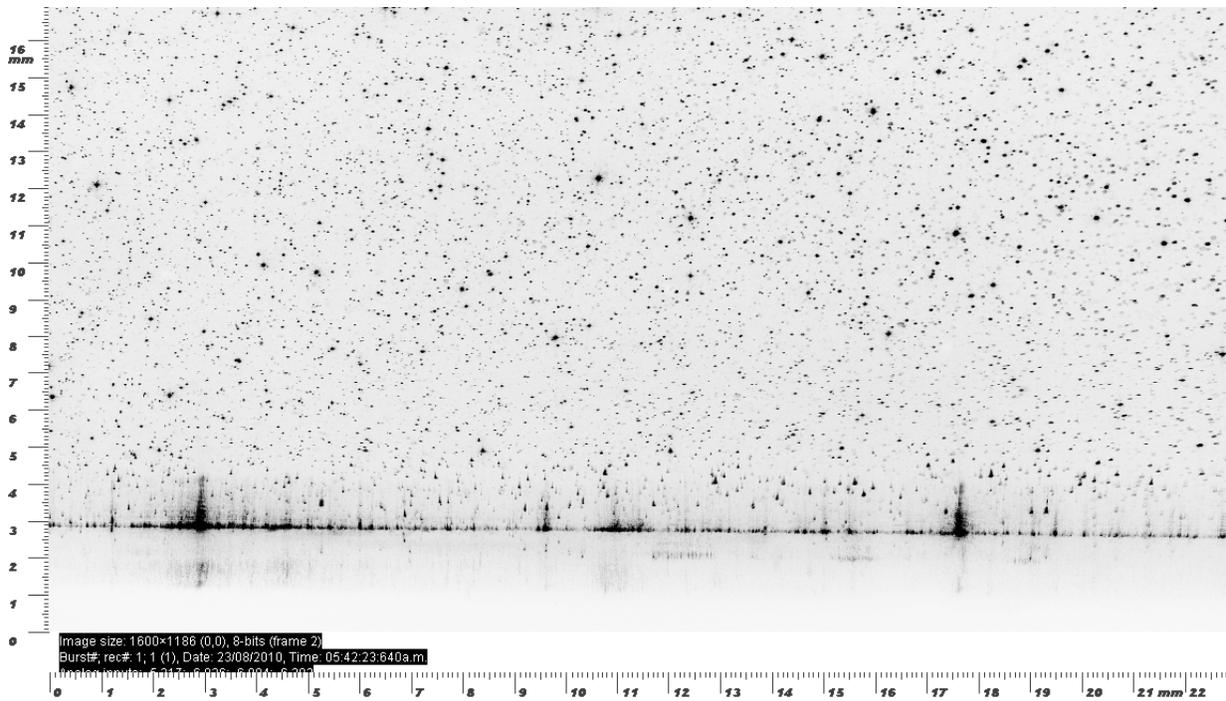


Fig. 4.1b Fotografía de la zona de pruebas B (FFS)

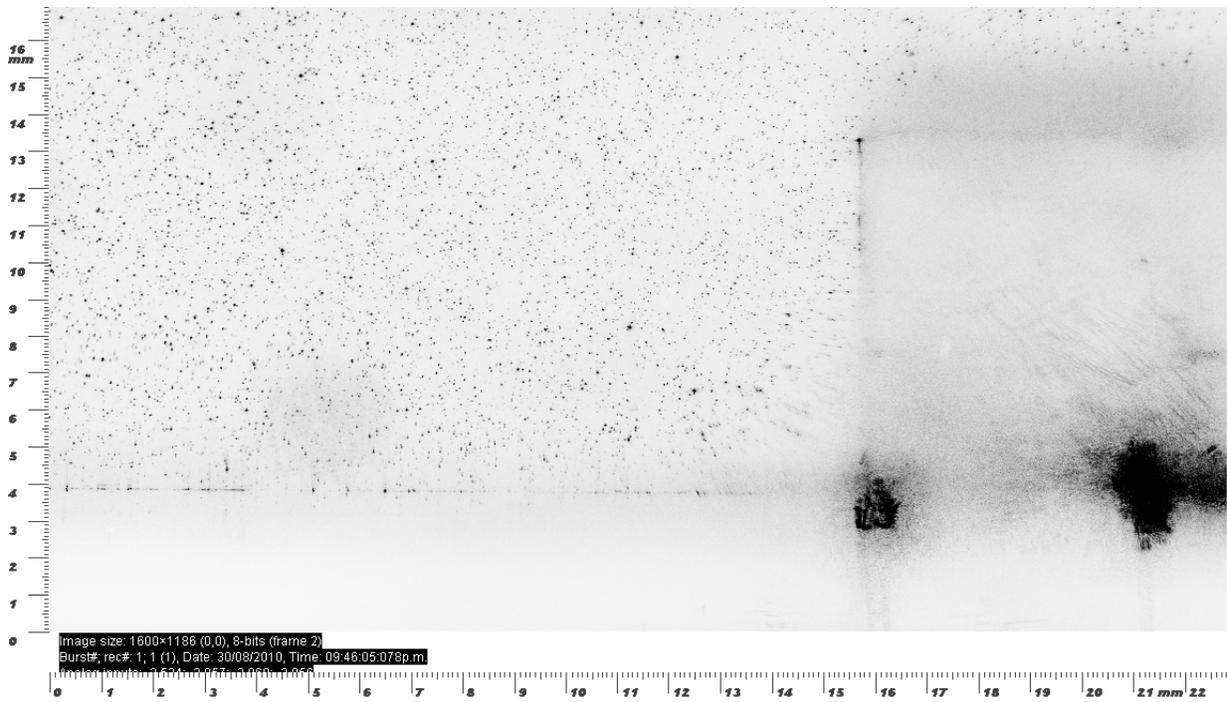


Fig. 4.2 a Fotografía de la zona de pruebas A (BFS)

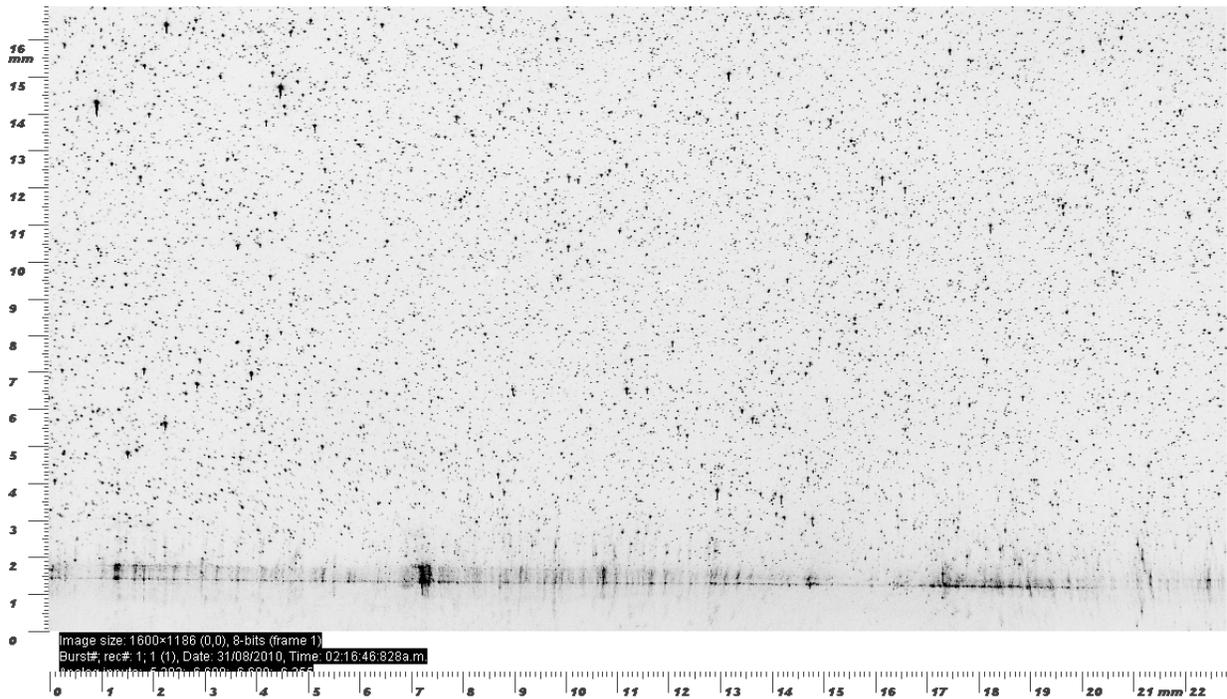


Fig. 4.2 b Fotografía de la zona de pruebas B (BFS)

Los campos instantáneos que corresponden al flujo en la región cercana a la base del escalón (zona A) se ilustra en la figura 4.3 y 4.4 para ambas direcciones del

flujo (FFS y BFS respectivamente), para la región alejada del escalón (zona B) los campos de velocidad instantáneos son mostrados en la figura 4.5 para flujo al frente y 4.6 para flujo hacia atrás respectivamente, cabe mencionar que el flujo BFS en la zona B no se encuentra completamente desarrollado es por eso que los vectores de velocidad presentan ese comportamiento. Las cuatro figuras corresponden a un $Re_{\phi}=6128$.

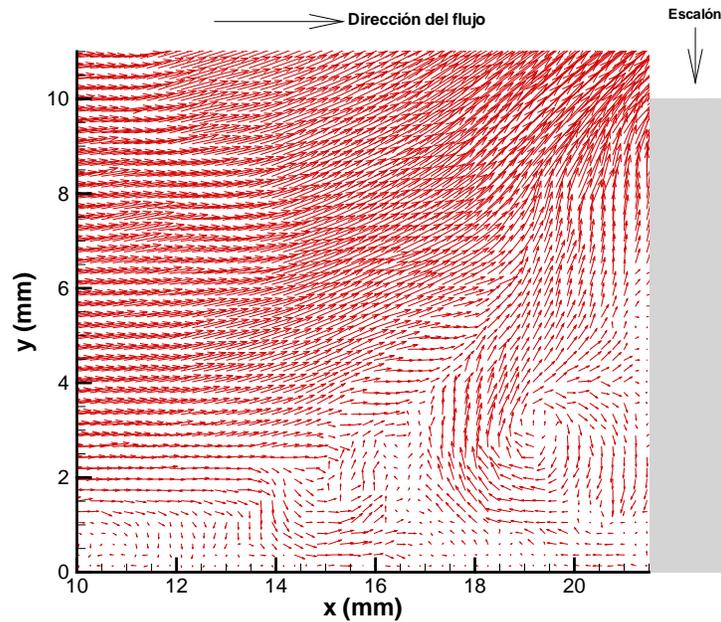


Fig. 4.3 campo de velocidad instantáneo a $Re_{\phi} = 6128$ zona A (FFS)

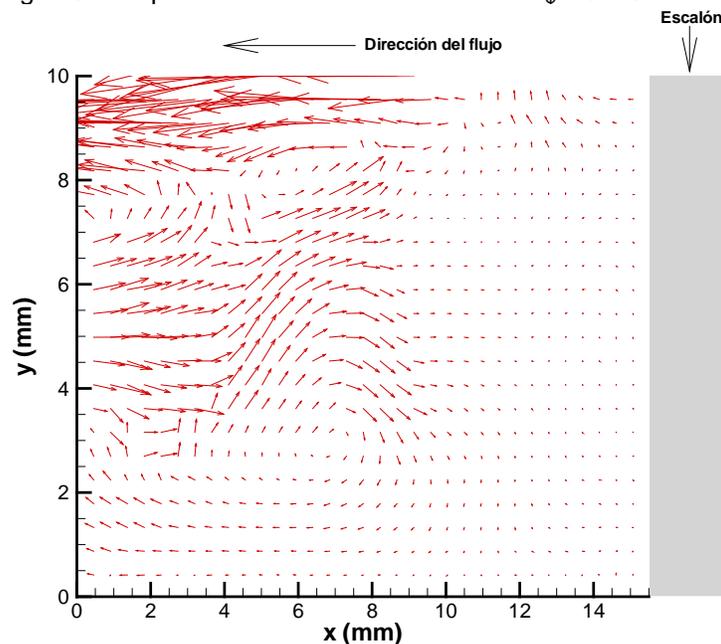


Fig. 4.4 Campo de velocidad instantáneo a $Re_{\phi} = 6128$ zona A (BFS)

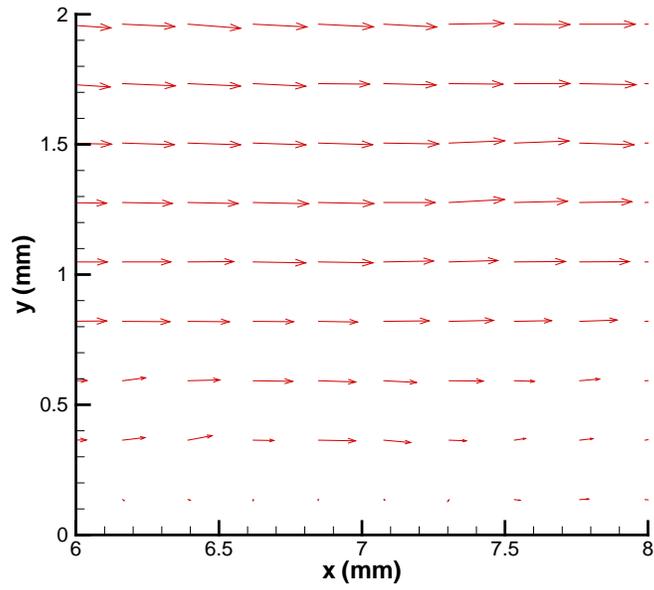


Fig. 4.5 campo de velocidad instantáneo a $Re_\phi = 6128$ zona B (FFS)

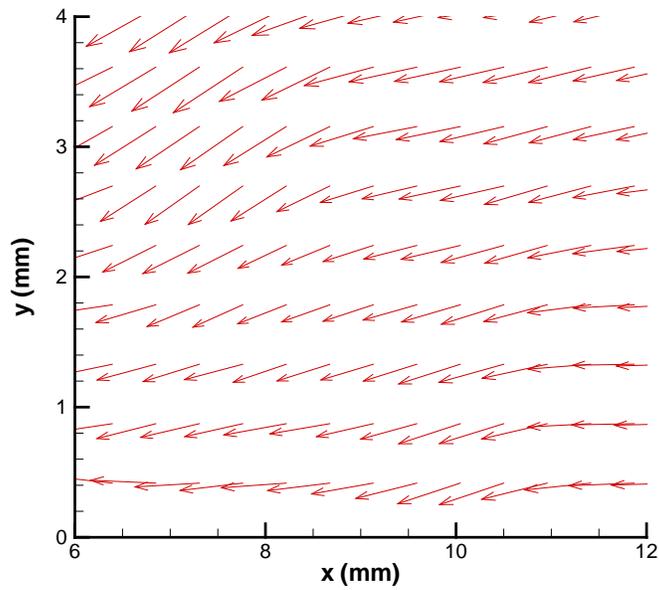


Fig 4.6 Campo de velocidad instantáneo a $Re_\phi = 6128$ zona B (BFS)

4.2 Campos de velocidad promedio

Los 100 campos de velocidad para cada Re se promedian en el tiempo y se obtiene un solo campo promedio. En la fig. 4.7 el campo de velocidad promedio para $Re_{\phi} = 6128$ enmarca la localización del vórtice y es representativa de los campos de velocidad promedio para FFS, en esta se muestran la dirección del flujo y el escalón; para los siguientes Re_{ϕ} , se recorta la imagen con la finalidad de observar con mayor detalle la región del vórtice. Las figuras 4.8 a 4.12 ilustran los campos de velocidad promedio obtenidos a diferentes Re_{ϕ} , se observa que un vórtice es formado debido a la recirculación del flujo, conforme el Re_{ϕ} es incrementado el tamaño del vórtice disminuye tanto en su coordenada horizontal, como en la vertical, lo anterior es ilustrado por los datos en la tabla 4.1.

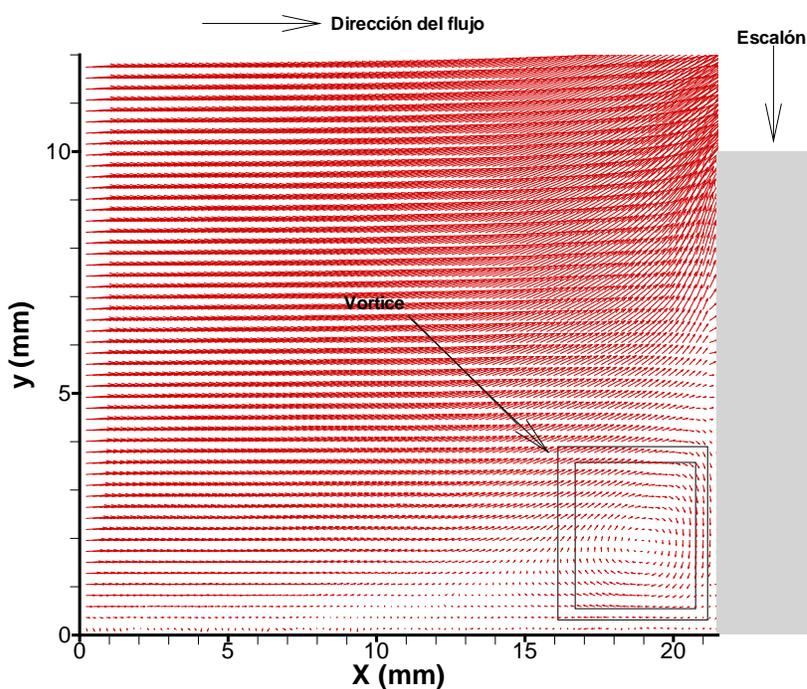
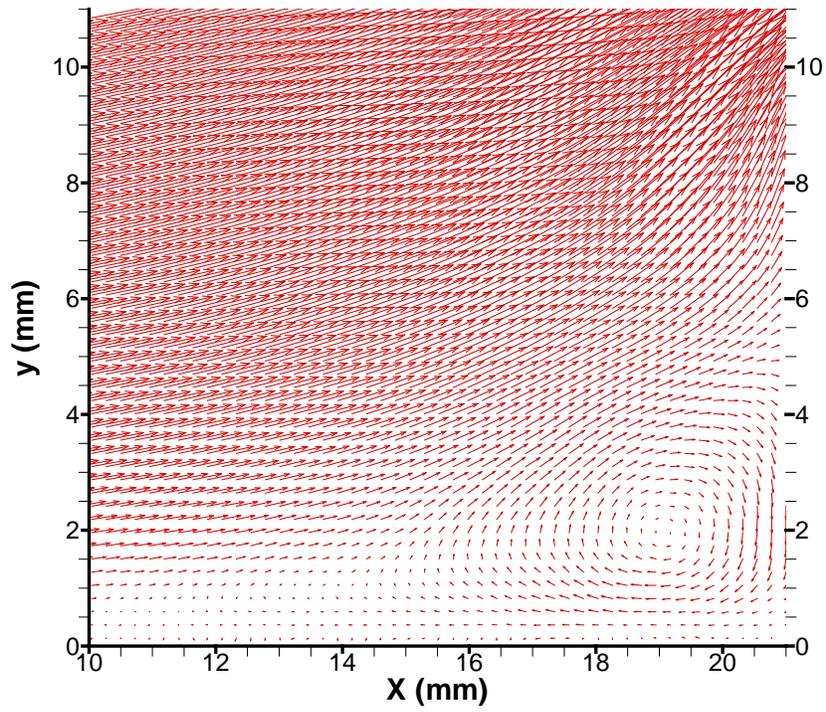
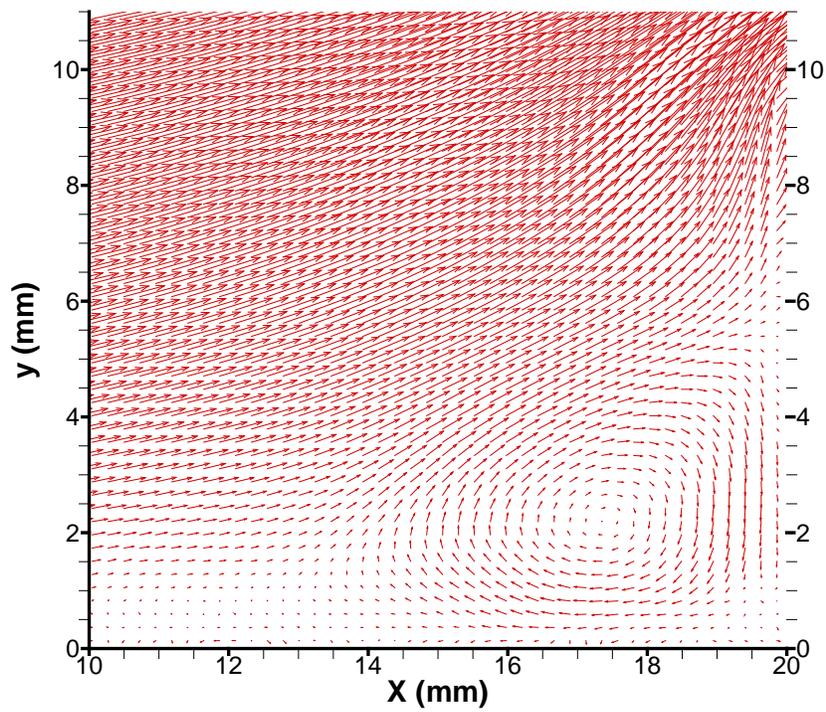
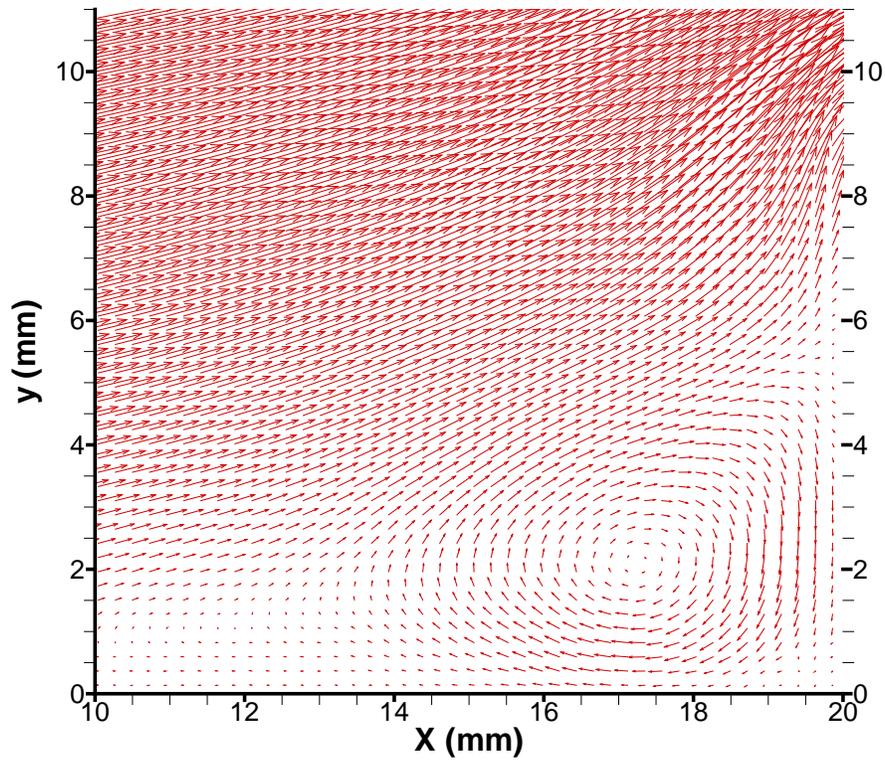
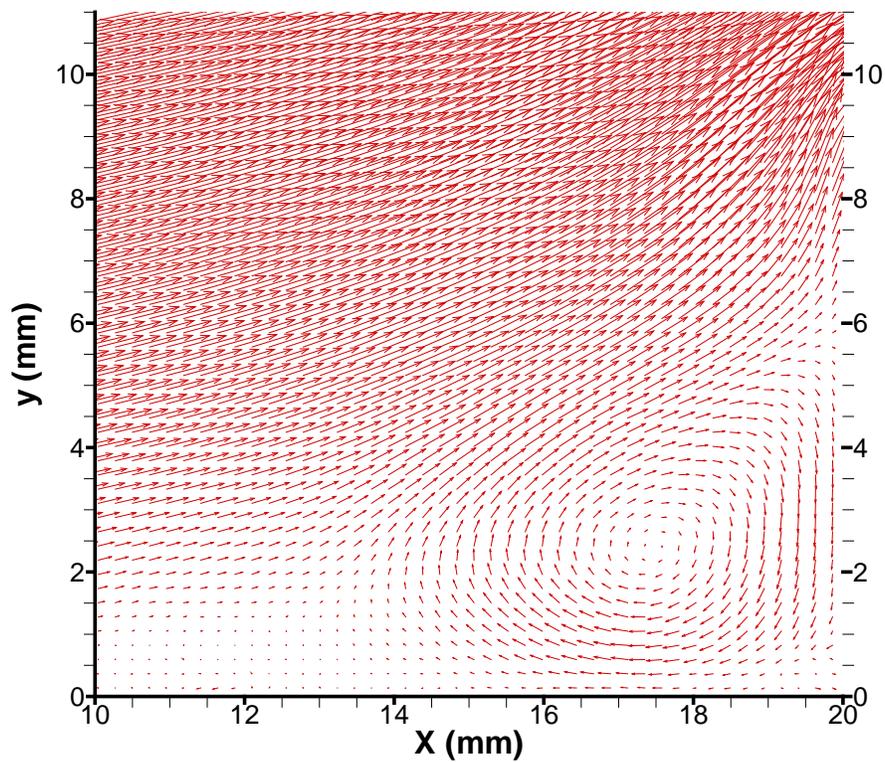


Fig. 4.7 campo de velocidad promedio para FFS a $Re_{\phi} = 6128$

Tabla 4.1 Tamaño del vórtice para distintos Re_{ϕ} FFS

Re_{ϕ}	1021	2043	3064	4086	5107	6128
y (mm)	5.7	5.5	5.3	5.2	5	4.7
x (mm)	6.9	6.7	6.5	6	5.5	4.5

Fig. 4.8 Campos de velocidad promedio para FFS $Re_\phi = 5107$ Fig. 4.9 Campos de velocidad promedio para FFS $Re_\phi = 4086$

Fig. 4.10 Campos de velocidad promedio para FFS $Re_\phi = 3064$ Fig. 4.11 Campos de velocidad promedio para FFS $Re_\phi = 2043$

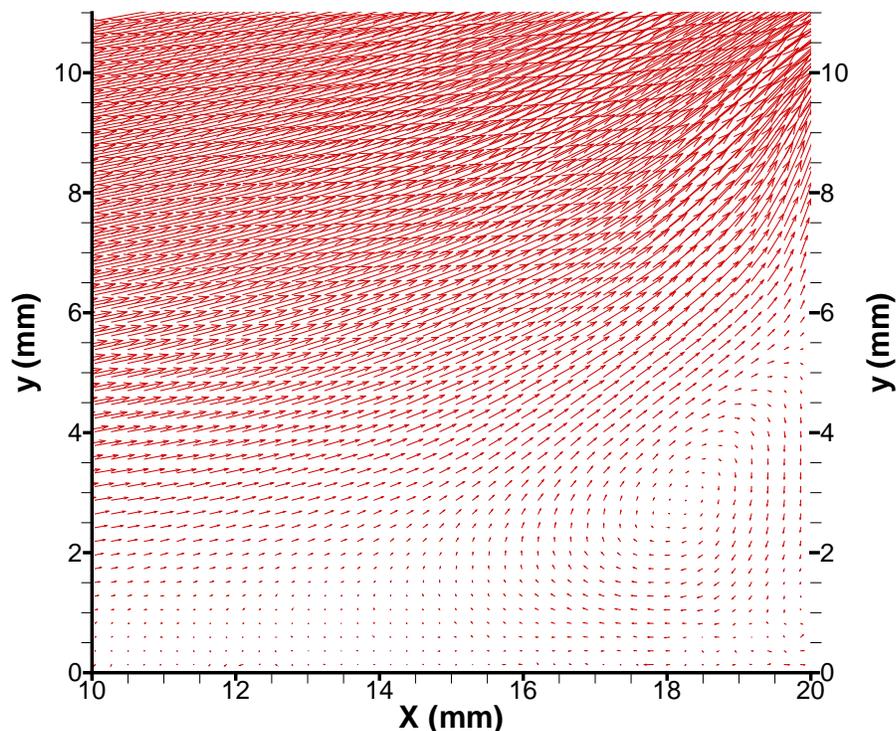
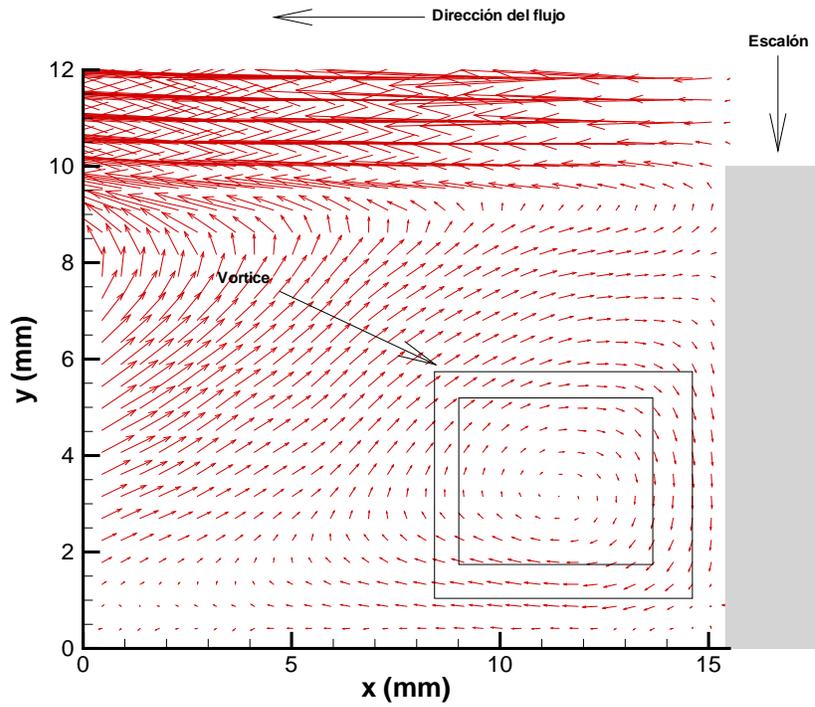
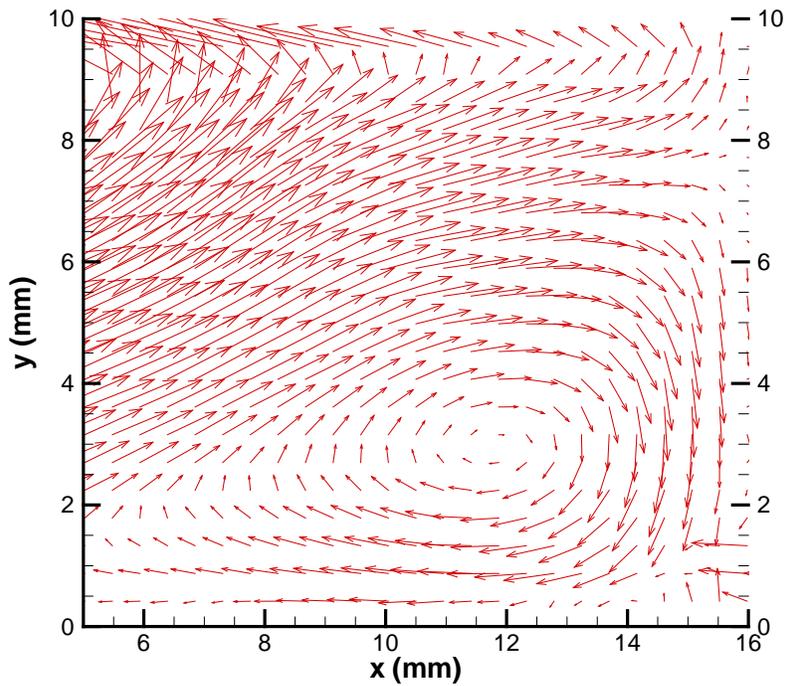


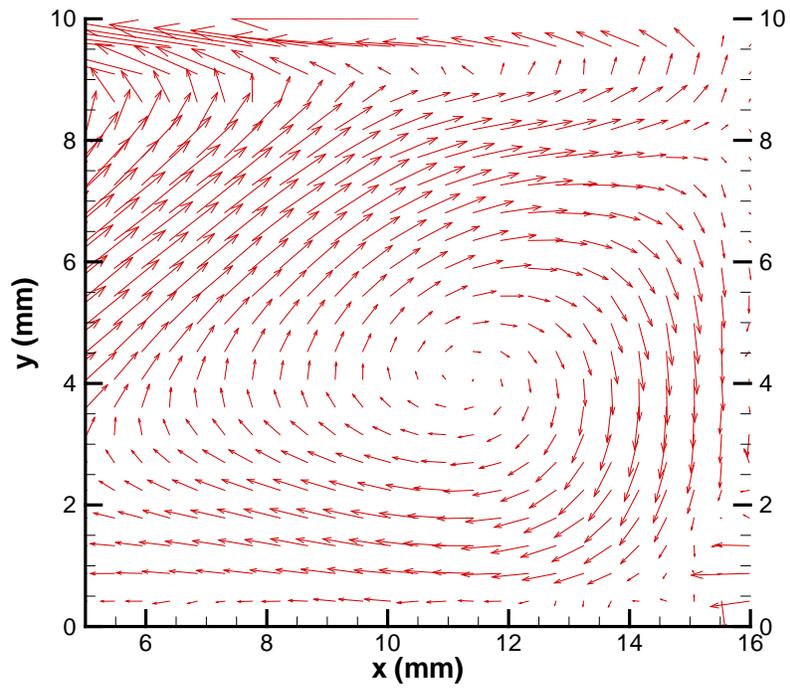
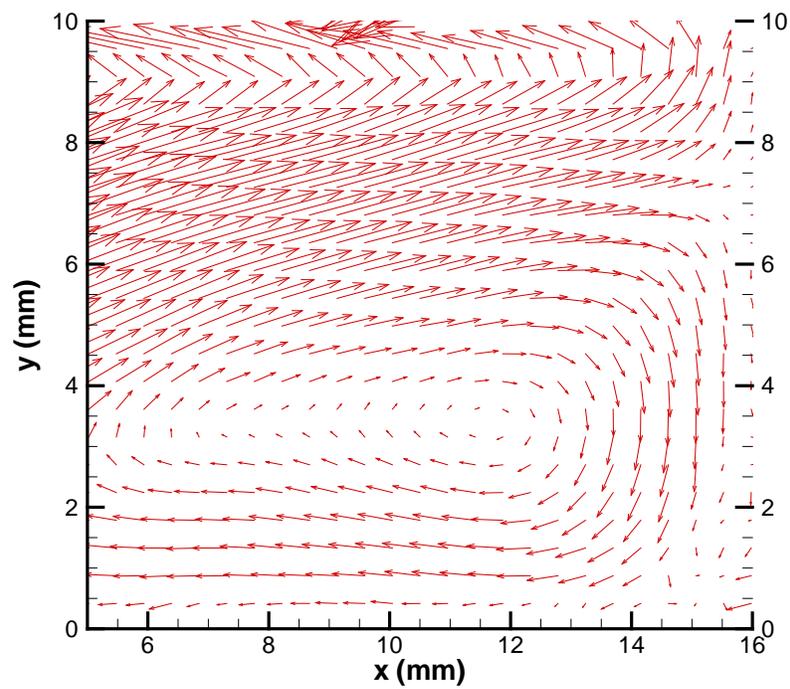
Fig. 4.12 Campos de velocidad promedio para FFS $Re_{\phi}=1021$

Para el caso de campos de velocidad promedio para BFS se realizó el mismo análisis que en FFS. En la figura 4.13 para $Re_{\phi} = 6128$, se enmarca la localización del vórtice secundario, en ella se muestran la posición del escalón y la dirección del flujo. Para todos los Re_{ϕ} se recorta la imagen para poder observar con mayor detalle el vórtice secundario. Las figuras 4.14 a 4.17 ilustran los campos de velocidad promedio obtenidos a diferentes Re_{ϕ} , se observa que un vórtice secundario es formado debido a la recirculación del flujo (debido a la posición de la cámara el vórtice primario no pudo ser observado en su totalidad). Se observó que conforme el Re_{ϕ} se incrementa la altura del vórtice "y" no presentaba una tendencia específica, mientras que su ancho x siempre es mayor a 15 mm lo anterior se ilustra en los datos de la tabla 4.2

Tabla 4.2 Tamaño del vórtice para distintos Re_{ϕ} BFS

Re_{ϕ}	3064	4086	5107	6128
y (mm)	7	8.5	9	8.5
x (mm)	> 15	> 15	> 15	> 15

Fig 4.13 campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi}=6128$ (BFS)Fig 4.14 campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi}=6128$ (BFS)

Fig 4.15 campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi}=5107$ (BFS)Fig 4.16 campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi}=4086$ (BFS)

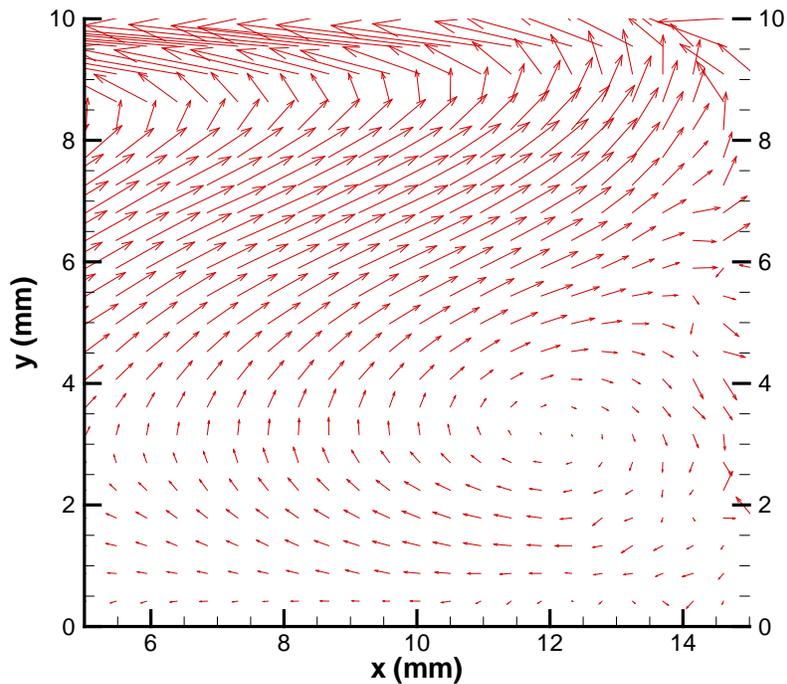


Fig 4.17 campo de velocidad promedio flujo hacia atrás $Re_{\phi}=3064$ (BFS)

4.3 Perfiles de velocidad

En la figura 4.18 se puede observar el comportamiento del perfil de velocidad para el caso FFS, en una zona a cierta distancia del escalón se observa que el flujo no es perturbado a excepción de la zona cercana a la pared inferior del canal, conforme el flujo se acerca al escalón se observa una disminución en la componente de velocidad u , al llegar a la base del escalón y chocar con el mismo, el flujo forma una zona de recirculación que da origen a un vórtice, el cual es ilustrado por los pequeños vectores de velocidad mostrados en la esquina inferior derecha de la imagen, las capas de fluido adyacentes en la parte superior de esta zona siguen su curso hacia arriba hasta llegar a la contracción del canal provocada por la presencia del escalón, en este punto la componente de velocidad principal del flujo u se incrementa. En las secciones siguientes se presenta de forma mas detallada el comportamiento de los perfiles de velocidad en cada una de las zonas estudiadas.

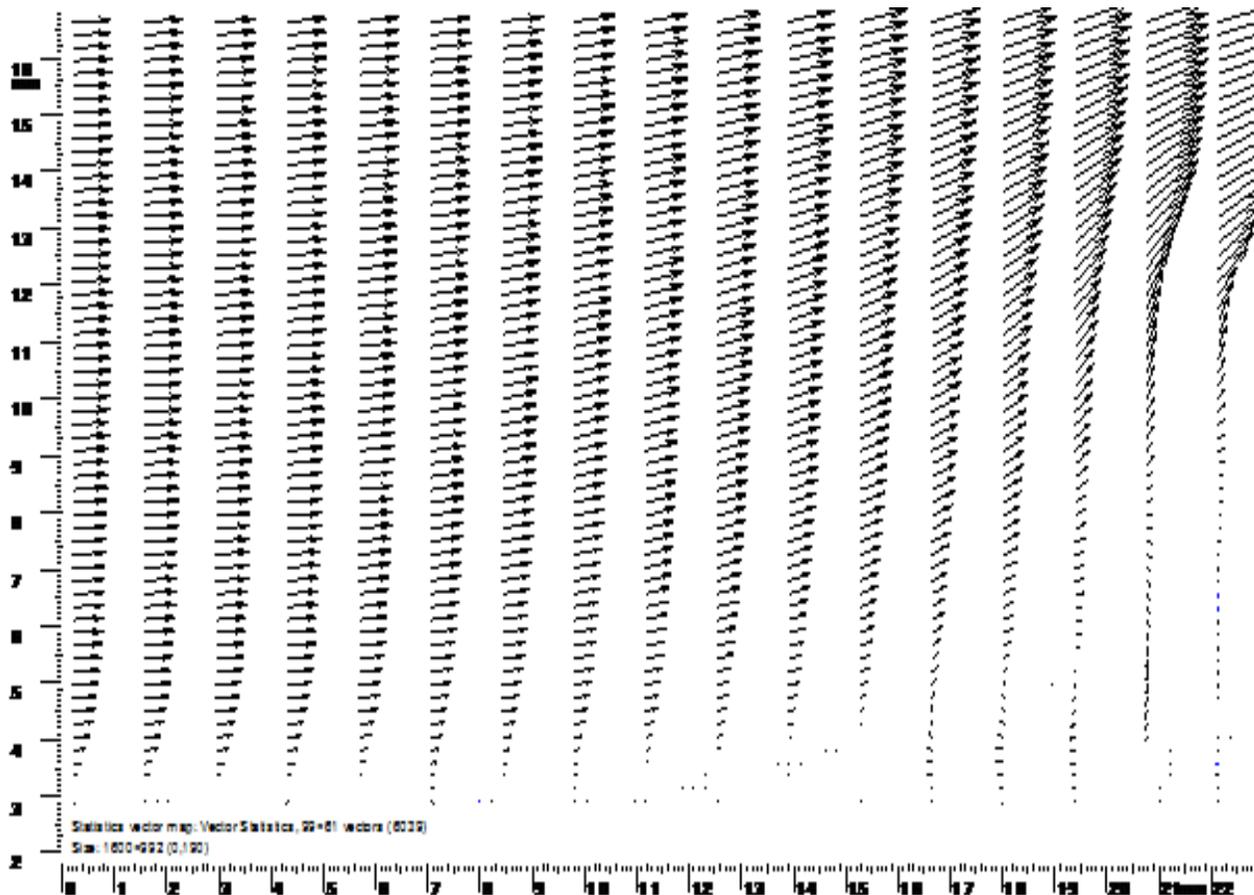


Fig. 4.18 Perfiles de velocidad para un $Re_\phi=6128$

Para obtener los perfiles de velocidad de las componentes de velocidad u y v para cada Re_ϕ , se emplea el campo de velocidad promedio, el cual se colapsa en el espacio (promediado espacial) y se obtiene el perfil de velocidad. Para la zona B los perfiles de velocidad de la componente u se ilustran en la figura 4.19 a, los perfiles en la grafica 4.19 b son adimensionalizados con respecto a la velocidad máxima de cada Re_ϕ , estos perfiles de velocidad nos indican como varia la velocidad desde la zona cercana a la pared del canal hasta una distancia “ y ” en donde la velocidad es máxima, estos perfiles pertenecen a un régimen de flujo turbulento.

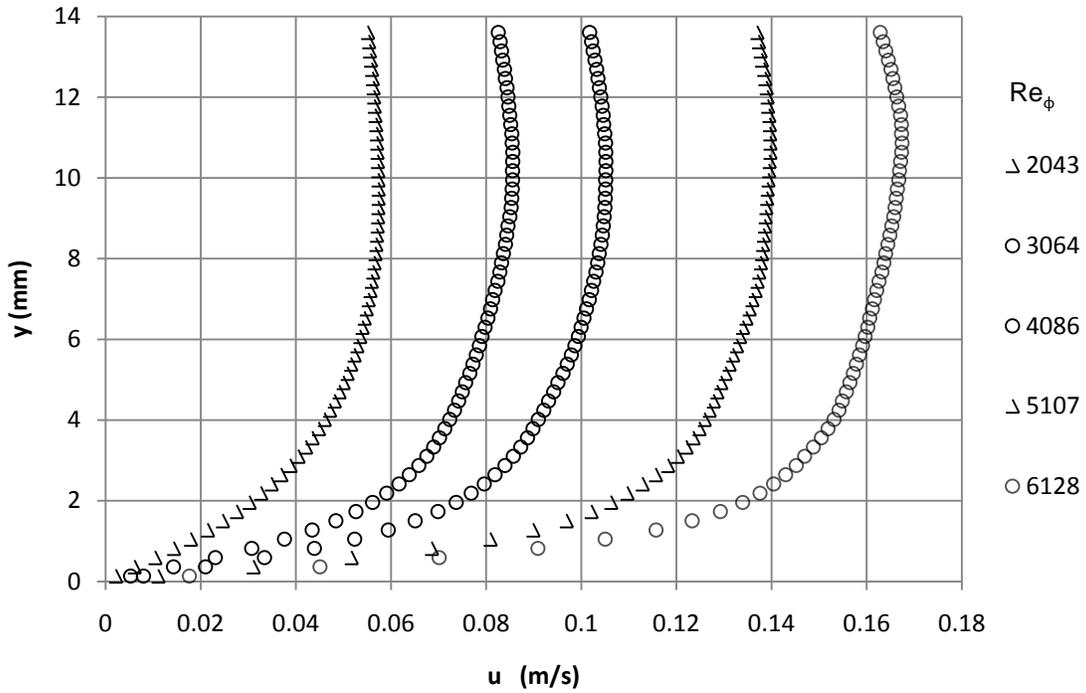


Fig. 4.19 a Perfil de velocidad de la componente u zona B para diferentes Re_ϕ (FFS)

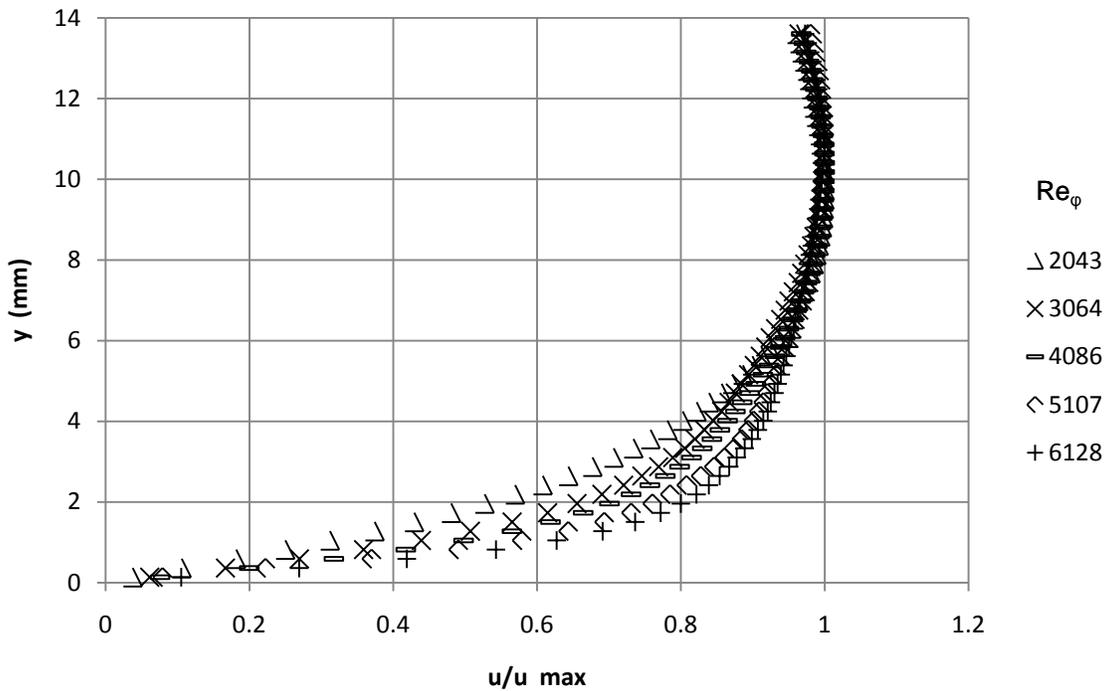


Fig. 4.19 b Perfil de velocidad de la componente u zona B (FFS) adimensionalizados

En la figura 4.20 se presentan los perfiles de velocidad de la componente v para FFS a diferente Re_ϕ ninguna tendencia en el comportamiento de los mismos fue observada a excepción del incremento de la velocidad cuando el Re_ϕ crece, sin embargo la magnitud de la componente de velocidad v es pequeña en comparación con los valores de velocidad obtenidos para la componente de velocidad u .

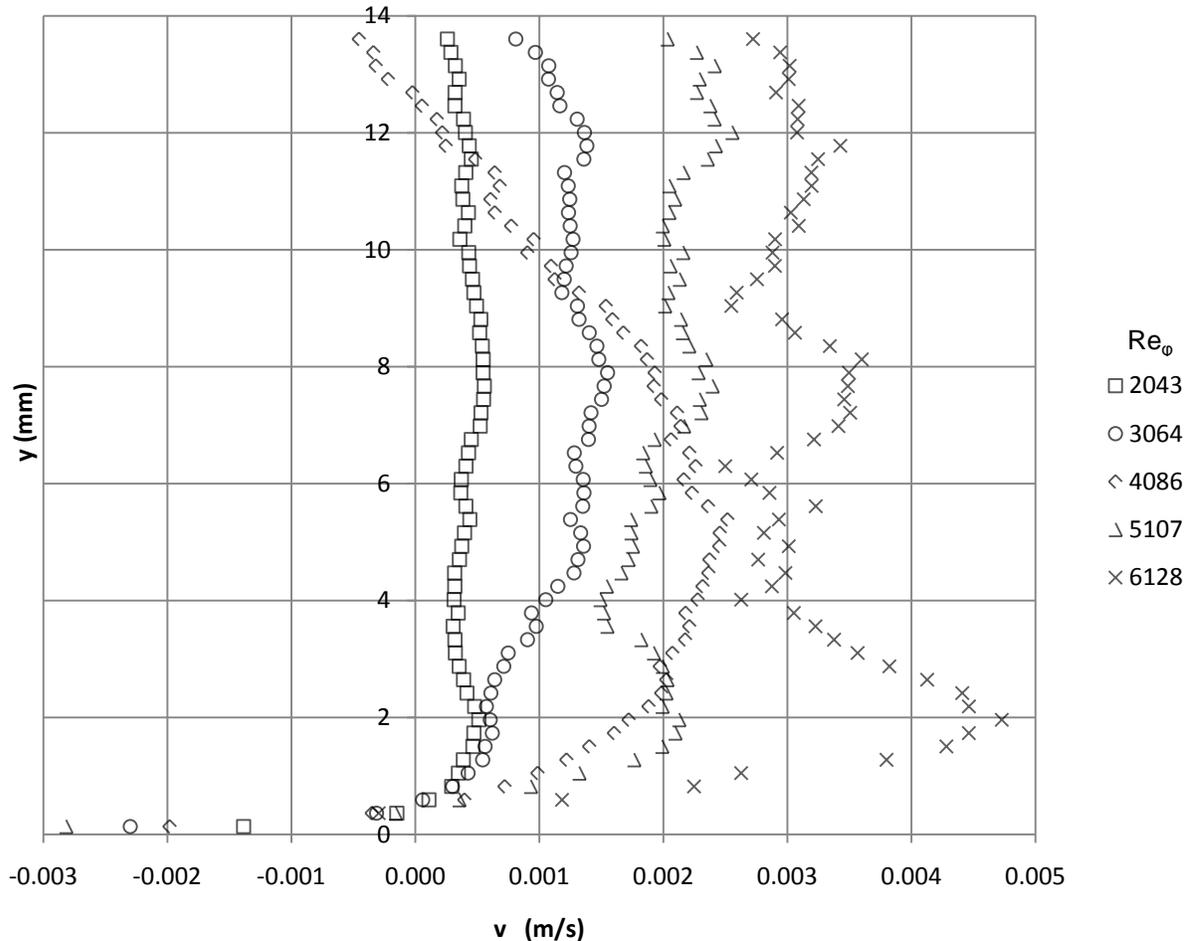


Fig. 4.20 Perfil de velocidad de la componente v zona B para diferentes Re_ϕ (FFS)

En la figura 4.21 se presenta el perfil de velocidad de la componente u en la zona A para FFS y la figura 4.22 ilustra el comportamiento de la componente de velocidad v . En la figura 4.21 se observa que existe una zona de recirculación en la base del escalón representada por las velocidades negativas en la grafica, así mismo existe una variación de la forma del perfil y una modificación de las pendientes conforme " y " aumenta, lo que implica un incremento en el valor del esfuerzo cortante.

Los valores máximos de ambas componentes de velocidad son mostrados en la tabla 4.1

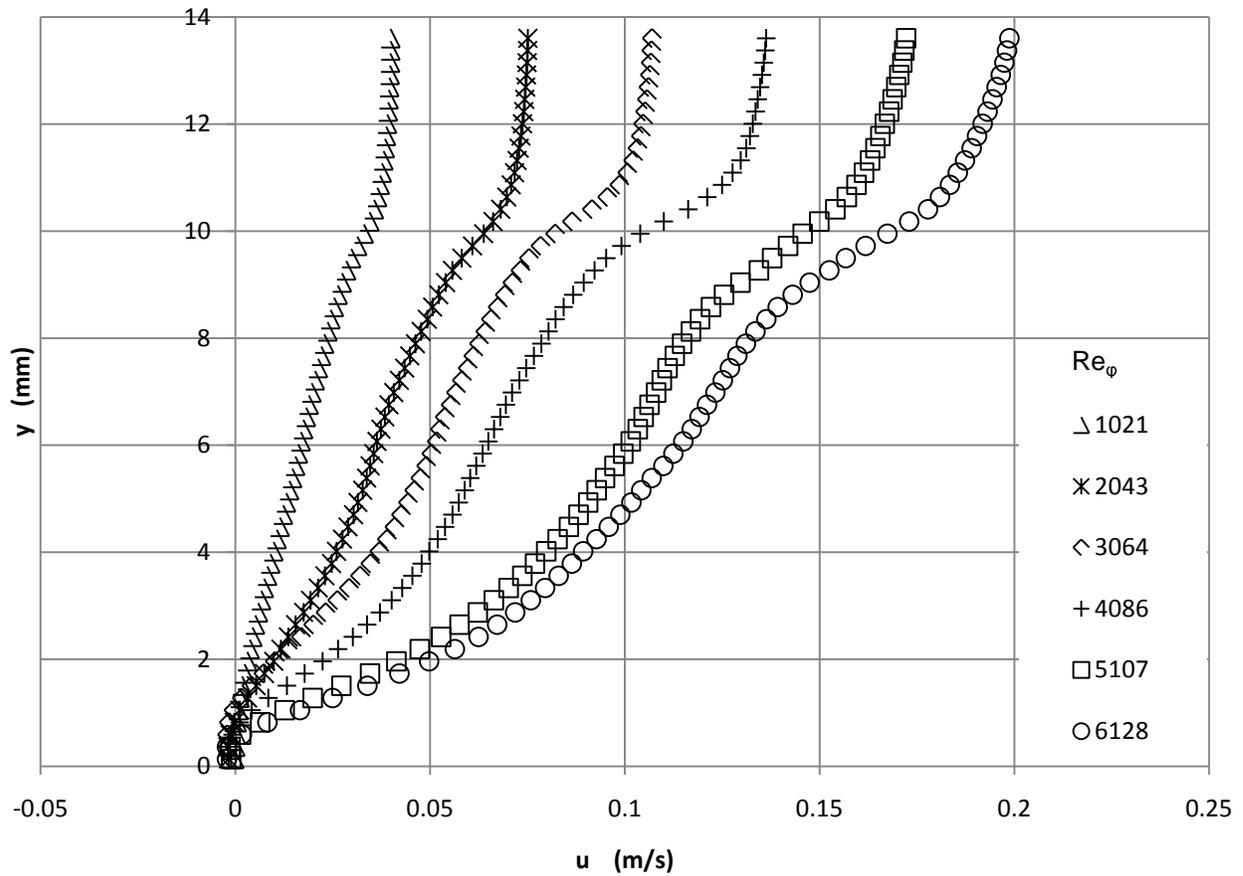


Fig. 4.21 Perfil de velocidad componente u zona A para diferentes Re_ϕ (FFS)

Tabla 4.3 valores máximos de velocidad para las componentes u y v

Re_ϕ	1021	2043	3064	4086	5107	6128
u_{max} (m/s)	0.038	0.073	0.106	0.135	0.172	0.198
y (mm)	13	13	13	13	13	13
v_{max} (m/s)	0.009	0.020	0.029	0.038	0.051	0.060
y (mm)	10	10	10	10	10	10

En la figura 4.22 se observa una zona de recirculación en la base del escalón para la componente de velocidad v , en el punto $y = 10$ mm se observa que existe un valor máximo de velocidad v que es en el borde del escalón, pasando esta zona v tiende a disminuir en magnitud por que la componente de velocidad u se incrementa debido a la contracción.

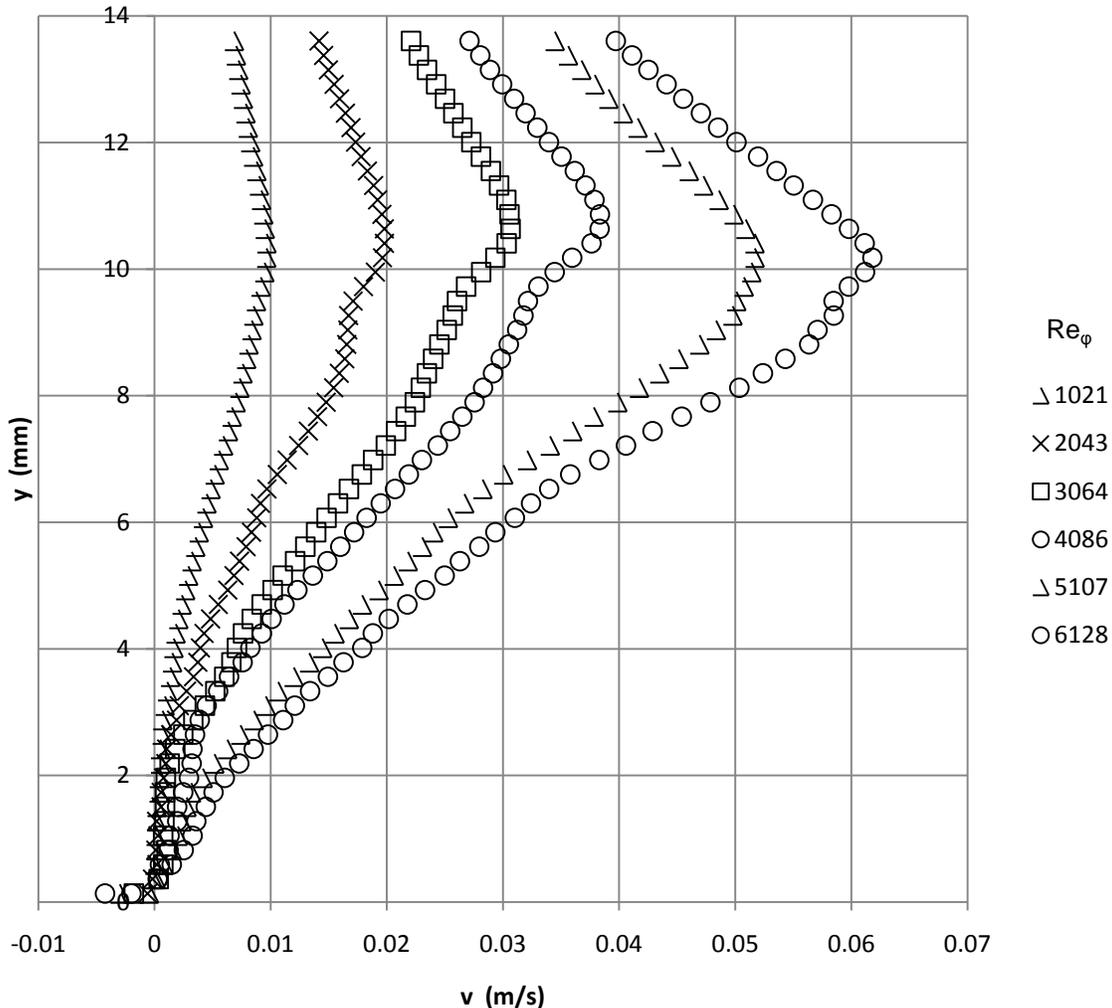


Fig. 4.22 Perfil de velocidad componente v zona del escalón (FFS)

La figura 4.23 es una gráfica representativa de los perfiles de velocidad de la zona A para BFS. En la grafica se observa que cuando el flujo pasa el escalón se forma una zona de recirculación debido a la baja presión creada por la expansión abrupta, esta zona de recirculación da origen a un vórtice mismo que es ilustrado por los vectores de velocidad en la esquina inferior derecha de la imagen. Este vórtice

observado es el vórtice secundario una de las estructuras principales formadas en el caso de flujo BFS. En las secciones siguientes se presenta con más detalle el perfil de velocidad de cada una de las zonas analizadas.

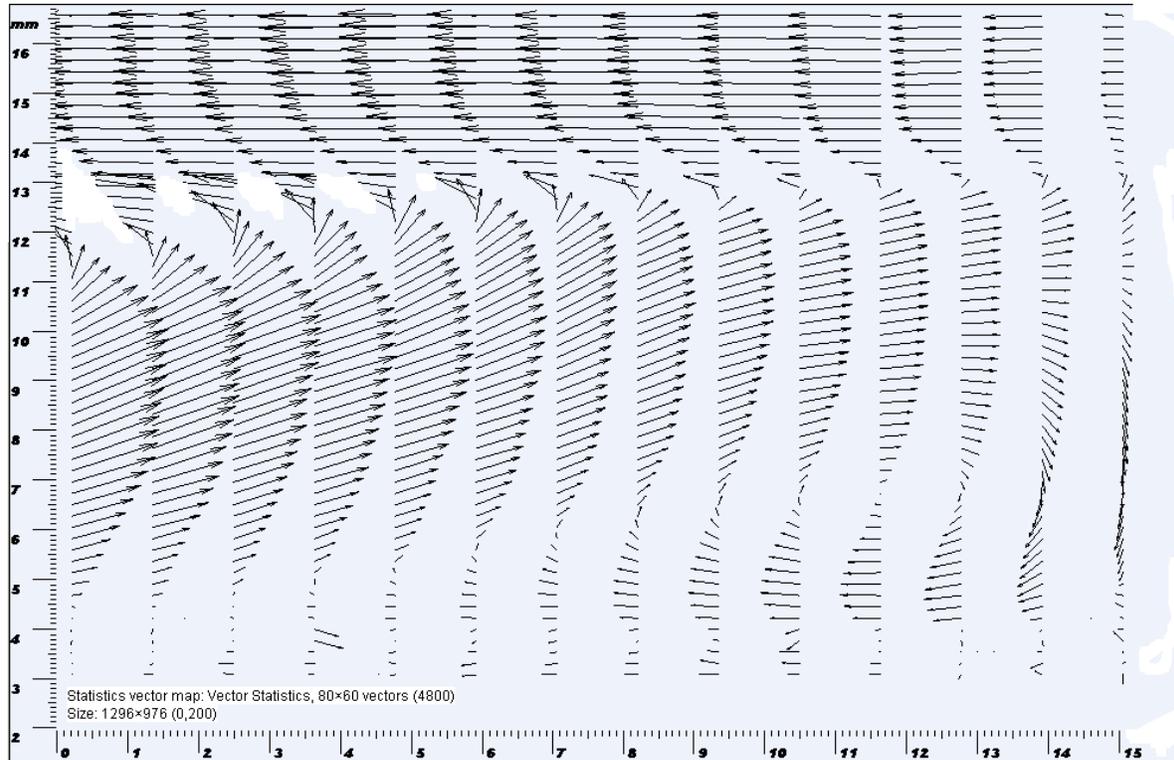


Fig 4.23 Imagen representativa de los perfiles de velocidad para un $Re_{\phi}=6128$

Los perfiles de las graficas 4.24 y 4.25 corresponden al caso de la dirección de flujo hacia atrás (BFS) para la zona B; este flujo proviene de una expansión abrupta por lo cual la velocidad sufre un decremento necesitando de una mayor distancia que en el caso del flujo hacia el frente para que se desarrolle completamente. De acuerdo a la conservación de masa en la zona B para ambos casos de dirección del flujo (FFS y BFS) las velocidades deberían ser iguales. Sin embargo, el caso de BFS no se encuentra completamente desarrollado; por lo que existe una cierta diferencia entre los valores máximos de velocidad para FFS y BFS; esto se muestra en la tabla 4.2. Así mismo, en la tabla 4.3 se observa la diferencia porcentual entre la velocidad máxima de FFS y BFS, el signo negativo indica que $u_{FFS} < u_{BFS}$ en los casos en los que aparece.

Tabla 4.4 Velocidades máximas para la componente u

Re_ϕ	3064	4086	5107	6128
u máx.(m/s) FFS	0.085	0.105	0.139	0.167
u máx. (m/s) BFS	0.084	0.111	0.144	0.170

Tabla 4.5 Porcentaje de variación entre velocidades máximas

Re_ϕ	(%) $(u_{FFS}-u_{BFS})/u_{FFS}$
3064	1.63
4086	-5.89
5107	-3.22
6128	-1.67

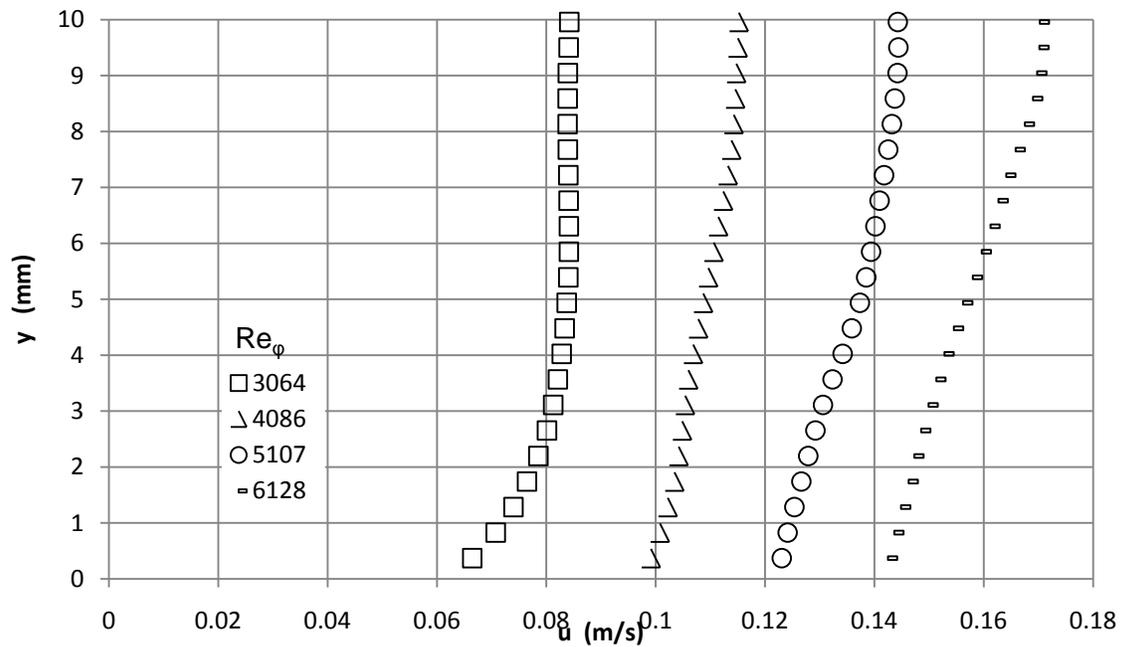


Fig. 4.24 Perfil de velocidad de la componente u zona B (BFS)

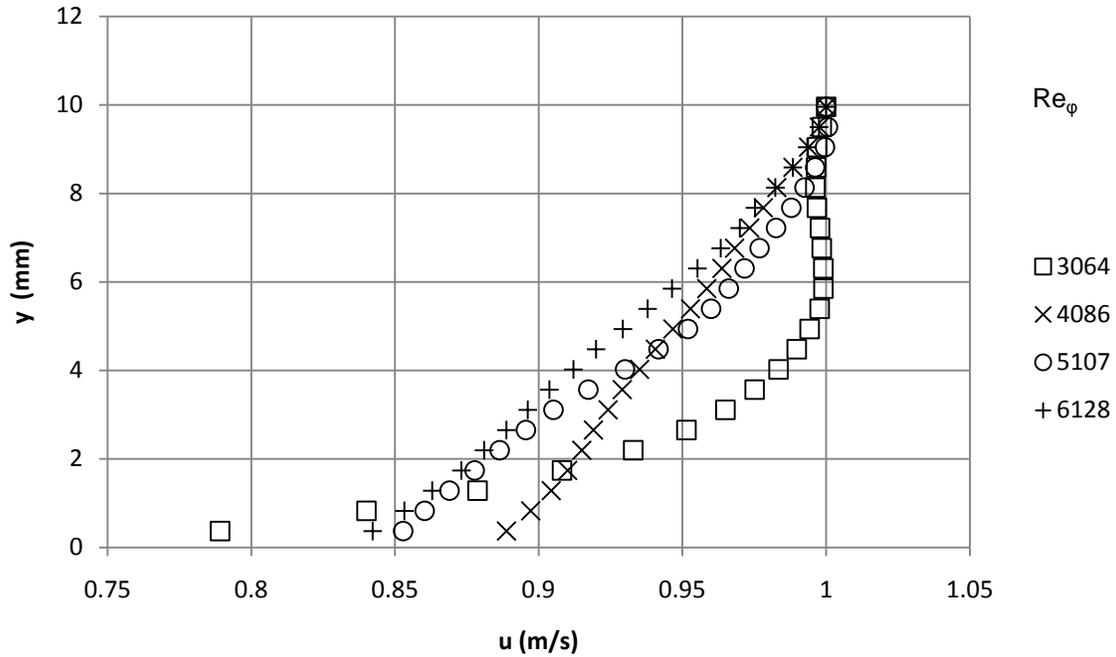


Fig. 4.25 Perfil de velocidad de la componente u zona B (BFS) adimensionalizados

En el caso de la componente de velocidad v no se observa ninguna tendencia en los perfiles de velocidad (Fig. 4.26).

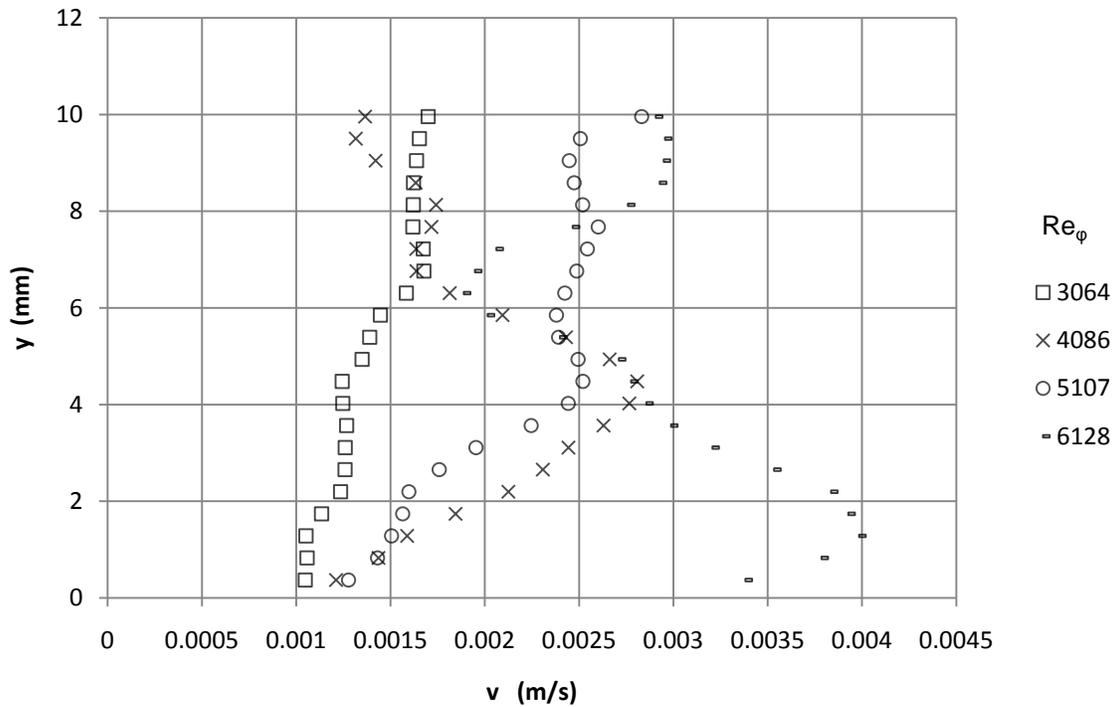
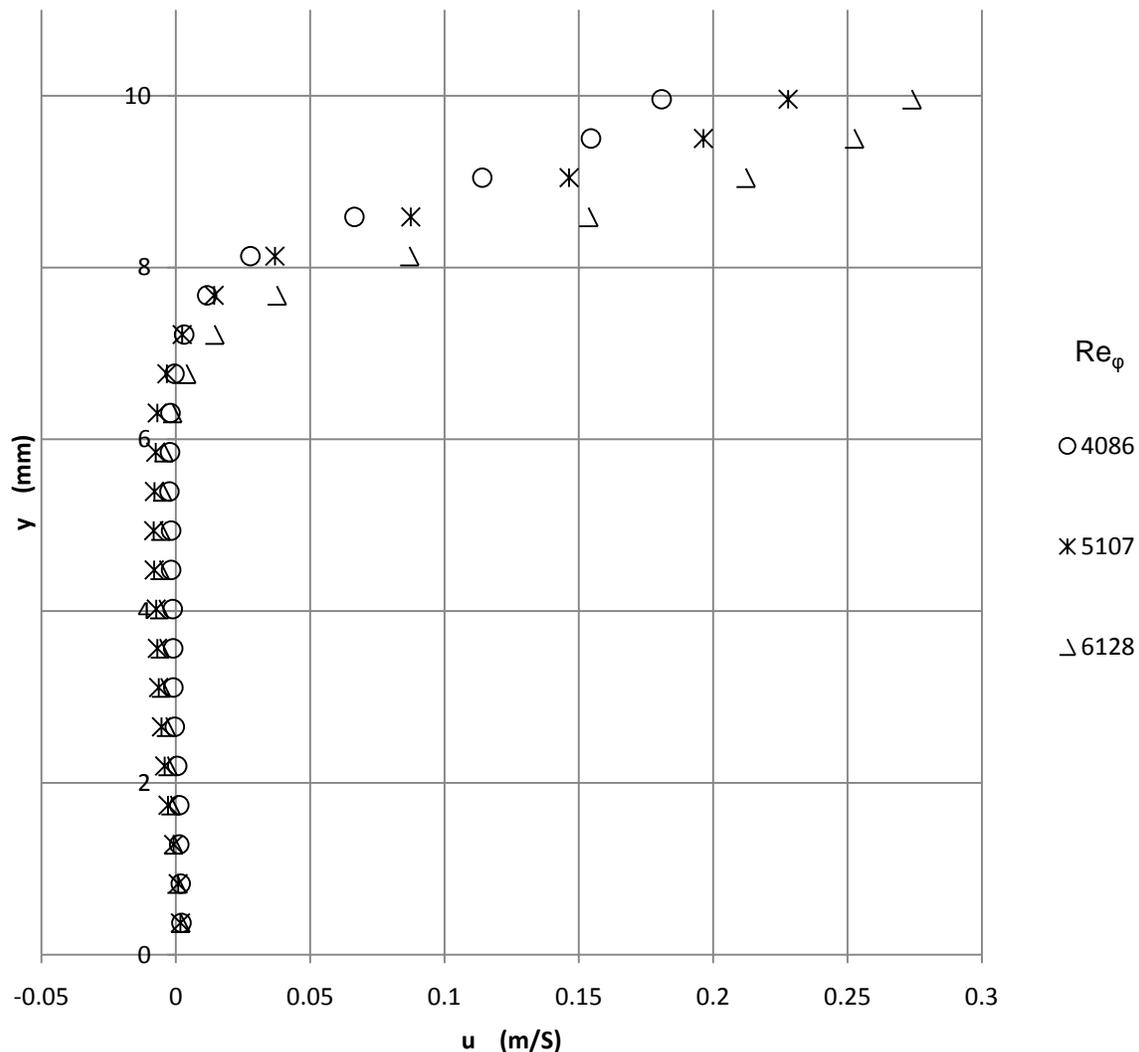


Fig. 4.26 Perfil de velocidad de la componente v zona B para diferentes Re_ϕ (BFS)

Para el flujo en dirección hacia atrás en la zona del escalón (zona A), el comportamiento de la velocidad es descrito por las gráficas 4.27 y 4.28 para distintos Re_ϕ ; en la grafica 4.27 se observa que al pasar la zona del escalón, la componente de velocidad u sufre una disminución considerable causando una zona de recirculación del flujo ilustrada por los valores de velocidad negativa en la grafica, cuando el flujo pasa esta zona, el perfil de velocidad u se recupera y tiende a tomar la forma de un perfil turbulento, lo cual es mostrado por los valores de velocidad máximos para cada Re_ϕ , $Re_\phi = 4086$ $u = 0.1808$ m/s, $Re_\phi = 5107$ $u = 0.2278$ m/s, $Re_\phi = 6128$ $u = 0.2823$ m/s. El punto de velocidad máxima se encuentra en la región cercana a $y = 10$ mm. Este comportamiento de los perfiles de velocidad es similar al obtenido por S.D Hall et al. [9].



4.27 Perfil de velocidad de la componente u en la zona A para diferentes Re_ϕ (BFS)

La componente en dirección perpendicular al flujo (componente v) tiende a incrementar su magnitud desde un valor cero en la pared hasta un valor máximo, los valores máximos de velocidad son: para $Re_\phi = 4086$, $v = 0.0026$ m/s; $Re_\phi = 5107$, $v = 0.0041$ m/s; $Re_\phi = 6128$, $v = 0.0069$ m/s y se localizan en $y = 5.8$ mm (ver fig. 4.28), después de este valor se tiene una disminución gradual debido a que se deja atrás la zona del escalón (zona de recirculación) y la componente de velocidad en dirección del flujo u tiende a incrementar su magnitud.

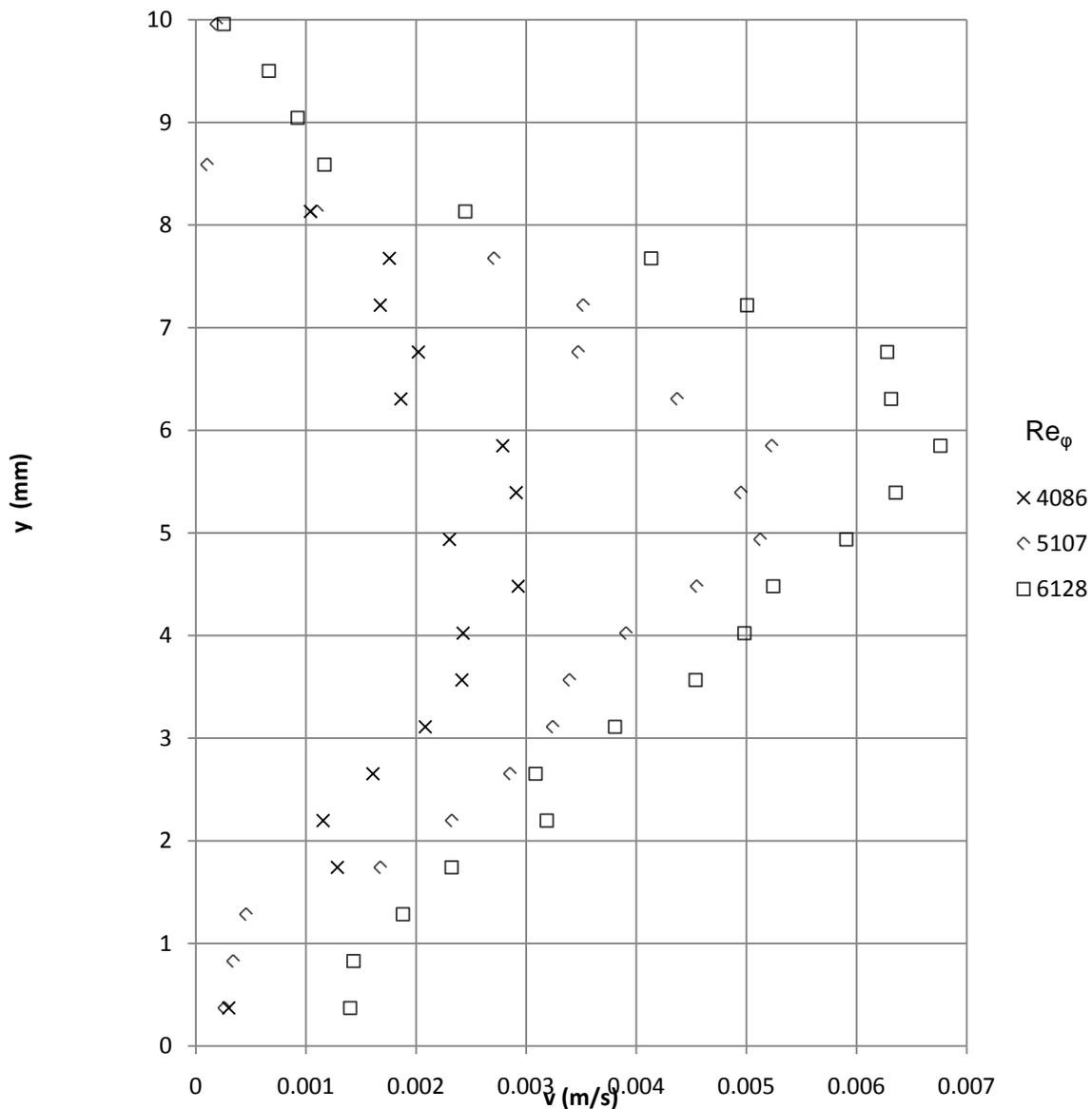


Fig. 4.28 Perfil de velocidad de la componente v en la zona A para diferentes Re_ϕ (BFS)

4.4 Evaluación de la rms para las fluctuaciones de velocidad

La rms $\sqrt{(u - \bar{u})^2}$ indica la variación de la velocidad que presenta un flujo con respecto a condiciones de velocidad promedio situación por la cual es de gran importancia el cálculo de la misma en el estudio de flujos turbulentos [19], en el desarrollo de este trabajo se obtuvieron grandes cantidades de datos los cuales implican un tiempo muy grande de procesamiento en software convencional tales como son hojas de cálculos o bases de datos; debido a esto se utilizó una herramienta de programación bastante útil y confiable llamada labview con este software se desarrollaron diversas cantidades de código para poder procesar, calcular y graficar la información obtenida. Las gráficas obtenidas se derivaron primero de un promedio estadístico temporal y después de un promedio espacial. En la zona B para el flujo hacia el frente el comportamiento de la rms es ilustrado por las graficas 4.29 y 4.30 para diferentes Re_ϕ . En la gráfica 4.29 se observan dos aspectos importantes; primero que el valor máximo de la u_{rms} se incrementa conforme el número de Re es aumentado, segundo, la posición del máximo valor de u_{rms} disminuye conforme el Re es incrementado. Así mismo se observa que el valor máximo del pico de u_{rms} y disminuye conforme se incrementa el Re_ϕ . Los valores de u_{rms} máxima obtenidos y su posición correspondiente para distintos Re_ϕ son mostrados en la tabla 4.6. En la Fig. 4.30 dos factores importantes fueron observados primero: la v_{rms} aumenta conforme el número de Re_ϕ es incrementado segundo: la pendiente del perfil de la v_{rms} cambia en un punto de posición “y” determinado, en este punto el perfil tiende a estabilizarse (tiende a ser una recta horizontal). Los valores de la v_{rms} y posición, donde este cambio ocurre son mostrados en la tabla 4.6

Tabla 4.6 valores de rms y posición para las componentes u y v

Re_ϕ	2043	3064	4086	5107	6128
u_{rms} (m/s)	0.0096	0.01492	0.02145	0.02616	0.02969
y (mm)	2.64	1.96	1.73	1.048	0.1356
v_{rms} (m/s)	0.0038	0.0067	0.0076	0.0101	0.0128
y (mm)	7.8	6.75	5.3	3.5	3.1

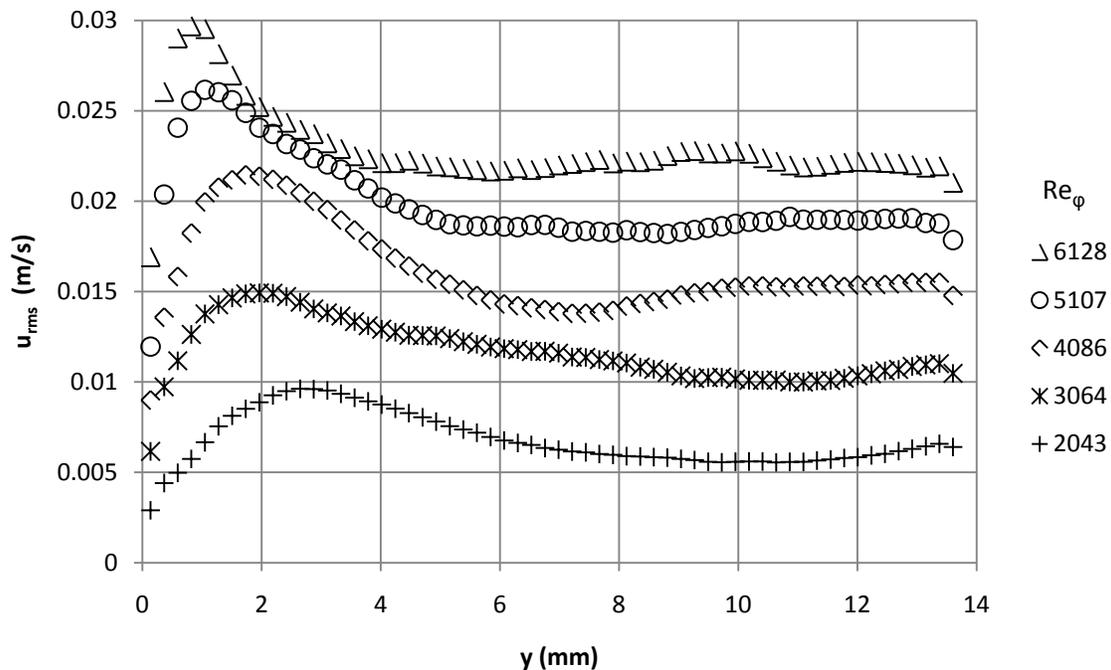


Fig. 4.29 Perfil de la u_{rms} zona B para diferentes Re_ϕ (FFS)

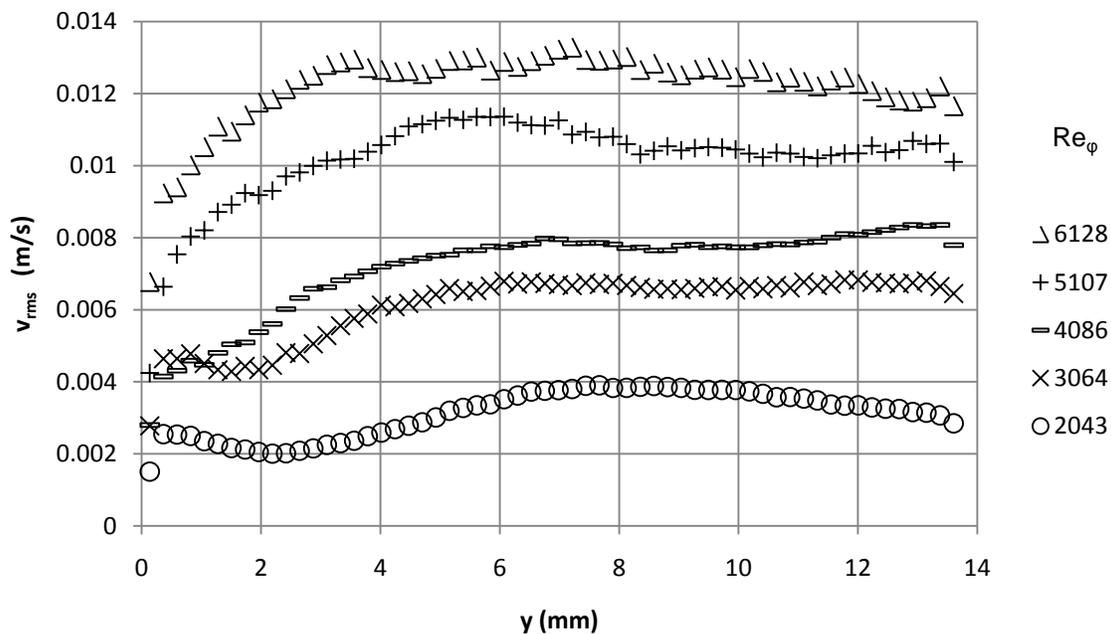


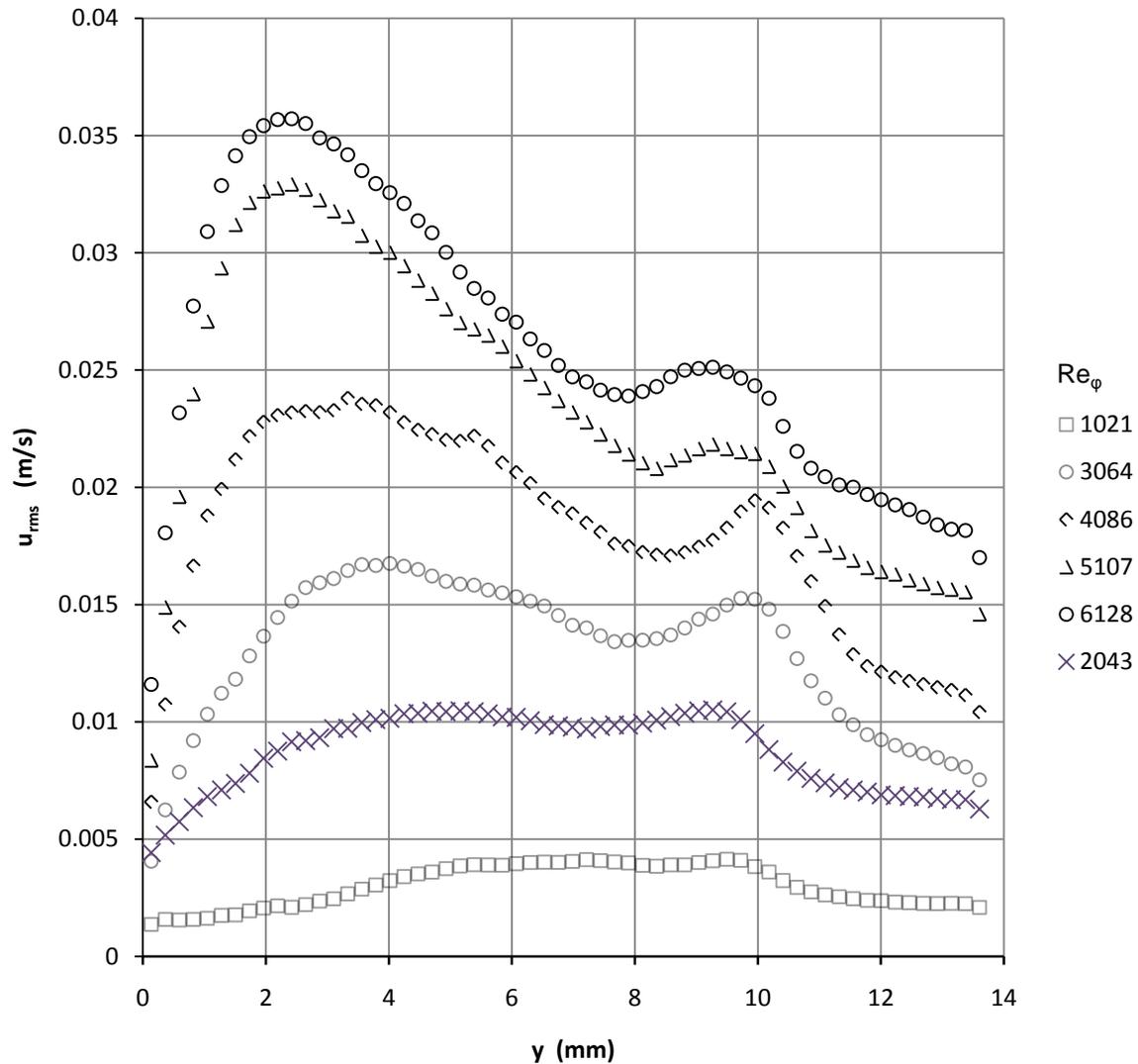
Fig 4.30 Perfil de la v_{rms} zona B para diferentes Re_ϕ (FFS)

En la gráfica 4.31 dos aspectos importantes son apreciables: primero, el valor de la u_{rms} se incrementa conforme el Re_ϕ crece; segundo dos valores en la grafica de u_{rms} sobresalen: el primero (de izquierda a derecha) es el valor de la u_{rms} máxima, en él se puede observar un incremento conforme el número de Re_ϕ crece; pero la posición en la coordenada “y” de este valor máximo disminuye conforme el Re_ϕ es incrementado es decir tiende a acercarse a la pared del canal; esto es demostrado por los valores encontrados para cada Re_ϕ los cuales son mostrados en la tabla 4.7. Este valor de u_{rms} es formado debido al elevado valor de esfuerzo cortante que existe en la zona cercana a la pared del canal.

En el caso del segundo valor sobresaliente se observa un incremento en su magnitud conforme el número de Re_ϕ es aumentado y una disminución en su posición “y” conforme el Re_ϕ se incrementa. Este segundo valor aparece debido a las fluctuaciones de la velocidad en la zona cercana a la pared del escalón, es decir el esfuerzo cortante originado por la cara del escalón provoca fluctuaciones de la velocidad que dan como resultado una capa de separación que es el punto donde se incrementa el segundo valor sobresaliente observado en la gráfica.

Tabla 4.7 valores de rms y posición para las componentes u y v

Re_ϕ	1021	2043	3064	4086	5107	6128
u_{rms} (m/s)	0.004142	0.0105	0.0167	0.0218	0.033	0.0342
y (mm)	9.4	9.6	4	3.7	2.1	2.1
v_{rms} (m/s)	0.0022	0.0061	0.0097	0.0116	0.0149	0.0357
y (mm)	8.8	9.4	9.7	9.9	2.6	2.41

Fig. 4.31 Perfil de la u_{rms} zona A para diferentes Re_ϕ (FFS)

En la gráfica 4.32 puede apreciarse que la v_{rms} aumenta conforme el Re_ϕ es incrementado; así mismo se observa que la pendiente del perfil de la v_{rms} cambia en una determinada posición “y”; pero el perfil no tiende a ser una línea recta horizontal tiene fluctuaciones a lo largo de la posición “y”, los valores máximos para la v_{rms} se presentan en la tabla 4.7.

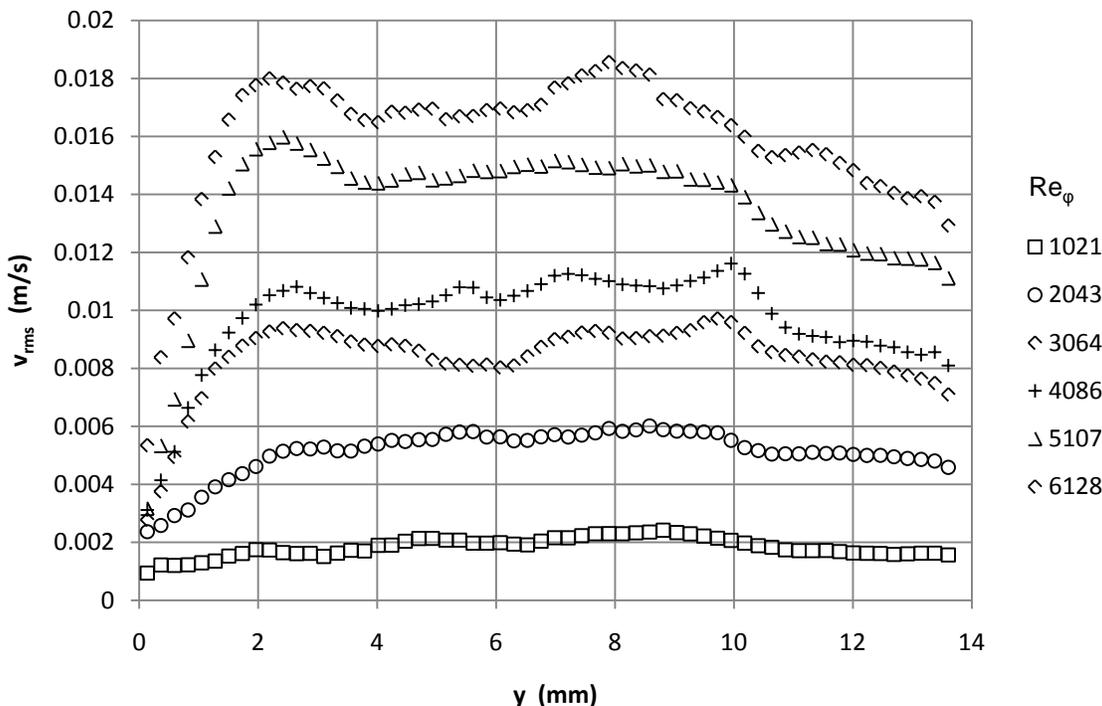


Fig. 4.32 perfil de v_{rms} en la zona A para diferentes Re_ϕ (FFS)

El mismo análisis llevado a cabo para la dirección del flujo hacia el frente (FFS) se realizó para la dirección del flujo hacia atrás (BFS). Las gráficas que a continuación se presentan indican el comportamiento de la u_{rms} y v_{rms} de las zonas estudiadas. La grafica 4.33 muestra que conforme el número de Re_ϕ es incrementado la u_{rms} crece lo cual es corroborado por los valores obtenidos para distintos Re_ϕ , y que son mostrados en la tabla 4.8. Para la v_{rms} el aumento de la misma es proporcional al aumento en el número de Re_ϕ pero aquí se observa que el perfil de la v_{rms} tiende a ser prácticamente una línea recta horizontal. Los valores de la v_{rms} máxima son presentados en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 valores de la rms y posición para las componentes u y v

Re_ϕ	3064	4086	5107	6128
u_{rms} (m/s)	0.011	0.017	0.023	0.026
y (mm)	0.37	3.5	5.3	3.1
v_{rms} (m/s)	0.006	0.013	0.016	0.019
y (mm)	9.50	4.40	4.90	2.60

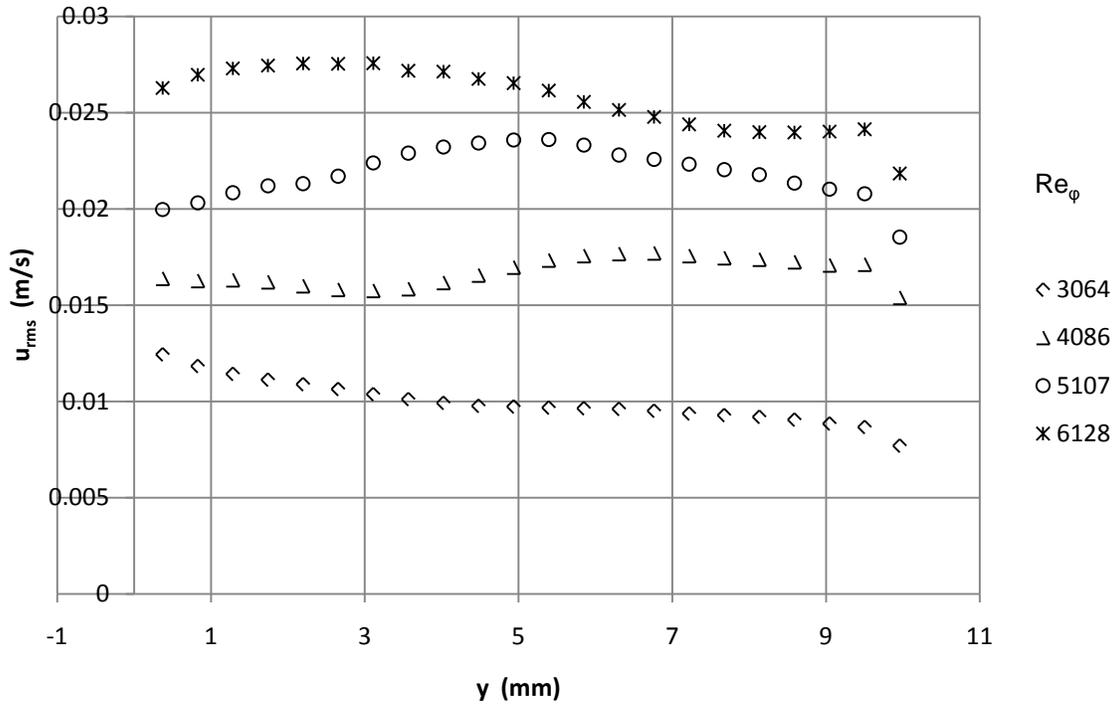


Fig. 4.33 Perfil u_{rms} zona B para diferentes Re_ϕ (BFS)

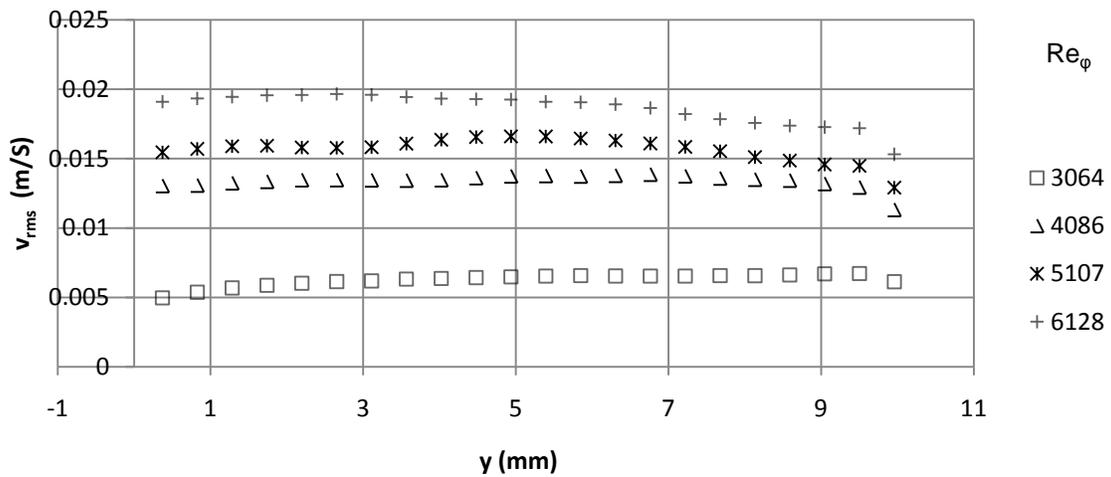


Fig. 4.34 Perfil v_{rms} zona B para diferentes Re_ϕ (BFS)

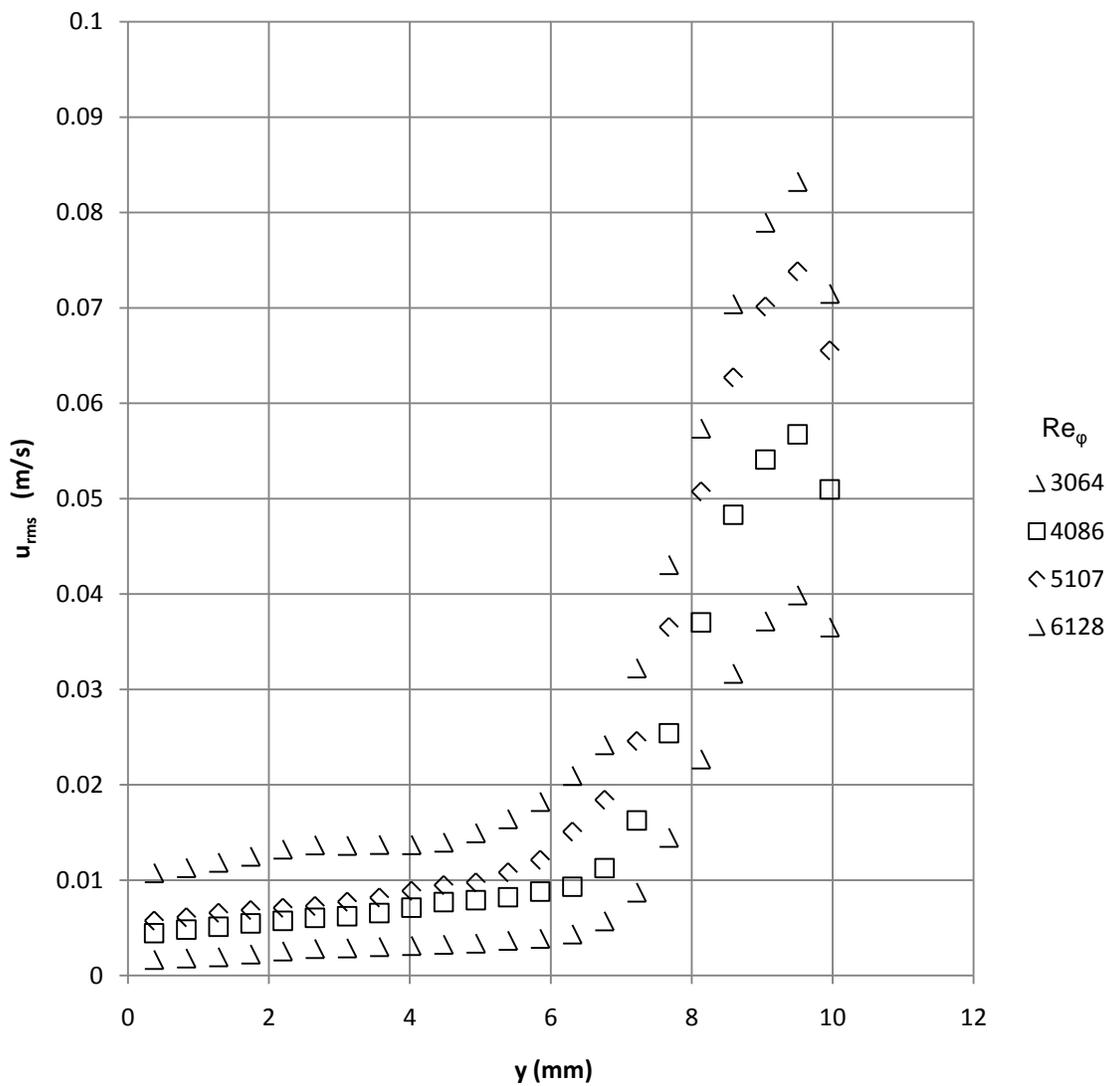
En la figura 4.35 se observa que el valor máximo de u_{rms} aumenta conforme el número de Re_{ϕ} es incrementado. Así mismo se puede observar que la posición de este punto máximo se encuentra en la región $0.8 < y/h < 1$; este valor máximo es originado por la capa que separa al vórtice primario del vórtice secundario. Al entrar en contacto los extremos del vórtice primario con los extremos del vórtice secundario se genera un elevado valor de esfuerzo cortante lo cual da como resultado este valor máximo observado en la figura. Los valores de u_{rms} máxima para los distintos Re_{ϕ} analizados son mostrados en la tabla 4.9. Una observación importante es que el punto de posición “y” del valor de u_{rms} máxima no cambia.

En la gráfica 4.36 un comportamiento similar al del perfil de la u_{rms} es observado para el perfil de la v_{rms} . En la grafica se observa que el punto máximo de v_{rms} no cambia conforme el Re_{ϕ} es incrementado, el valor de la v_{rms} crece pero es menor en magnitud que el valor de la u_{rms} . Los valores de la v_{rms} máxima para los distintos Re_{ϕ} analizados son presentados en la tabla 4.9.

Los valores observados en la u_{rms} del caso BFS resultan ser mayores a los de la u_{rms} del caso FFS en la misma zona A para ambas direcciones del flujo, se observó que la u_{rms} máxima para el BFS es 2.43 veces más grande que la u_{rms} máxima del caso FFS, también se observa que en esta misma zona la u_{rms} y v_{rms} del FFS presentan dos valores sobresalientes mientras que, el BFS presenta un solo valor máximo este es originado por una capa cortante o también llamada capa de separación que en el caso FFS es originada por la separación del flujo mientras que en el caso BFS es provocada por la interacción vórtice primario-secundario, de acuerdo con lo mencionado anteriormente se puede decir que el caso BFS resulta ser más desorganizado que el caso FFS para la zona A.

Tabla 4.9 valores de rms y posición para las componentes u y v

Re_ϕ	3064	4086	5107	6128
u_{rms} (m/s)	0.039	0.056	0.073	0.083
y (mm)	9.5	9.5	9.5	9.5
v_{rms} (m/s)	0.017	0.022	0.029	0.037
y (mm)	9.5	9.5	9.5	9.5

Fig. 4.35 perfil de la u_{rms} zona A para diferentes Re_ϕ (BFS)

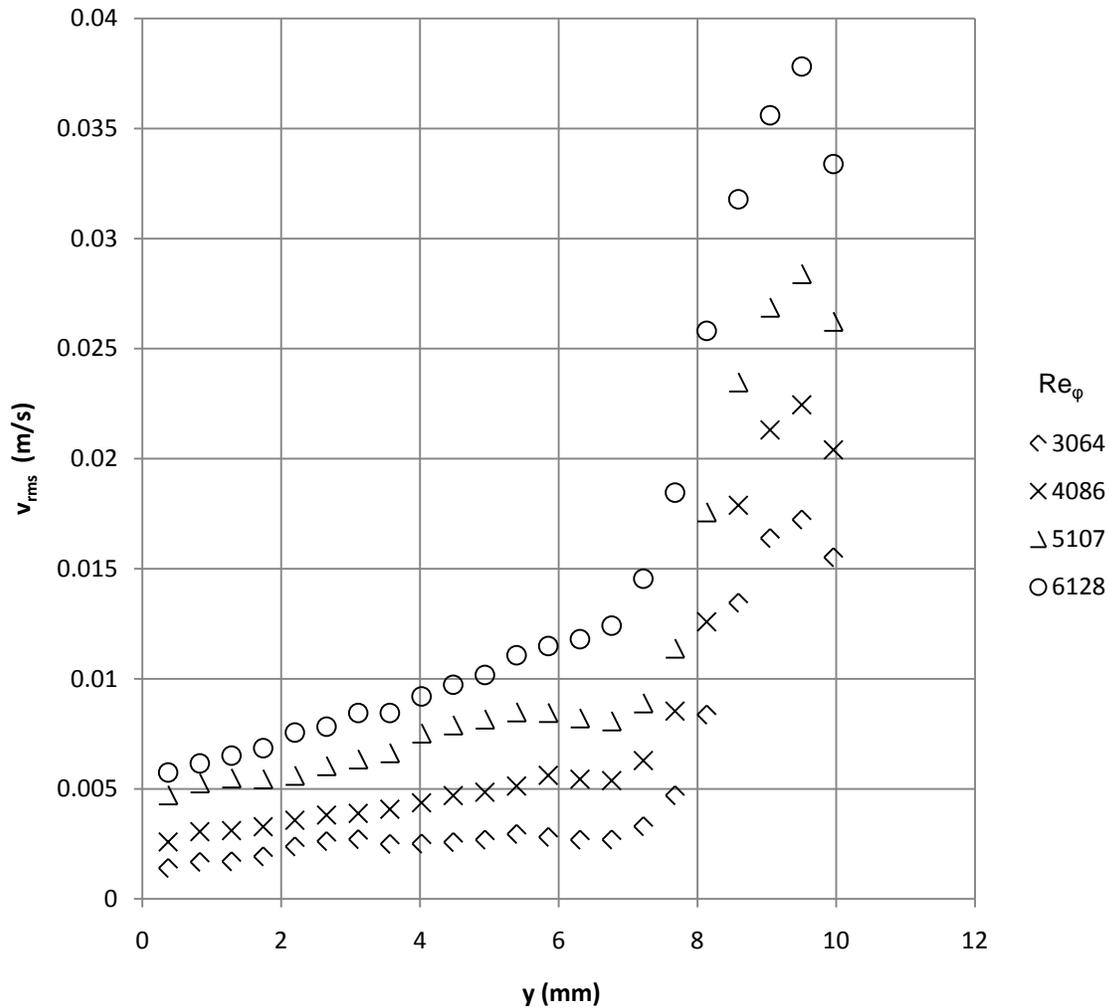


Fig. 4.36 Perfil de la v_{rms} zona A para diferentes Re_{ϕ} (BFS)

4.5 Vorticidad promedio

La vorticidad definida como $\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ es una medida de la rotación de las partículas de un fluido a lo largo de un eje definido por un vector perpendicular al plano de estudio [21]. En este caso el área analizada es definida por los campos de velocidad mostrados en la sección 4.2; por lo que la componente del vector vorticidad ω_z es perpendicular a estos planos (dirección z).

Para la zona B del caso de flujo FFS las figuras 4.37 a 4.41 ilustran la vorticidad promedio obtenida a diferentes Re_ϕ ; en ellas se puede observar que la magnitud de la vorticidad $|\omega_z|$ es mayor en la zona cercana a la pared $0 < y < 2$ mm, con un valor de vorticidad $\omega_z = -0.002 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$ (color azul); en este caso la rotación predominante es en sentido de las manecillas del reloj; así mismo, se ilustra que $|\omega_z|$ disminuye en magnitud conforme y se acerca a 10 mm. En la región $y > 10$ mm se presenta un incremento de la vorticidad y un cambio de rotación, predominando $\omega_z = 0.0001 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$ (color rojo); en este caso la rotación predominante es en sentido contrario de las manecillas del reloj.

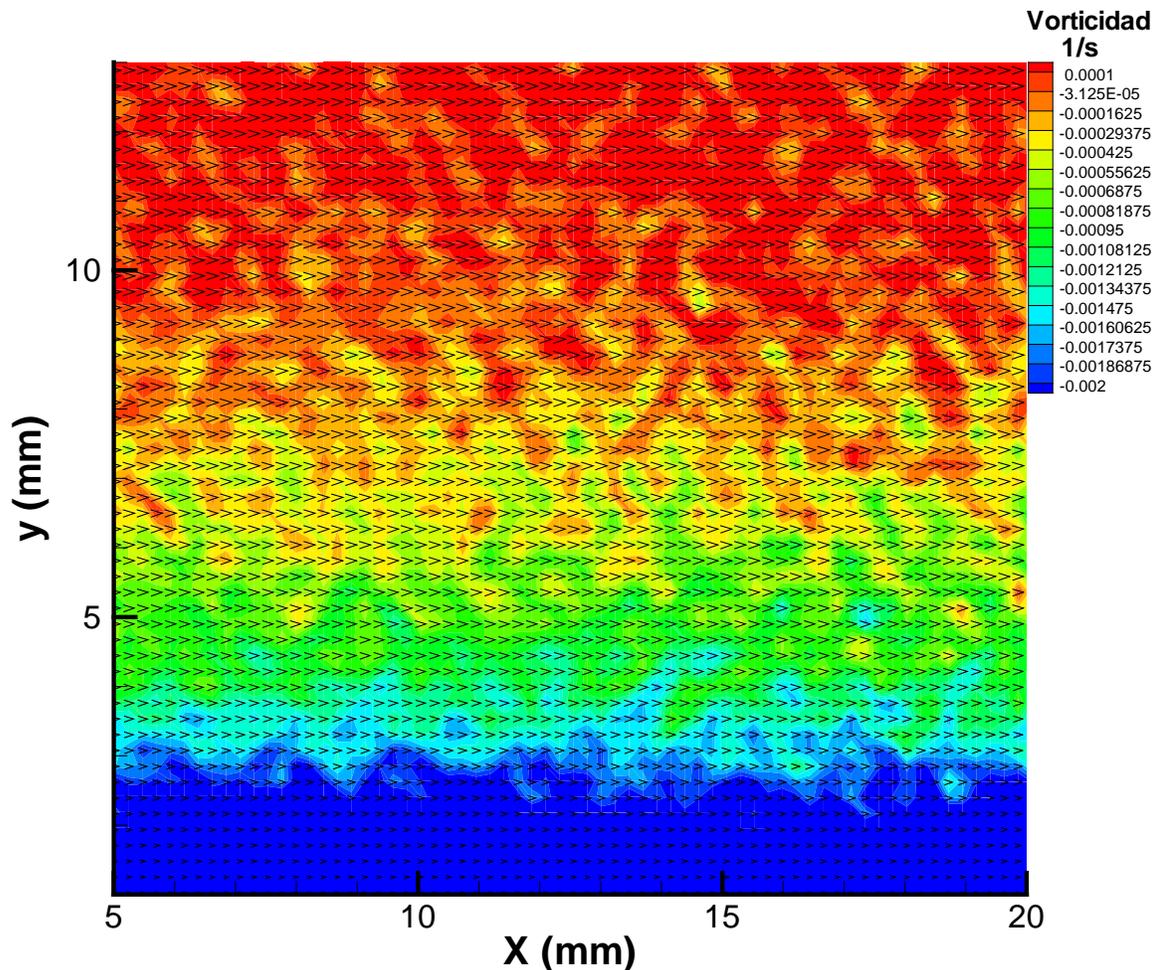


Fig. 4.37 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 2043$ para FFS

Las figuras 4.38 y 4.39 ilustran el cambio en la vorticidad. En la zona cercana a la pared la vorticidad tiene un valor máximo negativo (zona azul), conforme “y” crece la vorticidad cambia a un valor de $\omega_z \approx 0$, después la vorticidad cambia de signo a un valor positivo (zona roja)

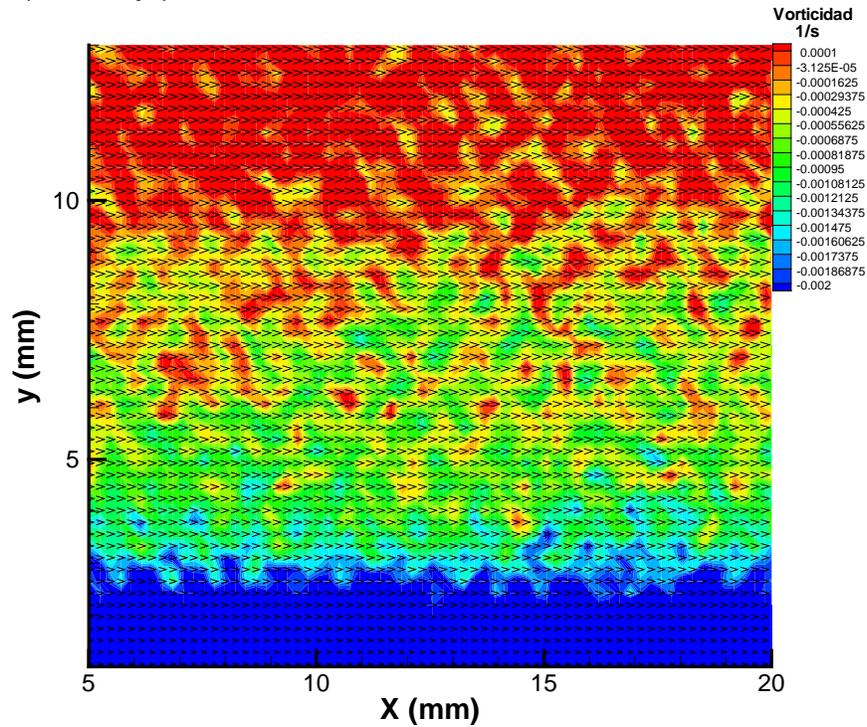


Fig. 4.38 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 3064$

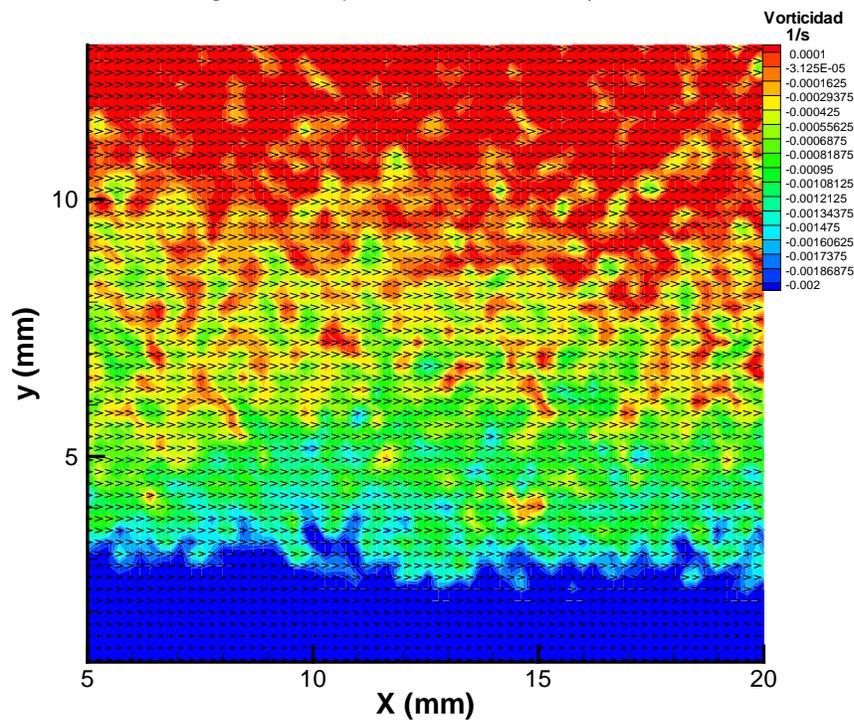


Fig. 4.39 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 4086$

Las figuras 4.40 y 4.41 ilustran un incremento en la vorticidad esto se puede observar por aumento en área de la zona azul.

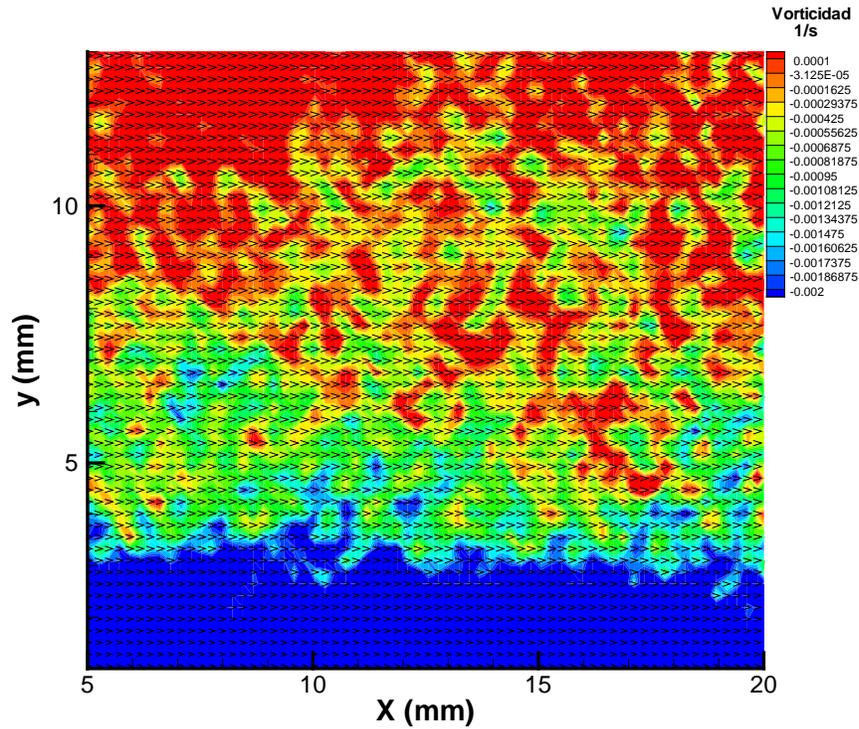


Fig. 4.40 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 5107$

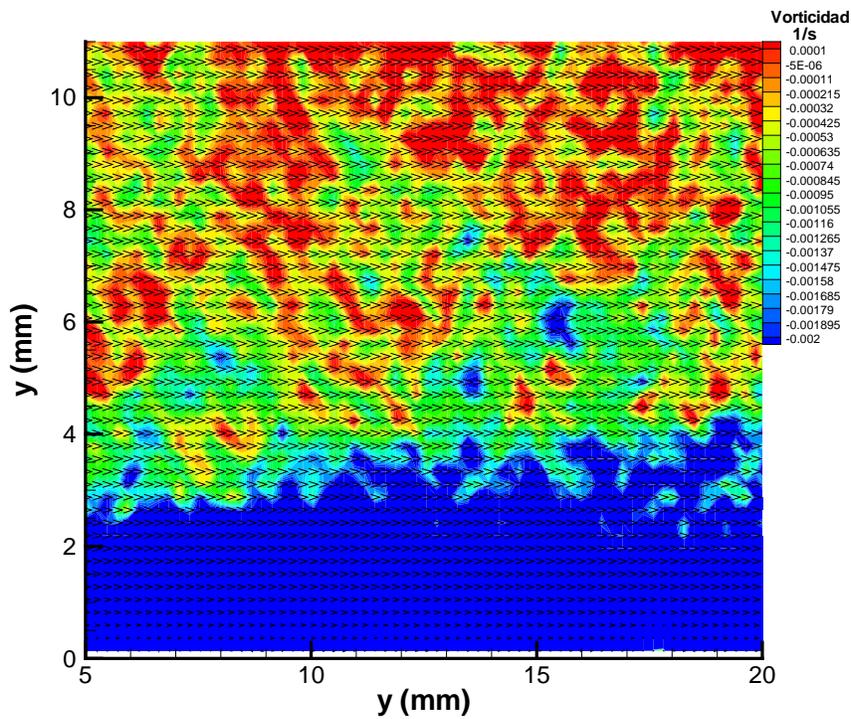


Fig. 4.41 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 6128$

Para la zona A del caso del flujo hacia el frente (FFS) la vorticidad es mostrada por las figuras 4.42 a 4.48, en ellas se puede observar una zona de vorticidad negativa, $\omega_z = -0.0045 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$, en la región, $0 < y < 6 \text{ mm}$; así mismo, se muestra que las regiones con este valor de vorticidad aumentan conforme se incrementa el Re_ϕ . De igual forma se observa que en la zona en la que el vórtice se separa $7 \text{ mm} < y < 10 \text{ mm}$ el valor de vorticidad ω_z es aproximadamente $-0.0045 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$. Por otra parte en la base inferior del canal y en la cara del escalón aparecen zonas con vorticidad positiva $\omega_z = 0.001 \text{ s}^{-1}$ esta es ocasionada por el elevado valor de esfuerzo cortante en la zona cercana a las paredes. La dirección del flujo es ilustrada por los vectores de velocidad de la fig. 4.42

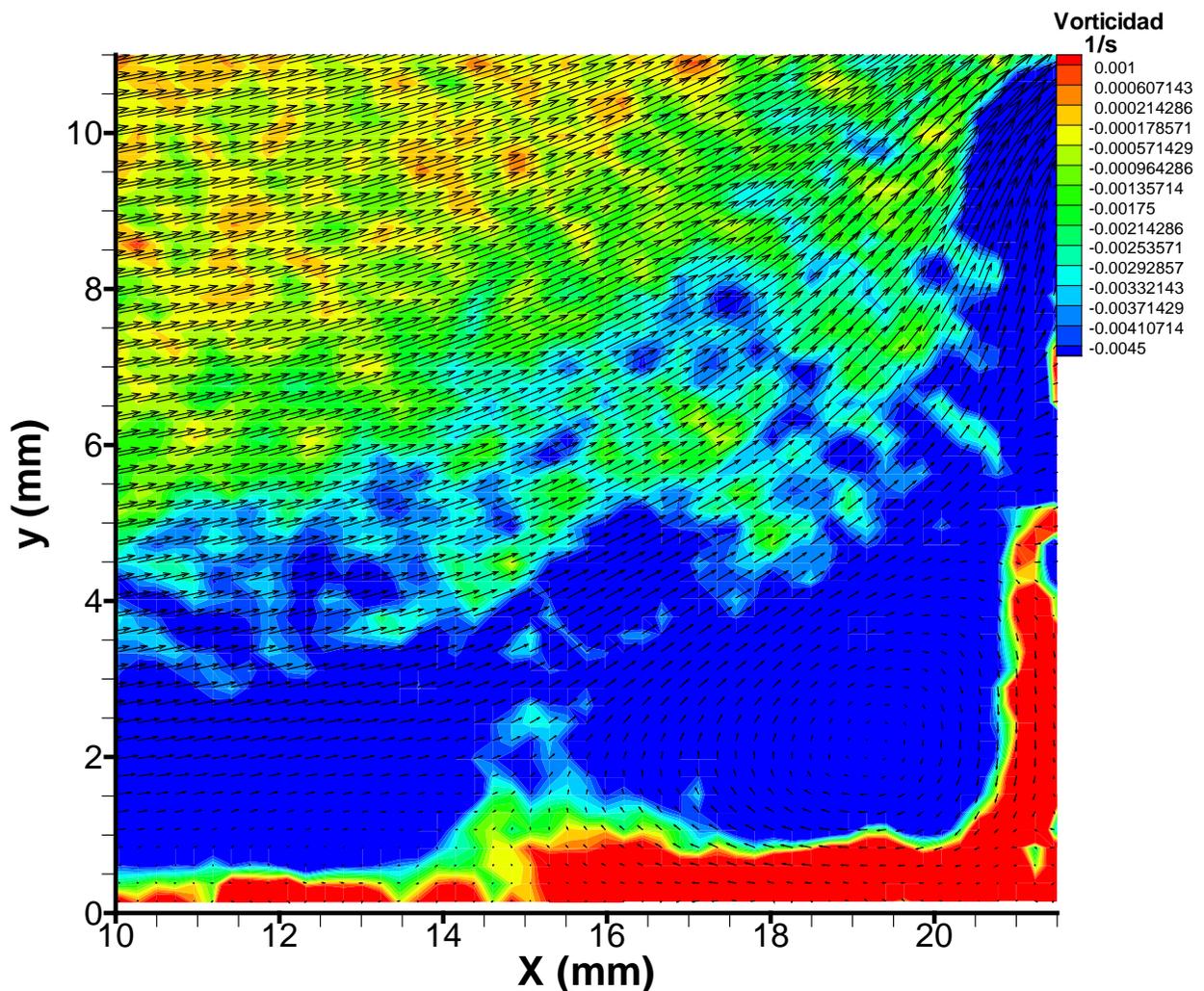
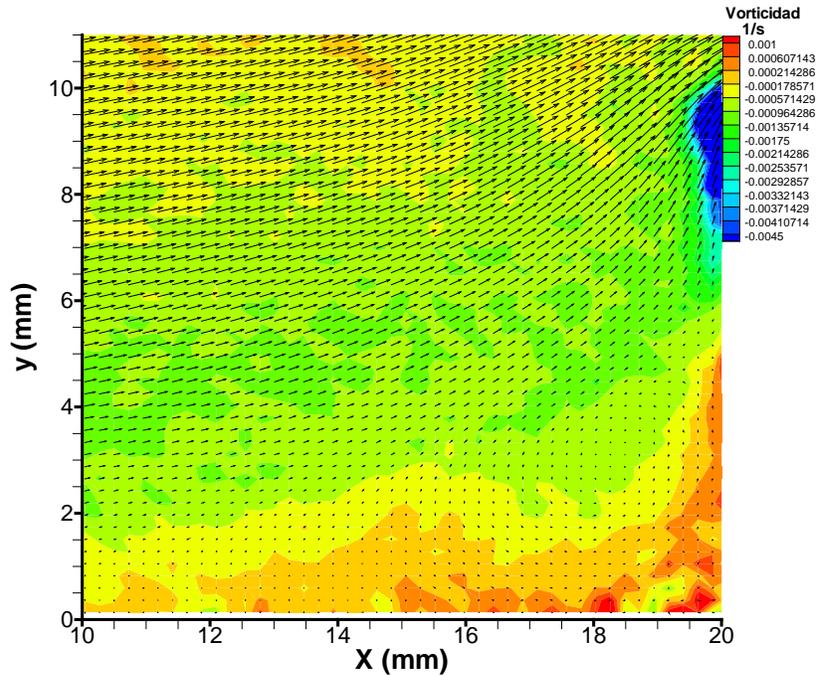
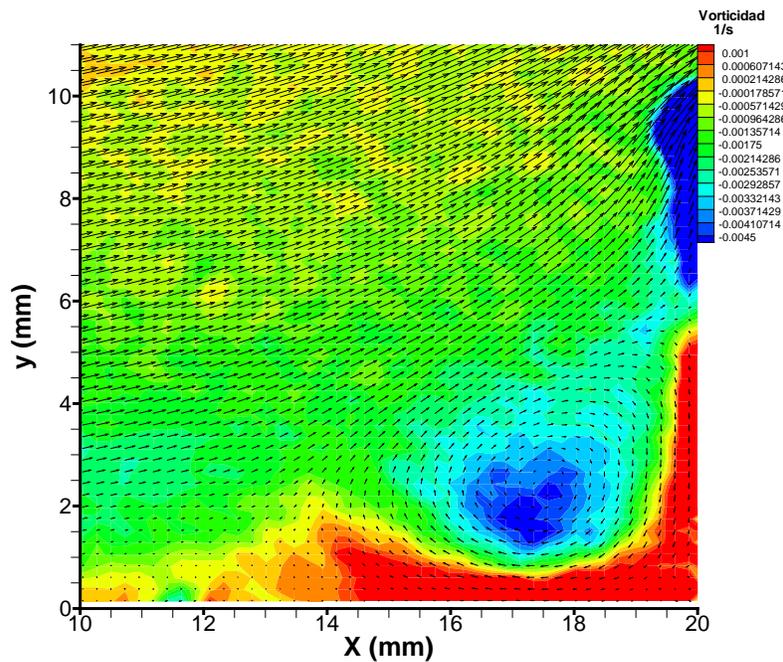


Fig. 4.42 Mapa de vorticidad promedio para un flujo hacia el frente del escalón (FFS)

En la figura 4.43 no se observa una zona grande de vorticidad negativa (zona azul) a excepción de la región $7 < y < 10$ mm en la pared del escalón. En la figura 4.44 se observa que aparece una región más intensa de vorticidad negativa lo cual es indicio del vórtice pues es una región de baja velocidad

Fig. 4.43 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 1021$ Fig. 4.44 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 2043$

En las figuras 4.45 y 4.46 la zona del vórtice está claramente definida (zona azul), se observa que la región que aparecía sola en un inicio ($7 < y < 10$ mm) crece hasta encontrarse con la región del vórtice.

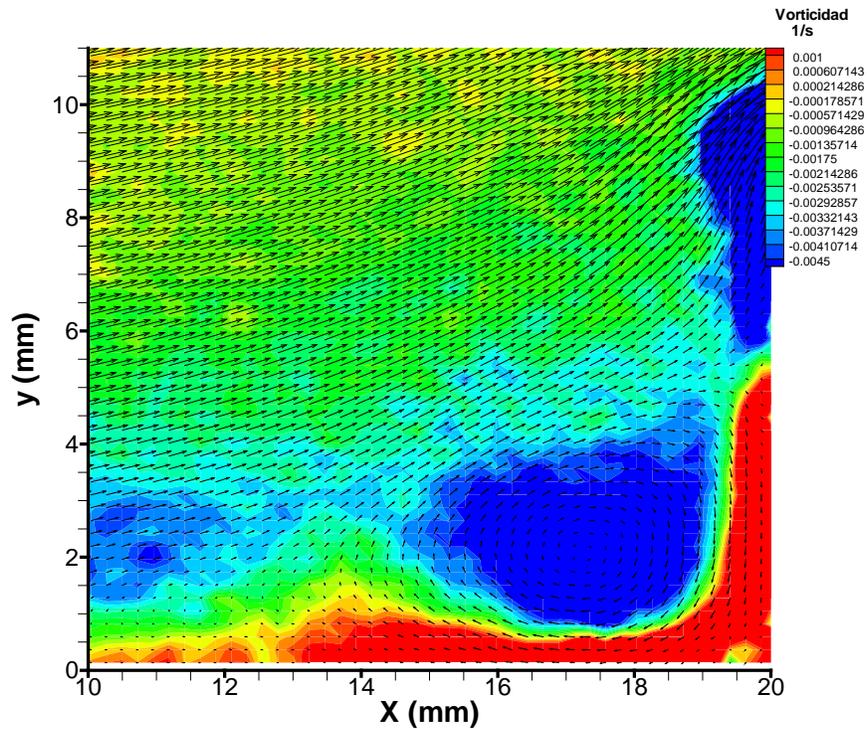


Fig. 4.45 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 3064$

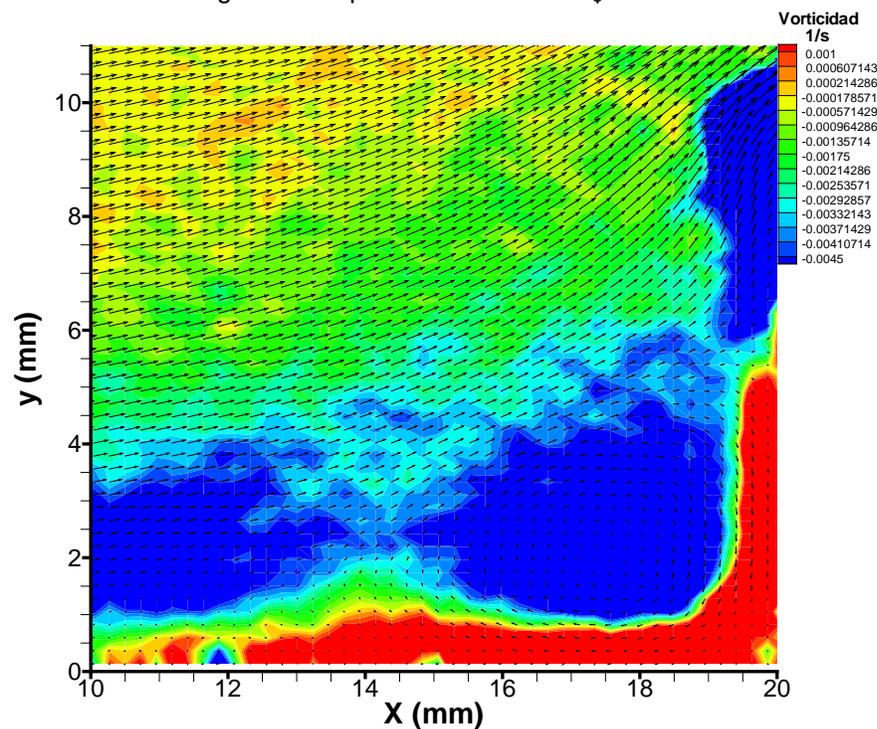


Fig. 4.46 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 4086$

En las figuras 4.47 y 4.48 se observa la formación de nuevas estructuras en la región anterior al vórtice (incremento de zona azul), así mismo se observa que la región en la parte superior del escalón se une completamente con la región del vórtice.

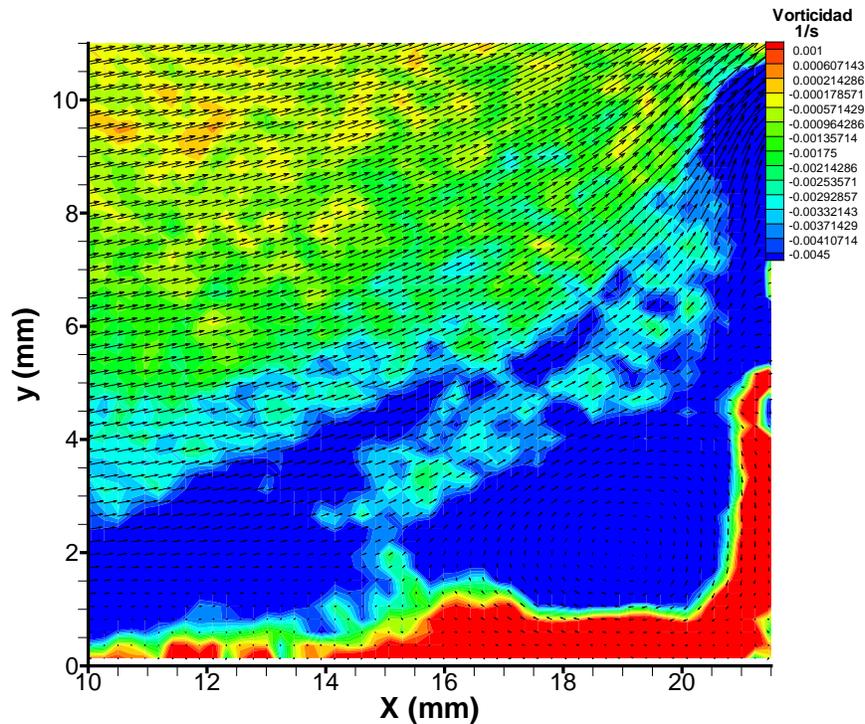


Fig. 4.47 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 5107$

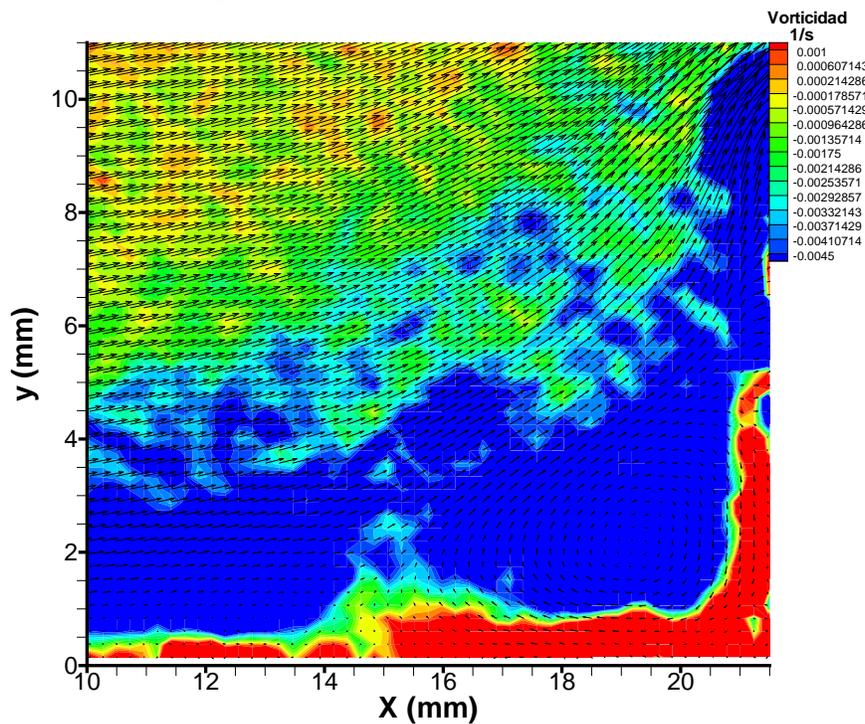


Fig. 4.48 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 6128$

Para la dirección de flujo en sentido contrario (BFS) en la zona B se realizó el mismo análisis pero en este caso cabe mencionar que debido a que el flujo proviene de una expansión abrupta, aún no se encuentra completamente desarrollado; sin embargo, es posible observar una zona de vorticidad positiva $\omega_z = 0.002 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$ en la zona cercana a la pared inferior del canal. Conforme el Re_ϕ se incrementa el flujo se vuelve más desorganizado y la zona donde se tiene vorticidad positiva se extiende.

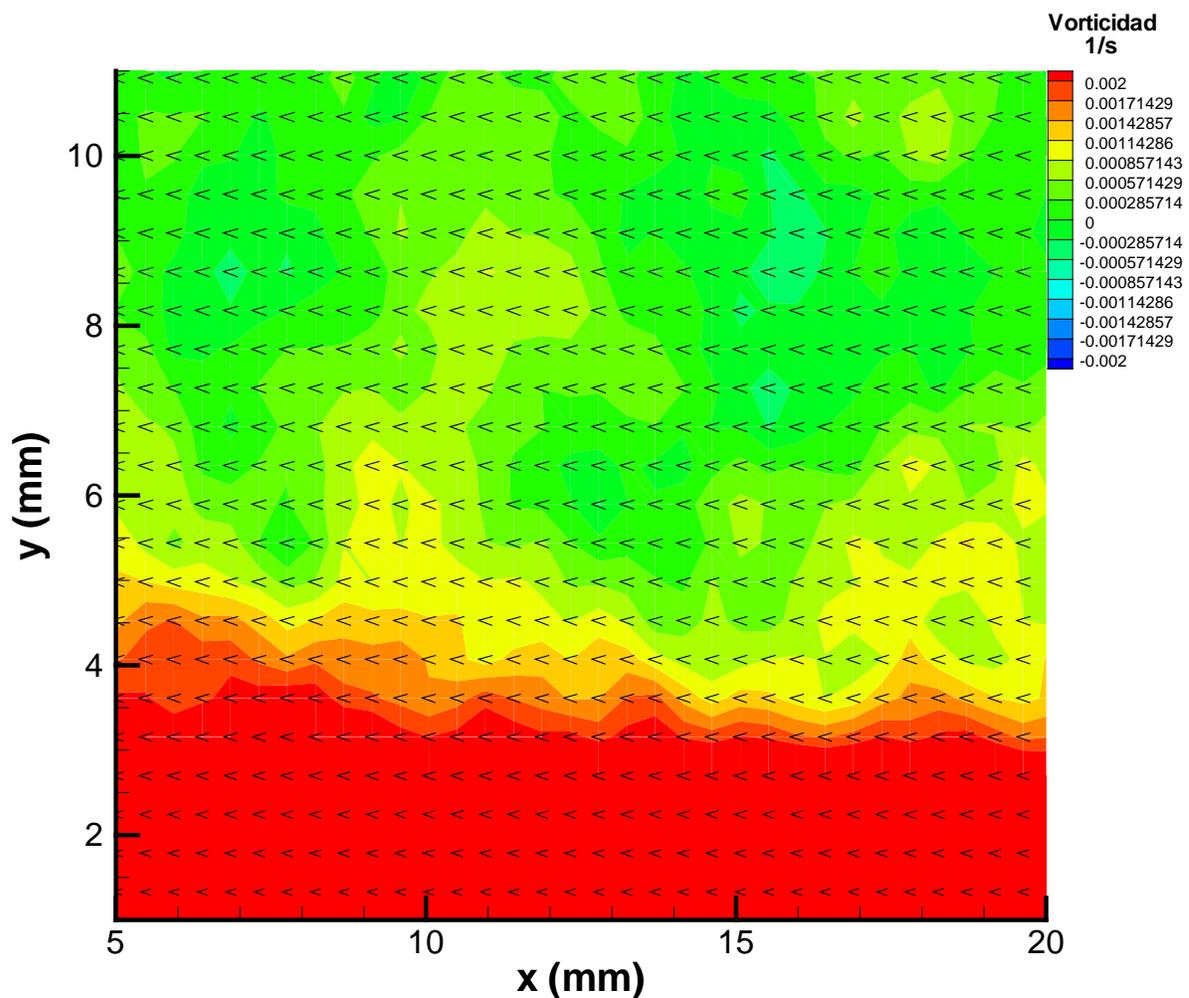


Fig. 4.49 Mapas de vorticidad para BFS zona B $Re_\phi = 3064$

En las figuras 4.50 y 4.51 se observa que conforme el Re_ϕ es incrementado el flujo se vuelve más desorganizado y la zona de vorticidad positiva (zona roja) se extiende

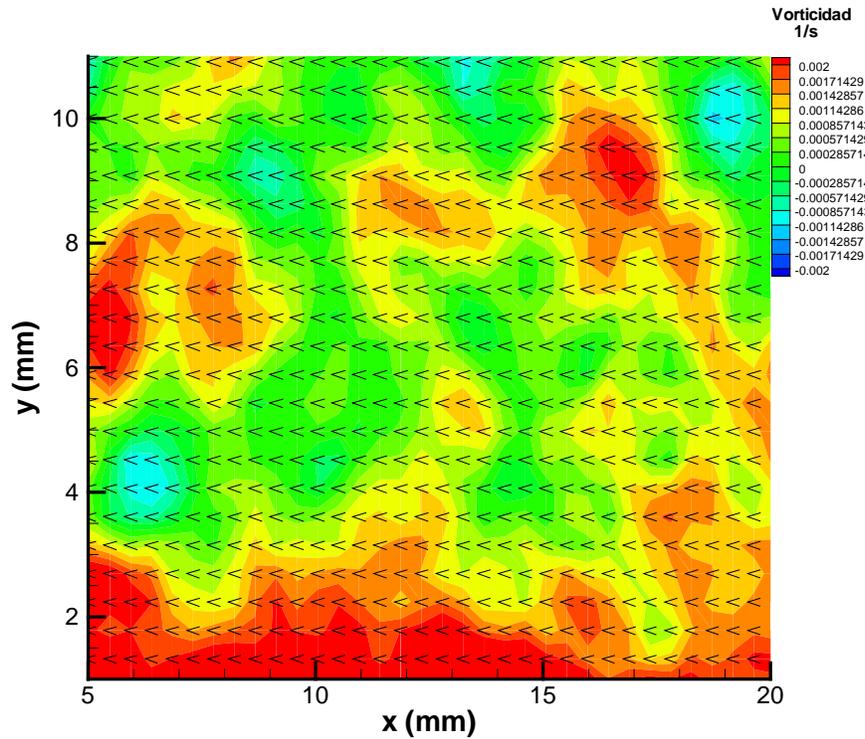


Fig. 4.50 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 4086$

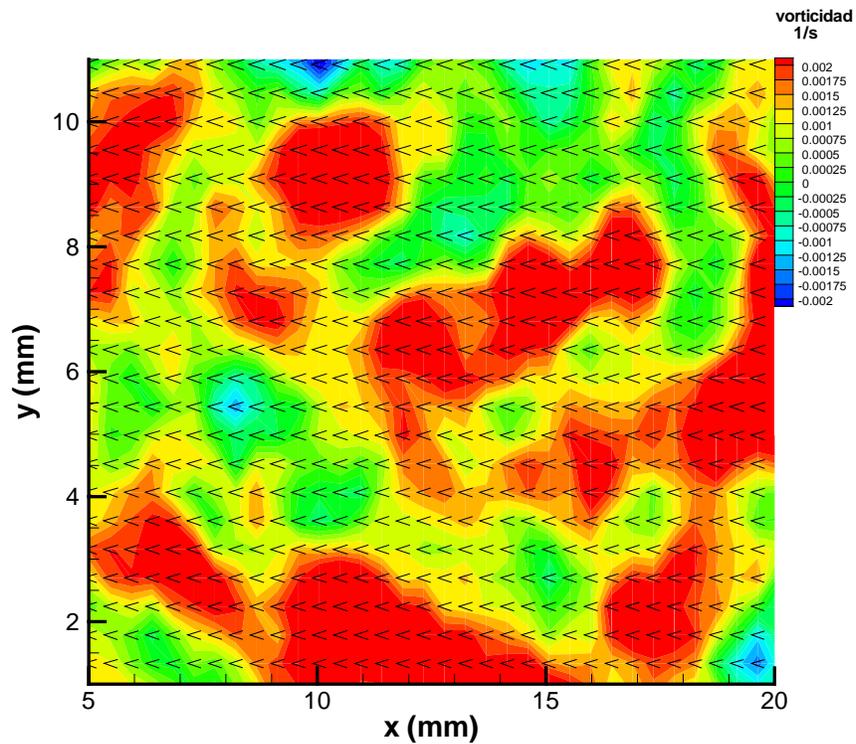


Fig. 4.51 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 5107$

Finalmente en la figura 4.52 que muestra el Re_ϕ mas grande el flujo se encuentra completamente desorganizado y la zona de vorticidad positiva se ha extendido en toda el área

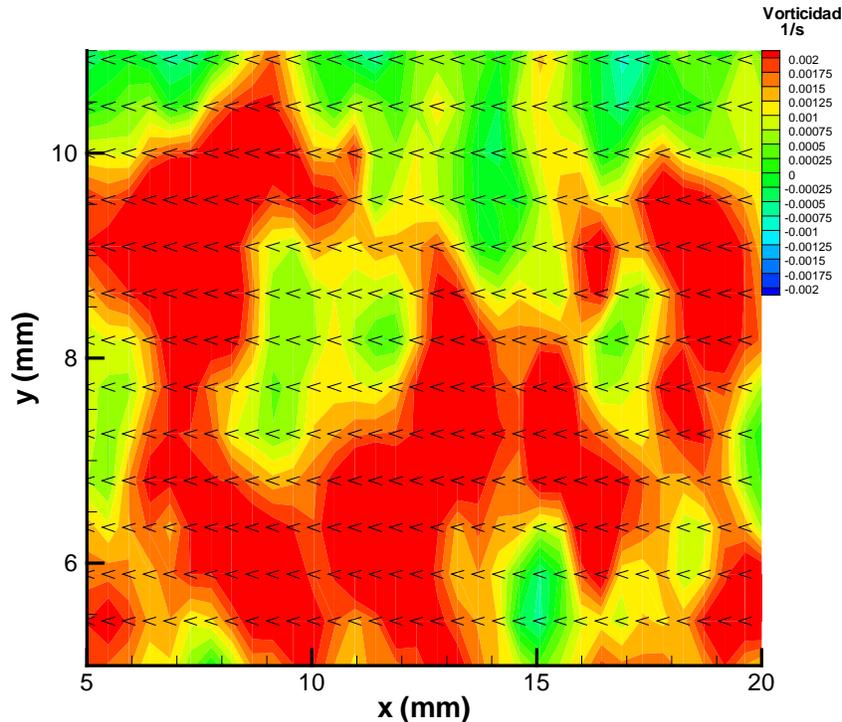


Fig. 4.52 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 6128$

Para la zona A del caso del flujo hacia atrás (BFS) fue necesario realizar un acercamiento mayor en los mapas de vorticidad que en el caso contrario (flujo hacia el frente) para poder apreciar con mayor claridad la estructura principal formada por el desprendimiento de la capa límite de flujo turbulento en el escalón: el vórtice; pero cabe mencionar que el vórtice observado es el secundario, la zona roja mostrada en las imágenes corresponde al vórtice primario, se llegó a esta conclusión debido a que los valores de vorticidad positiva $\omega_z = 0.001 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$ y vorticidad negativa $\omega_z = -0.001 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$ tienen la misma magnitud de vorticidad ω_z pero diferente dirección de rotación. En las figuras 4.54 a 4.57 se observa una zona de vorticidad positiva $\omega_z = 0.001 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$ (color rojo) que crece conforme el Re_ϕ es incrementado lo mismo sucede con la vorticidad negativa $\omega_z = -0.001 \text{ s}^{-1} \mathbf{k}$ (zona azul). Se observa que entre estas dos zonas existe una capa de separación con un valor de vorticidad $\omega_z \approx 0$, esta capa es la interface entre el vórtice primario y el secundario.

Así mismo, se observa que en la base del canal y en la cara del escalón aparecen zonas de vorticidad positiva $\omega_z = 0.001 \text{ s}^{-1}$ las cuales son ocasionadas por el esfuerzo cortante en las paredes. La dirección del flujo es ilustrada por los vectores de la gráfica 4.53

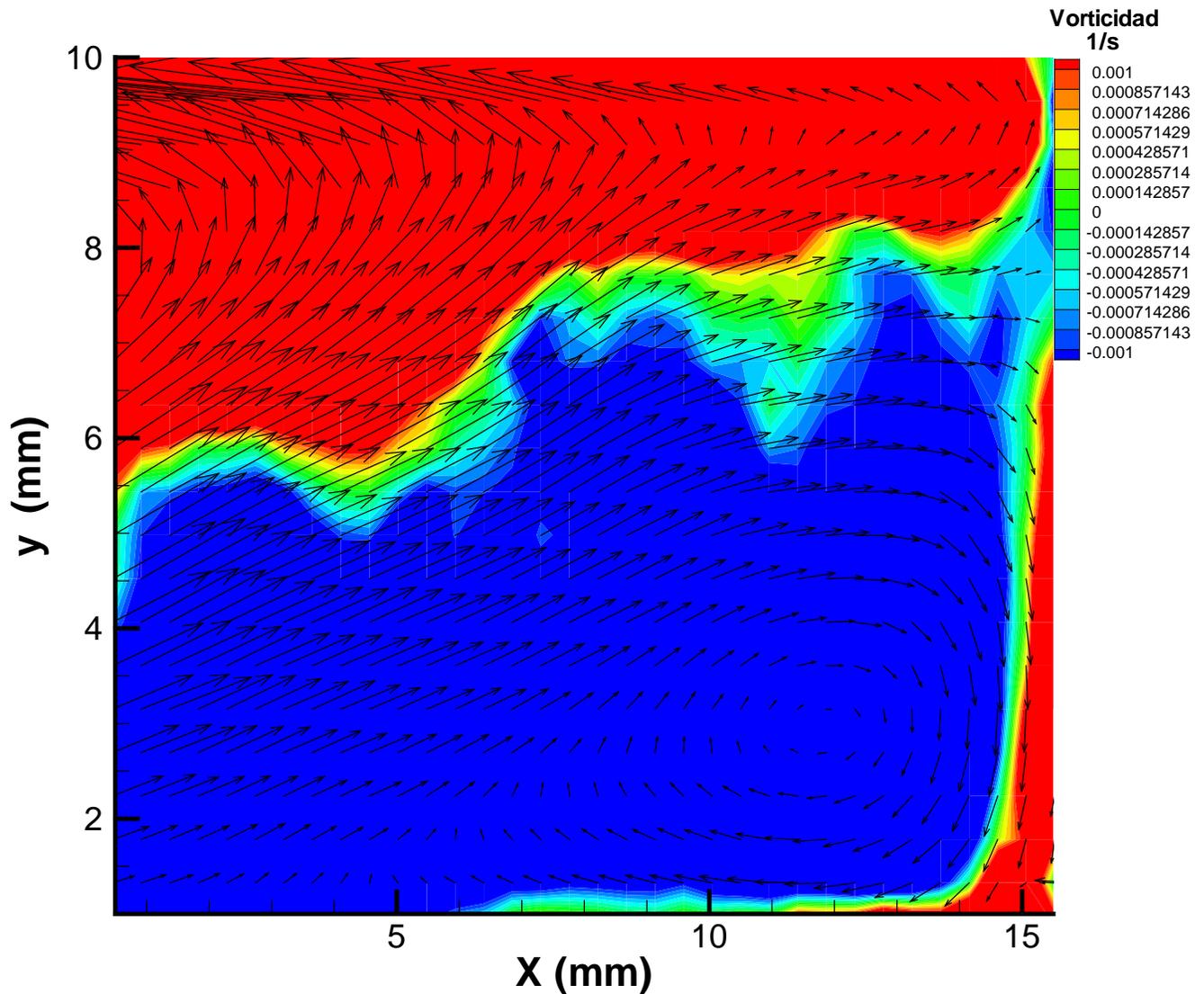


Fig. 4.53 Mapa de vorticidad promedio para flujo hacia atrás del escalón (BFS $Re_\phi = 6128$)

En la figura 4.54 se observa una parte de la región del vórtice primario (zona roja), pero el vórtice secundario aun no se encuentra bien definido, en la figura 4.55 las regiones del vórtice primario y secundario se encuentran bien definidas (zona roja y azul respectivamente) lo cual indica que la vorticidad se incrementa cuando el Re_ϕ crece

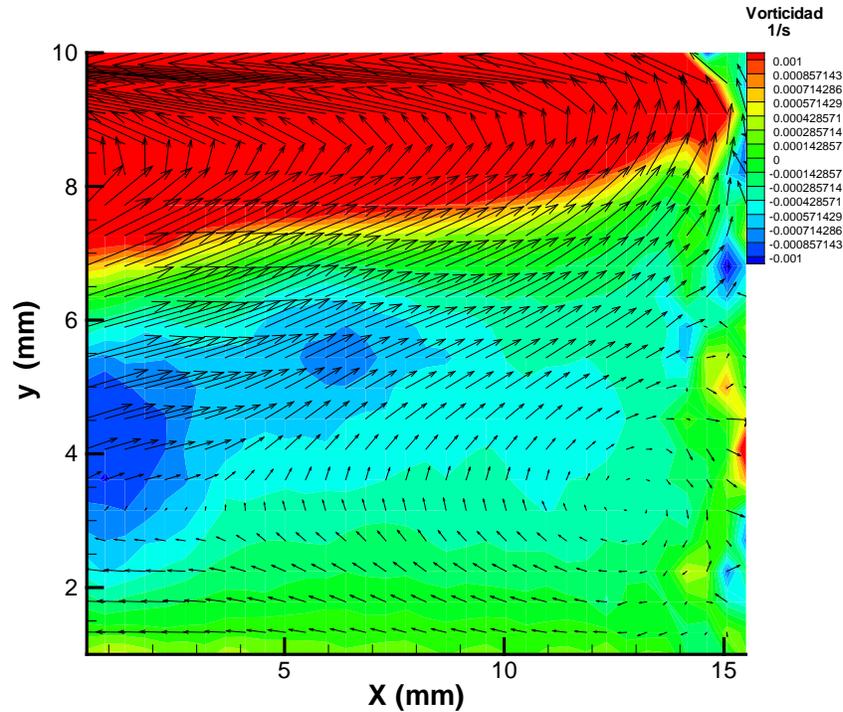


Fig. 4.54 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 3064$

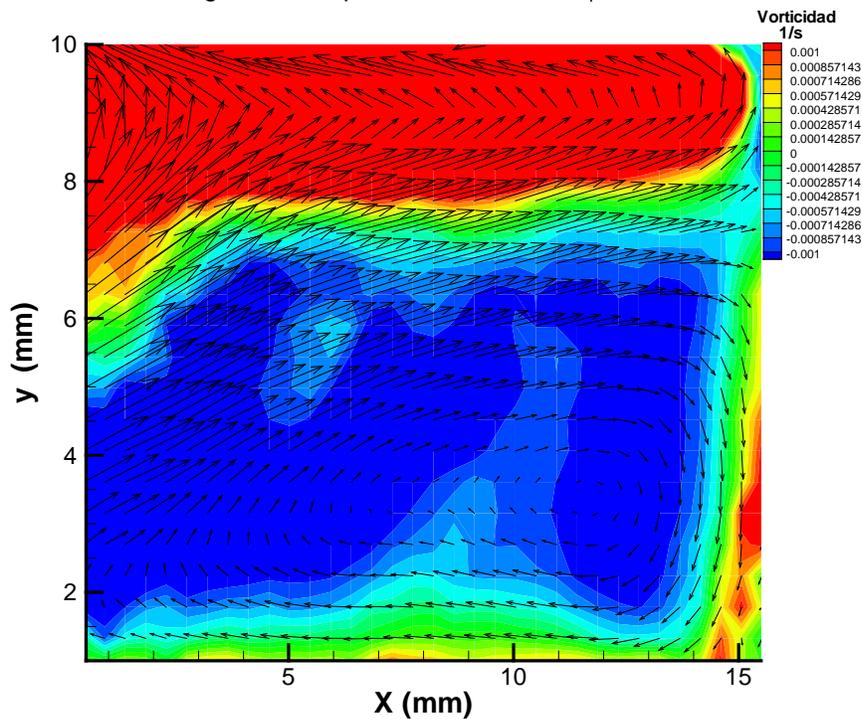


Fig. 4.55 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 4086$

Las figuras 4.56 y 4.57 ilustran como la vorticidad en la región del vórtice secundario crece cuando el Re_ϕ es incrementado, así mismo se observa que la interface entre el vórtice primario y secundario (zona verde) tiene un valor de vorticidad $\omega_z=0$

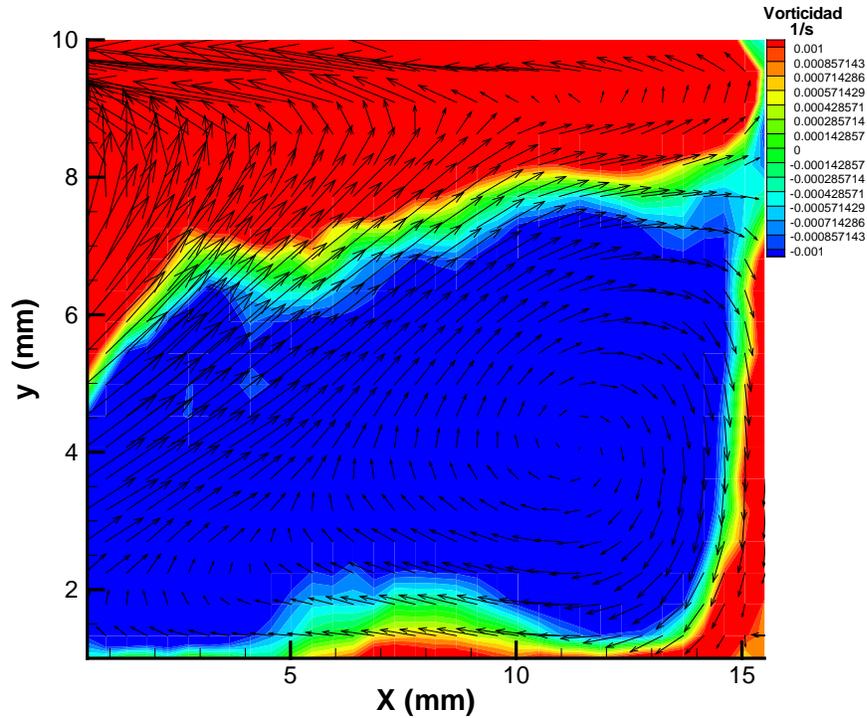


Fig. 4.56 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 5107$

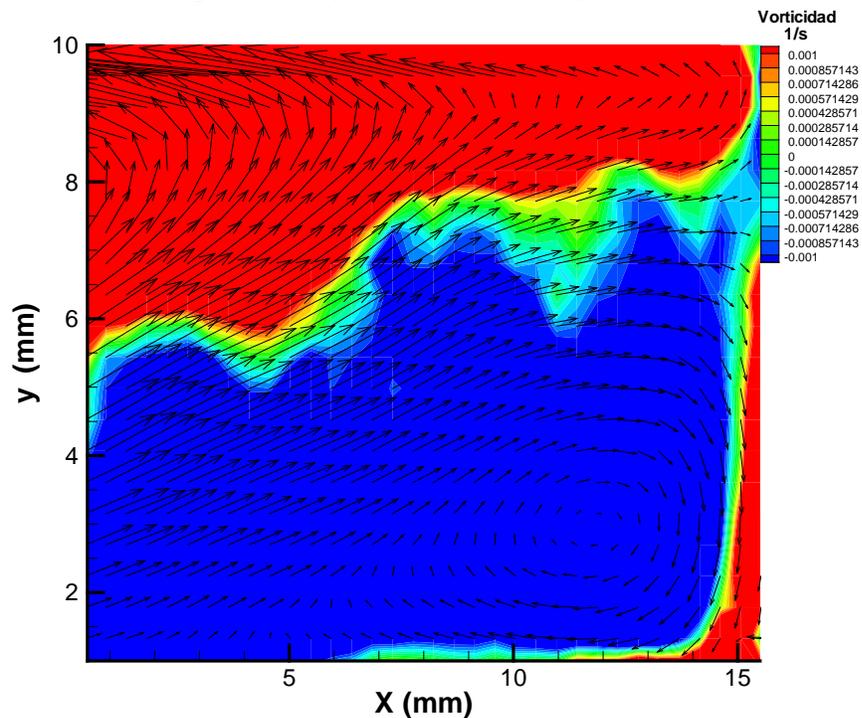


Fig. 4.57 Mapas de vorticidad $Re_\phi = 6128$

4.5 Posición del centro del vórtice

Un vórtice es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas [21]. Como vórtice puede considerarse cualquier tipo de flujo circular o rotatorio que posee vorticidad un ejemplo de ello se puede observar en los campos de velocidad mostrados en la sección 4.2. La importancia de conocer la posición a la cual se encuentra el centro del vórtice (Fig. 4.58 y 4.59) radica en saber su comportamiento con respecto al tiempo y comprender que pasa con el mismo cuando el número de Reynolds aumenta o disminuye este es siempre uno de los objetivos de la mecánica de los fluidos.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.10 y 4.11 como se puede observar en el primer caso para flujo FFS la posición promedio y_e/h del centro del vórtice tiende a acercarse a la pared inferior del canal conforme el número de Reynolds se incrementa, una situación similar sucede con la coordenada x_e/h (ver Fig. 4.7 a 4.12). Para el segundo caso BFS a pesar de no presentar ninguna tendencia conforme el número de Re_ϕ se incrementa se observa un valor constante en la posición y_e/h del centro del vórtice secundario que corresponde a un rango de 0.3-0.4 estos valores corresponden a un número de Re_ϕ menor a los reportados por otros autores cuyos resultados son obtenidos con números de Re mayores, para la distancia x_e/h se observa un valor casi constante de 0.4, para la coordenada x/h del punto de separación del vórtice secundario (capa de traslape entre vórtice primario y secundario) se observó que el valor es mayor a $1.5 h$; mientras que para la coordenada de separación y/h se observa un incremento de la misma conforme el número de Re_ϕ es aumentado (ver Fig. 4.13 a 4.17). Las coordenadas mostradas en las tablas son ilustradas por la figura 4.60, la coordenada x_{1c} indica la posición del centro del vórtice desde la entrada del canal.

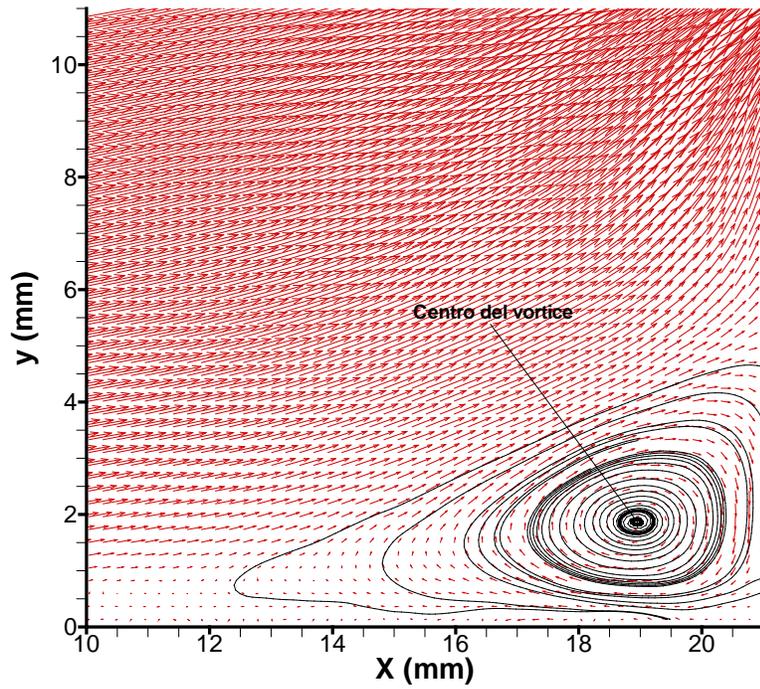


Fig. 4. 58 Centro del vórtice flujo hacia el frente (FFS)

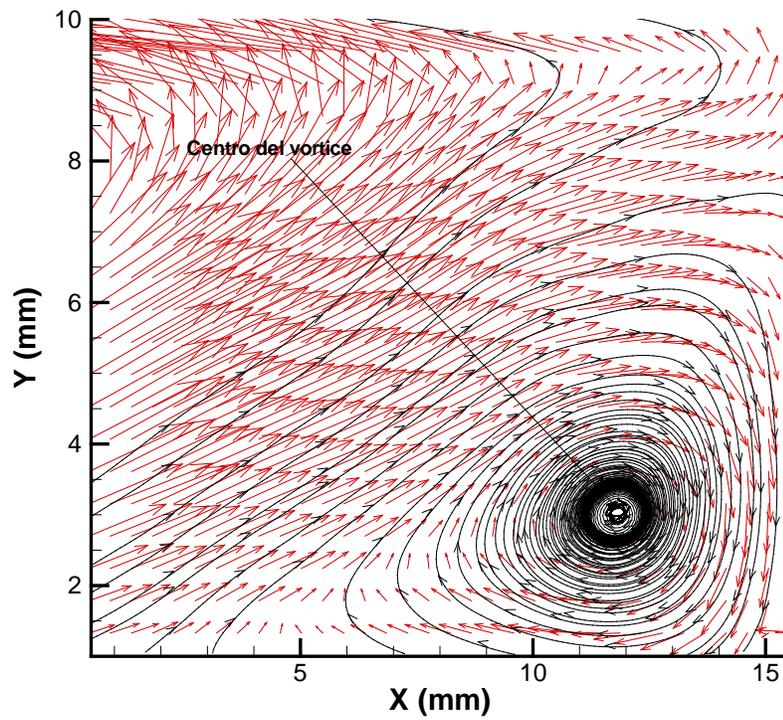


Fig. 4.59 Centro del vórtice flujo hacia atrás (BFS)

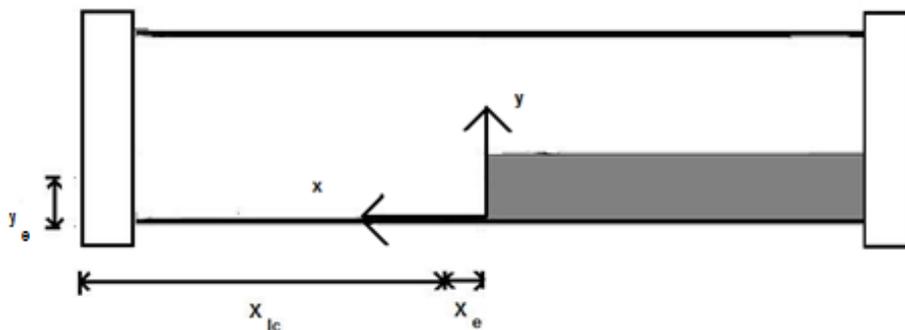


Fig. 4.60 coordenadas utilizadas para el centro del vórtice

Tabla 4.10 Posición promedio del centro del vórtice para aguas arriba (FFS)

Re_φ	X_v (mm)	X_e (mm)	X_e/h	X_{lc} (mm)	X_{lc}/h	y_e (mm)	y_e/h
1021	18.2024	3.1426	0.31426	596.8574	59.68574	2.8809	0.28809
1021	18.3066	3.0384	0.30384	596.9616	59.69616	3.1818	0.31818
2043	17.47	3.875	0.3875	596.125	59.6125	2.5714	0.25714
2043	17.1358	4.2092	0.42092	595.7908	59.57908	2.2380	0.2238
2043	17.2938	4.0512	0.40512	595.9488	59.59488	2.2619	0.22619
2043	17.1950	4.15	0.415	595.85	59.585	2.2619	0.22619
3064	17.4320	3.913	0.3913	596.087	59.6087	2.1904	0.21904
3064	17.4111	3.9339	0.39339	596.0661	59.60661	2.3809	0.23809
3064	17.4716	3.8734	0.38734	596.1266	59.61266	2.3095	0.23095
3064	17.1555	4.1895	0.41895	595.8105	59.58105	2.0714	0.20714
4086	17.0765	4.2685	0.42685	595.7315	59.57315	2.0476	0.20476
4086	17.4123	3.9327	0.39327	596.0673	59.60673	2	0.2
4086	17.4123	3.9327	0.39327	596.0673	59.60673	1.9761	0.19761
5107	18.93	2.415	0.2415	597.585	59.7585	2	0.2
5107	18.88	2.465	0.2465	597.535	59.7535	2.0238	0.20238
5107	18.91	2.435	0.2435	597.565	59.7565	1.7380	0.1738
5107	19.0012	2.3438	0.23438	597.6562	59.76562	1.9761	0.19761
6128	19.06	2.285	0.2285	597.715	59.7715	1.8095	0.18095
6128	18.7967	2.5483	0.25483	597.4517	59.74517	1.6904	0.16904
6128	19.2965	2.0485	0.20485	597.9515	59.79515	2.14	0.214
6128	18.9358	2.4092	0.24092	597.5908	59.75908	1.8809	0.18809

Tabla 4.11 Posición promedio del centro del vórtice aguas abajo (BFS)

Re_{φ}	X_v (mm)	X_e (mm)	$X_{e/h}$	X_{ic} (mm)	X_{ic}/h	y (mm)	y/h
3064	12.8493	2.9157	0.29157	597.0843	59.70843	4.1125	0.41125
3064	12.89	2.875	0.2875	597.125	59.7125	3.33	0.333
3064	11.3540	4.411	0.4411	595.589	59.5589	2.88	0.288
4086	12.8581	2.9069	0.29069	597.0931	59.70931	3.8596	0.38596
4086	11.0437	4.7213	0.47213	595.2787	59.52787	3.4862	0.34862
4086	11.5809	4.1841	0.41841	595.8159	59.58159	3.3824	0.33824
5107	11.56	4.205	0.4205	595.795	59.5795	3.7399	0.37399
5107	11.5478	4.2172	0.42172	595.7828	59.57828	3.25	0.325
5107	11.4586	4.3064	0.43064	595.6936	59.56936	4.1085	0.41085
5107	10.5969	5.1681	0.51681	594.8319	59.48319	3.1750	0.3175
5107	10.9535	4.8115	0.48115	595.1885	59.51885	4.5649	0.45649
6128	11.8152	3.9498	0.39498	596.0502	59.60502	2.9883	0.29883
6128	11.6667	4.0983	0.40983	595.9017	59.59017	4.33	0.433
6128	11.39	4.375	0.4375	595.625	59.5625	3.2165	0.32165
6128	11.8152	3.9498	0.39498	596.0502	59.60502	3.36	0.336
6128	11.28	4.485	0.4485	595.515	59.5515	3.1750	0.3175
6128	11.3942	4.3708	0.43708	595.6292	59.56292	3.5096	0.35096

Conclusiones

De acuerdo a los trabajos reportados en el tema por diversos autores, la técnica experimental Velocimetría Mediante Imágenes de Partículas (PIV) resulta ser una de las mejores opciones para la detección y visualización del vórtice secundario en el caso de flujo sobre un escalón hacia atrás (BFS) con respecto a otras técnicas de medición tales como: Anemometría de hilo caliente, Tubo Pitot, Laser Doppler etc.

Tomando como punto de referencia a la unión entre la pared inferior del canal y la cara del escalón, en los campos promedio de velocidad obtenidos se observó que para el caso FFS existe un vórtice único en la región cercana a la base del escalón zona A, el centro de este vórtice se acerca al punto de referencia conforme el Re_ϕ es incrementado es decir se acerca a la pared inferior del canal y a la pared del escalón. En el caso de BFS se observa que el vórtice secundario presenta una longitud mayor a $1.5 h$ para todos los Re_ϕ y es 1.4 veces mayor que el vórtice observado para el caso FFS, lo que indica que existe una mayor pérdida de energía en la región cercana a la base del escalón (zona A) para el caso BFS. En el caso del valor máximo de la u_{rms} se observó que es 2.43 veces mayor en el caso BFS en la zona A para todos los Re_ϕ que para el caso FFS zona A para los mismos Re_ϕ ; mientras que en el caso del valor máximo de la v_{rms} se encontró un orden de magnitud similar. Para la zona B las magnitudes de u_{rms} y v_{rms} máximas obtenidas son similares.

Para el caso de la vorticidad máxima de ambas direcciones del flujo FFS y BFS para los Re_ϕ mayores se encontraron valores similares de magnitud para la zona B, el cual es de aproximadamente 0.002 s^{-1} . Para la zona A la magnitud de la vorticidad máxima encontrada fue de -0.01 s^{-1} para el caso FFS y $.004 \text{ s}^{-1}$ para el caso BFS lo cual indica que la vorticidad es 60 % mayor en el caso FFS que en el caso BFS.

En base al análisis anterior se puede decir que para la zona A el caso BFS presenta mayor turbulencia y menor vorticidad mientras que el caso FFS presenta mayor vorticidad y menor turbulencia. En ambos casos existe pérdida de energía pero el caso BFS presenta una mayor pérdida de la misma en la zona A, los resultados obtenidos son bastante útiles y confiables para poder ser utilizados como banco de datos en simulaciones numéricas.

Referencias

- [1] J. Tihon, J. Legrand, P. Legentilhomme (2001) Near- Wall investigation of backward facing step flows. *Exp fluids* 31:484-493.
- [2] C. scharam, P. rambaud, M.L. Riethmuller (2004) Wavelet based eddy structure eduction from a backward facing step flow investigated using particle image velocimetry. *Exp fluids* 36:233-245.
- [3] N. Furiuchi, M. Kumada (2002) An experimental study of a spanwise structure around a reattachment region of a two-dimensional backward facing step. *Exp fluids* 32:179-187
- [4] Y.X. Wang, M. Gaster (2005) Effect of surface steps on boundary layer transition. *Exp fluids* 39:679-686.
- [5] J. Kostas, J. soria, M.S. chong (2002) Particle image velocimetry measurements of a backward facing step flow. *Exp fluids* 33:838-853.
- [6] B. Ruck, B. Makiola (1993) Flow separation over the inclined step. Institut fur hydromechanik.
- [7] M. Piirto, P. saarenrinne, H. Eloranta, R. Karvinen (2003) Measuring turbulence energy with PIV in a backward facing step flow. *Exp fluids* 35:219-236.
- [8] S.D.Hall, M. Behnia, C.A.J. Fletcher, G.L. Morrison(2003) Investigation of the secondary corner vortex in a benchmark turbulent backward facing step using cross-correlation particle imaging velocimetry. *Exp fluids* 35:139-151.
- [9] Noriyuki Furiuchi, Tadashi Hachiga, Masaya Kumada (2004) An experimental investigation of a large- scale structure of a two-dimensional backward facing step by using advanced multi-point LVD. *Exp fluids* 36:274-281.
- [10] J.C.S. Lai, J. Yue, M. F. Platzer (2002) Control of backward-facing step flow using a flapping foil. *Exp fluids* 32:44-54.
- [11] Jung Yul Yoo, Hae cheon choi, Sang Myeong Han (1989) numerical analysis of turbulent flow over a backward-facing step flow using Reynolds stress closure model *KSME Journal* Vol. 3:31-37
- [12] L. Marino, P.Luchini (2009) Adjoint analysis of the flow over a Forward Facing Step. *Springer-Verlag Theor.Comput.Fluid Dyn.*23:37-54.
- [13] G. Aloisio, R. Camussi, A. Ciarravano, F. Di Felice, A. Di Marco, M. Felli, E.Fiorentini, F. Pereira. Velocity and wall pressure correlations over a Forward Facing Step. *Exp fluids* University of Rome Italy.
- [14] J.F. Largeau, V. Moriniere (2007) wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward facing step. *Exp fluids* 42:21-40.

[15] D. Wilhelm, L. Kleiser (2002) Application of a spectral element method to two-dimensional forward –facing step flow. Journal of scientific computing Vol. 17:1-4.

[16] C. Hahn, S. Becker, I. Ali, M. Escobar, M. Kaltenbacher Investigation of flow induced sound radiated by a forward facing step. Institute of fluid mechanics (LSTM) Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg Germany <http://www.istm.uni-erlangen.de/aeroakustik/>

[17] A. Alonzo Garcia (2008) Estudio mediante la técnica PIV de los efectos de la presencia de microburbujas dentro de la capa limite turbulenta. Tesis I.PN. P.P. 29-57.

[18] Marisol López Hinojosa (2006) un nuevo algoritmo en la técnica de Velocimetría por imágenes de partículas.

[19] Victor L. streeter Mecánica de los fluidos. Libro P.P 473-475

[20] Dantec. (2000) Flowmap PIV installation and user´s guide. Manual P.P:16-47

[21] Claudio Mataix Mecánica de los fluidos y maquinas hidráulicas P.P:236-247