



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

FLUORESCENCIA INDUCIDA POR
LÁSER APLICADA EN LA MEDICIÓN
DE TEMPERATURAS EN FLUJOS
ACUOSOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A :

FABIÁN PALACIOS CARBAJAL



DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS ALBERTO PALACIOS MORALES

MÉXICO, D.F.

SEPTIEMBRE 2015

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular a la Facultad de Ingeniería por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios superiores en esta magnífica institución. Por los inmensos conocimientos que he recibido de todos mis profesores tanto en el ámbito académico como en el personal.

Agradezco a mis padres que siempre se han esforzado por darme lo mejor, por su cariño y apoyo incondicional en todos estos años y por haberme inculcado excelentes valores que me han formado como persona. También a mis hermanos por el ánimo recibido en todo momento incluso a pesar de no entender del todo lo que hacía.

Al Dr. Roberto Zenit por darme su voto de confianza para la realización del presente trabajo e incluirme en su equipo de trabajo en el laboratorio. Por todas sus observaciones y consejos recibidos los cuales fueron de gran ayuda en la culminación de mi trabajo de investigación. Además, por ser un ejemplo a seguir en todos los sentidos, demostrando ser un magnífico doctor y académico, pero sobretodo una gran persona.

A mi tutor el Dr. Carlos Palacios por todos los conocimientos que me transmitió durante mi estancia en el Instituto. También le agradezco sus constantes asesorías, comentarios y sugerencias las cuales dieron como resultado que el presente escrito mejorara significativamente. Además por su compañerismo, amistad y sobretodo su infinita paciencia.

A todos mis compañeros del laboratorio, pues aprendí un poco de cada uno de ellos, por lo que son parte fundamental de mi formación académica. Especialmente le agradezco a Ernesto Mancilla por sus múltiples comentarios y observaciones que me hacían ver siempre más allá de lo evidente durante la realización de mis experimentos, lo cual contribuyó en gran manera a su realización y análisis posterior.

A todos mis amigos de la Facultad de Ingeniería por los ratos de estudio, pero sobre todo por los momentos de relajación y convivencia que hicieron que mi estancia en la Facultad fuera más amena, llegando a ser una de las mejores experiencias en mi vida.

Resumen

El presente trabajo muestra la aplicación de la técnica de Fluorescencia Inducida por Láser en dos dimensiones *PLIF* (Planar Laser Induced Fluorescence) para la medición de temperaturas en flujos acuosos usando un láser Nd:YAG ($\lambda=532\text{nm}$). Algunos métodos basados en la fluorescencia inducida por láser han sido desarrollados para estos fines. Las técnicas que utilizan un único colorante y una sola longitud de onda de excitación (*técnicas single-color/single-dye*) pueden utilizarse para medir ya sea la concentración de colorante o la temperatura, siempre y cuando el otro de estos dos parámetros se mantenga constante.

El modelo experimental se basa en el lanzamiento de un anillo de vorticalidad de forma ascendente en un medio acuoso el cual se encuentra a una temperatura baja y después de desarrollarse colisiona con una superficie plana caliente colocada de forma horizontal dentro del medio acuoso de igual forma. Se realizaron pruebas para vórtices lanzados con un mismo dispositivo cilindro-pistón impulsado por un motor de corriente directa, controlado con una fuente de poder a 0.49 A y 40 V, con tres distintos desplazamientos ($L/D_0=1$, $L/D_0=2$ y $L/D_0=3$) siendo L la carrera del pistón y D_0 el diámetro del mismo

Además, se utilizó la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV), para obtener campos de velocidades de manera simultánea a los campos de temperatura obtenidos con PLIF y de esta forma poder calcular algunas propiedades de interés en vórtices tales como la vorticalidad, curvatura, velocidad de traslación, circulación y diámetro de vórtice, con la finalidad de observar la relación existente entre los resultados de temperatura obtenidos y sus respectivos parámetros hidrodinámicos.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	III
1. Motivación y Objetivos	1
2. Introducción	3
2.1. Métodos para la medición de temperaturas	3
2.1.1. Termómetro de gas ideal	4
2.1.2. Termómetro de líquido en vidrio	4
2.1.3. Medición de temperaturas por efectos eléctricos	5
2.1.4. Pirometro óptico	7
2.2. Fluorescencia Inducida por Láser	9
2.2.1. Fluorescencia	9
2.2.2. Rendimiento cuántico	10
2.2.3. Descripción de la técnica	10
2.2.4. Sistema de medición PLIF	12
2.2.5. Errores de medición e incertidumbres	16
2.3. Velocimetría por Imágenes de Partículas	18
3. Diseño experimental	21
3.1. Características del equipo empleado	23
3.1.1. Dispositivo cilindro-pistón	23
3.1.2. Superficie plana caliente	23
3.1.3. Equipo para mediciones PIV y PLIF	25
3.2. Consideraciones y mediciones previas	28
3.2.1. Registro de temperaturas con termopares	28
3.2.2. Velocidad del pistón	32
3.2.3. Ajuste de imágenes	34

4. Propiedades del vórtice	39
4.1. Identificación del vórtice	39
4.2. Centro del vórtice	40
4.3. Vorticidad	41
4.4. Circulación	41
4.5. Resultados	42
5. Medición de temperatura	51
5.1. Calibración	53
5.2. Procesamiento de imágenes	56
5.3. Resultados	58
5.3.1. Error de medición e incertidumbres	68
6. Conclusiones	73
A. Interacción del vórtice con las superficie caliente	79
A.1. $L/D_0 = 1$	79
A.2. $L/D_0 = 2$	85
A.3. $L/D_0 = 3$	91
B. Programas en Matlab	97
B.1. Calibración	97
B.2. Imágenes en escala de grises	102
B.3. Obtención de mapas de temperatura	106
B.4. Campos de velocidad	109
B.5. Vorticidad, Criterio Q y Curvatura	114
B.6. Trayectoria, Diámetro y $V_{traslacion}$	119
B.7. Circulación	124
B.8. R^2 , error de calibración e incertidumbres	126

Índice de figuras

2.1. Termómetro de gas ideal	3
2.2. Termómetro de mercurio en vidrio	4
2.3. Termómetro de resistencia eléctrica	5
2.4. Efecto termoeléctrico	7
2.5. Pirómetro óptico	8
2.6. Filamento de la lámpara en el ocular del pirómetro óptico	8
2.7. Absorción y emisión de energía en el proceso de fluorescencia	9
2.8. Intensidad de fluorescencia-Temperatura para la Rodamina B	11
2.9. Equipo necesario para la técnica PLIF	12
2.10. Absorción y emisión del espectro de Rodamina B	14
2.11. Visualización de partículas trazadoras	18
2.12. Unidad de adquisición y control	19
2.13. Procesamiento de Correlación Cruzada	20
3.1. Diseño experimental	21
3.2. Marco de referencia	22
3.3. Dispositivo cilindro-pistón	23
3.4. Tanque hermético	24
3.5. Baño térmico	24
3.6. Sistema de recirculación	25
3.7. Láser Nd: YAG	26
3.8. Cámara de alta velocidad	27
3.9. Filtro óptico	27
3.10. Tarjeta de calibración	27
3.11. Rodamina B	28
3.12. Distribución de termopares en la superficie	29
3.13. Tarjeta de adquisición externa	29
3.14. Calentamiento de la placa	30
3.15. Temperatura de la placa dentro del agua	31

3.16. Primer interacción vórtice-pared	32
3.17. Captura del pistón en movimiento	33
3.18. velocidad del pistón	34
3.19. Posición de las cámaras	35
3.20. Posición de la cámara 2	36
3.21. Transformación Lineal Directa	37
3.22. Propiedades del ajuste de imagen	37
3.23. Imagen ajustada mediante TLD	38
4.1. Centro de vórtice	41
4.2. Campos de vorticidad/velocidad	43
4.3. Trayectoria del vórtice	45
4.4. Diámetro de vórtice	46
4.5. Circulación	48
4.6. Velocidad de traslación	50
5.1. Visualización de vórtice	52
5.2. Imágenes de calibración PLIF	54
5.3. Señal de fluorescencia respecto a la temperatura	55
5.4. Visualización de vórtice PLIF	57
5.5. $L/D_0=1$, Visualización del vórtice	59
5.6. $L/D_0 =2$, Visualización del vórtice	60
5.7. $L/D_0 =3$, Visualización del vórtice	61
5.8. $L/D_0 = 2$, Procesamiento PLIF(acercamiento)	63
5.9. $L/D_0 = 3$, Procesamiento PLIF(acercamiento)	64
5.10. Temperatura en la fracción fluido caliente desprendida	65
5.11. $L/D_0 = 2$,Superposición de vectores	66
5.12. $L/D_0 = 3$,Superposición de vectores	67
5.13. Imágenes para el cálculo de incertidumbres	68
5.14. Incertidumbres	69
5.15. Coeficiente de determinación	70
5.16. Error de calibración	71
A.1. Campos de velocidad($L/D_0=1$) a	81
A.2. Campos de velocidad($L/D_0=1$) b	82
A.3. Campos de vorticidad($L/D_0=1$) a	83
A.4. Campos de vorticidad($L/D_0=1$) b	84
A.5. Campos de velocidad($L/D_0=2$) a	87
A.6. Campos de velocidad($L/D_0=2$) b	88
A.7. Campos de vorticidad($L/D_0=2$) a	89

A.8. Campos de vorticidad($L/D_0=2$) b	90
A.9. Campos de velocidad($L/D_0=3$) a	93
A.10. Campos de velocidad($L/D_0=3$) b	94
A.11. Campos de vorticidad($L/D_0=3$) a	95
A.12. Campos de vorticidad($L/D_0=3$) b	96

Capítulo 1

Motivación y Objetivos

La Fluorescencia Inducida por Láser es una técnica no intrusiva generalmente utilizada para la identificación de flujos en distintas concentraciones. Además, en la medición de temperatura ha sido utilizada con éxito en los medios gaseosos (*Fletcher y Mac Daniel 1987; Gross et al. 1987*). *Nakajima et al.* (1990) iniciaron las mediciones de temperatura en líquidos usando fluorescencia inducida por láser, también *Sakakibara et al.* (1997) la emplearon con el fin de estudiar la transferencia de calor en un chorro de reacción incidente. La técnica se basa en la dependencia de la temperatura respecto a la intensidad de fluorescencia que presentan algunos colorantes orgánicos. Sin embargo, actualmente no existe mucha literatura acerca de mediciones de temperatura en medios líquidos basadas en esta misma técnica.

El estudio de la transferencia de calor por convección es muy importante debido a sus múltiples aplicaciones en ingeniería, tales como la combustión, intercambiadores de calor, dispositivos de enfriamiento electrónicos, etc. Si se llega a comprender la interacción entre el flujo de fluido y las paredes sólidas, es posible mejorar la tasa de transferencia de calor y con ello generar diseños más eficientes. Recientemente se ha prestado singular atención al estudio de la transferencia de calor en las paredes en presencia de flujos turbulentos. Además, se ha determinado que la turbulencia no sólo es un movimiento caótico de un fluido, sino que está compuesta por estructuras de vórtices bien definidas, las cuales al interactuar con superficies, aumentan significativamente la transferencia de calor en ellas.

Los vórtices son fundamentalmente importantes en la Mecánica de Fluidos pues se generan en una amplia variedad de flujos. Además, los vórtices están presentes en muchas aplicaciones de Ingeniería y fenómenos naturales, como por ejemplo; tormentas tropicales, flujos oceánicos, locomoción

2 Motivación y Objetivos

de animales marinos, etc. Específicamente, los anillos de vorticidad (*vortex rings*) son un tipo de vórtices ampliamente reproducibles en el laboratorio y algunas de sus propiedades tales como el tamaño vórtice o la velocidad de desplazamiento pueden ser controladas con facilidad, por ello en el presente trabajo se eligió utilizar este tipo de vórtices. La dinámica de la interacción de los anillos de vorticidad con paredes calientes se ha estudiado previamente por algunos autores (por ejemplo; *Arévalo et al.* 2007; *Martin y Zenit* 2008; *Palacios et al.* 2014).

Uno de los objetivos de este trabajo es presentar una investigación experimental de un anillo de vorticidad que se desarrolla en un flujo acuoso y que posteriormente interactúa con una superficie plana, la cual se encuentra sumergida en el mismo fluido pero tiene una temperatura superior. En un previo análisis numérico *Martin R. y Zenit R.* (2008) mostraron el comportamiento de un vórtice que colisiona en una pared caliente, en el cual se observa la generación de convección desde la superficie plana y un aumento significativo de la transferencia de calor. También, *Arévalo et al.*(2010) estudiaron la interacción en aire de un anillo de vorticidad con una pared vertical caliente y sus resultados mostraron que hubo un incremento de la transferencia de calor como resultado del aumento del número de Reynolds generado por el impacto del vórtice. Además, *Hubble et al.*(2013) estudiaron el mismo fenómeno pero en un flujo acuoso y se determinó que el aumento de la transferencia de calor está fuertemente influenciado por la fuerza, el tamaño y la posición del anillo de vorticidad con relación a la capa límite térmica de la pared plana. Por lo tanto, otro de los objetivos principales es utilizar la técnica de Fluorescencia Inducida por Láser para mediciones de temperatura, comprobar su efectividad, observar sus ventajas y desventajas, así como emplearla de forma conjunta a la técnica de Velocimetría por imágenes de Partículas para la obtención simultánea e instantánea de campos de temperatura y de velocidad respectivamente.

Para fines prácticos, en este escrito se hará mención a la Fluorescencia Inducida por Láser como *LIF* por sus siglas en inglés; Laser Induced Fluorescence o bien *PLIF*(Planar Laser Induced Fluorescence) para el caso específico de un análisis bidimensional. Así mismo se referirá a la Velocimetría por Imágenes de Partículas como *PIV*(Particle Image Velocimetry).

Capítulo 2

Introducción

2.1. Métodos para la medición de temperaturas

De acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, la temperatura está relacionada con el calor, ya que se sabe que el calor siempre fluye de un cuerpo con mayor temperatura a otro con temperatura menor en ausencia de otros efectos. Debido a que algunas propiedades como la presión, el volumen, la resistencia eléctrica, el coeficiente de expansión, entre otros, cambian con la temperatura, estos cambios pueden usarse con el propósito de medirla. A continuación, se presenta una breve descripción de algunos de los métodos de medición de temperatura más utilizados en la actualidad.

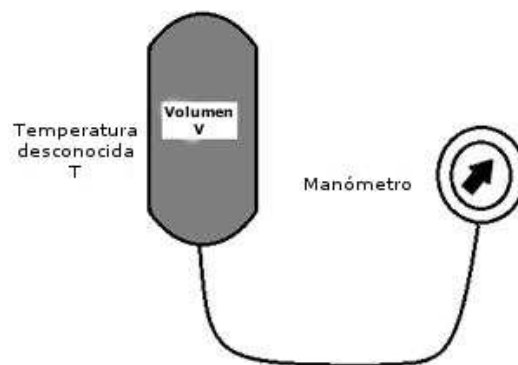


Figura 2.1: Esquema de un termómetro de gas ideal

4 Introducción

2.1.1. Termómetro de gas ideal

Para el termómetro de gas, un volumen fijo es llenado con un gas y expuesto a la temperatura a la que se va a medir como se muestra en la Figura 2.1. La presión del sistema de gas es medida a la temperatura T , después el volumen es expuesto a una referencia estándar de temperatura y la presión es medida a estas condiciones. De acuerdo con la ecuación del gas ideal $pV = mRT$, a un volumen constante la temperatura puede ser expresada como:

$$T = T_{ref} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)_{Vol.const.} \quad (2.1)$$

2.1.2. Termómetro de líquido en vidrio

El termómetro de líquido en vidrio es considerado un dispositivo mecánico para la medición de temperaturas pues experimenta un cambio de dimensión mecánica causada por un cambio de temperatura. Un esquema sencillo de la construcción de este dispositivo se muestra en la Figura 2.2. Está compuesto por un bulbo relativamente grande en la parte inferior del termómetro que contiene la mayor cantidad de líquido, el cual al calentarse se expande y sube por un tubo capilar en donde se encuentra grabada una escala apropiada con marcas.

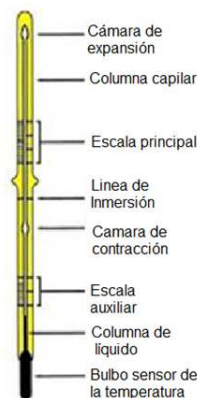


Figura 2.2: Esquema de un termómetro de mercurio en vidrio

2.1.3. Medición de temperaturas por efectos eléctricos

Los métodos eléctricos para la medición de temperaturas son muy convenientes, ya que proporcionan una señal que puede detectarse fácilmente y amplificarse o usarse para propósitos de control.

Termómetro de resistencia eléctrica

El termómetro de resistencia eléctrica consiste básicamente en un elemento resistor expuesto a la temperatura que se desea medir. El cambio de resistencia en dicho elemento indicará su temperatura por medio de un arreglo similar al de la Figura 2.3. Para temperaturas pequeñas, la variación de la resistencia con la temperatura puede aproximarse a la siguiente relación lineal:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \quad (2.2)$$

donde α es el coeficiente lineal de resistencia térmica, R_1 y R_2 son las resistencias del material a las temperaturas T_1 y T_2 respectivamente. Para márgenes más amplios de temperatura, la resistencia del material es expresada mediante una relación cuadrática:

$$R = R_0(1 + aT + bT^2) \quad (2.3)$$

donde

R = resistencia a la temperatura T

R_0 = resistencia a la temperatura de referencia T_0

a, b = constantes determinadas de forma experimental

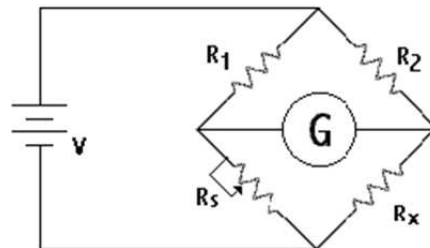


Figura 2.3: Configuración de un termómetro de resistencia eléctrica

6 Introducción

Termistores.

El termistor es un dispositivo semiconductor que tiene un coeficiente de resistencia térmica negativo, en contraste con el coeficiente positivo de la mayor parte de los metales.

Además, la resistencia sigue una variación exponencial con la temperatura en vez de una relación polinomial como en la ecuación 2.3; por lo tanto, para un termistor se tiene la siguiente relación:

$$R = R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (2.4)$$

donde R_0 es la resistencia a la temperatura de referencia T_0 y β es una constante obtenida de forma experimental. El valor numérico de β varía entre 3500 y 4600 K, dependiendo del material del transmisor y la temperatura.

Termopares

El termopar es el método eléctrico más común para la medición de la temperatura. Al unirse dos materiales distintos como en la Figura 2.4 se presenta una fuerza electromotriz *fem* entre los puntos A y B, la cual es una función de la temperatura en la junta. Si la temperatura de una junta es conocida (temperatura de referencia), entonces la temperatura de la otra junta puede calcularse fácilmente empleando las propiedades termoeléctricas de los materiales.

Comúnmente, las *fem* termoeléctricas son expresadas en términos del potencial generado por una junta de referencia a 0°C. Por lo general, el voltaje de salida E de un circuito termopar simple es expresado de la forma:

$$E = AT + \left(\frac{1}{2} \right) BT^2 + \left(\frac{1}{3} \right) CT^3 \quad (2.5)$$

donde T es la temperatura en grados Celsius y E se basa en la temperatura de la junta de referencia a 0°C. A, B y C son constantes que dependen del material del termopar. La sensibilidad o potencia termoeléctrica de un termopar está dada por:

$$S = \frac{dE}{dT} = A + BT + CT^2 \quad (2.6)$$

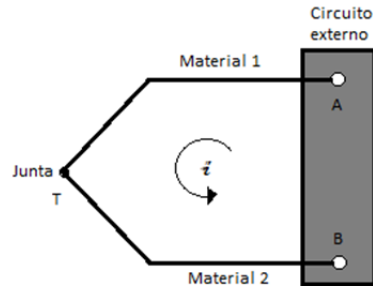


Figura 2.4: Junta de dos metales distintos indicando el efecto termoeléctrico

2.1.4. Pirometro óptico

La *pirometría óptica* consiste en la determinación de la temperatura de una superficie por medio del color de la radiación térmica emitida; conforme es calentada una superficie esta adquiere un color rojo oscuro, luego naranja y finalmente blanca. El problema de medir la temperatura por este método consiste en establecer la variación de la temperatura mediante el color del objeto. Para este propósito en particular, es construido un dispositivo similar al mostrado de forma esquemática en la Figura 2.5. Por medio del arreglo del lente y el filtro se puede observar la radiación de la fuente. Al frente del dispositivo es colocado un filtro de absorción el cual reduce la intensidad de la radiación incidente, de tal forma que la lámpara estándar es capaz de operarse a un nivel más bajo. La lámpara estándar es colocada en la trayectoria óptica de la radiación incidente. Si se ajusta la corriente de lámpara, es posible igualar el color del filamento al de la radiación incidente. Un filtro rojo se coloca en el ocular con el propósito de asegurarse que las comparaciones se efectúan para radiación esencialmente monocromática, eliminando con ello algunas incertidumbres que resultan de la variación de las propiedades de la radiación con la longitud de onda.

En la Figura 2.6 se ilustra la apariencia del filamento de la lámpara tal como se ve en el ocular del pirómetro óptico. Cuando se alcanzan condiciones de balance, el filamento parece haberse desvanecido del campo total de la radiación incidente. La calibración de la temperatura es realizada en términos de la corriente de calefacción de la lámpara.

8 Introducción

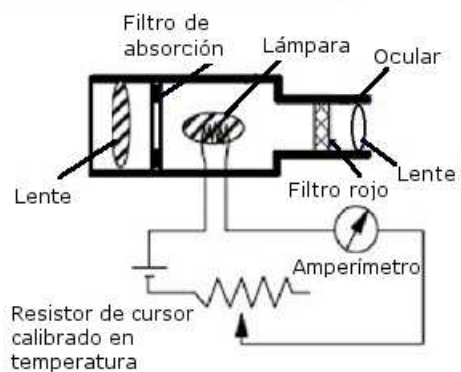


Figura 2.5: Esquema del pirómetro óptico



Figura 2.6: Aspecto del filamento de la lámpara en el ocular del pirómetro óptico

2.2. Fluorescencia Inducida por Láser

La *fluorescencia inducida por láser* es una técnica de medición óptica que ha sido utilizada generalmente para medir de forma instantánea campos de concentración de flujos líquidos y gaseosos. No obstante, se ha descubierto que dicha técnica también puede ser muy útil para la obtención de campos de temperatura aprovechando la dependencia de la intensidad de fluorescencia con respecto a la temperatura que presentan algunos colorantes orgánicos. La siguiente sección describe el principio de funcionamiento de dicha técnica. Como se mencionó anteriormente, se hará referencia a esta técnica sencillamente como PLIF.

2.2.1. Fluorescencia

Definición

Se puede definir a la Fluorescencia de manera sencilla como la capacidad de algunas sustancias de absorber luz a una determinada longitud de onda (por lo general en el rango ultravioleta) y luego emitir luz en una longitud de onda más larga. Es decir, se absorben fotones con una determinada energía y son liberados con una energía inferior como lo muestra la Figura 2.7. Este proceso se realiza de forma casi inmediata; la luz es absorbida y emitida en tan solo algunos nanosegundos.

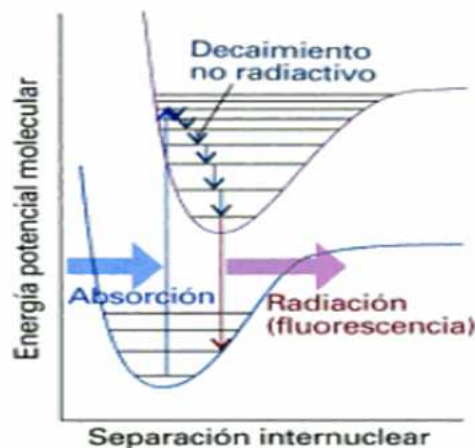


Figura 2.7: Absorción y emisión de energía en el proceso de fluorescencia

2.2.2. Rendimiento cuántico

El rendimiento cuántico o *eficiencia cuántica de fluorescencia* ϕ se define como la relación entre el número de fotones emitidos con el número de fotones absorbidos, es decir:

$$\phi = \frac{\# \text{fotones emitidos}}{\# \text{fotones absorbidos}} \quad (2.7)$$

El rendimiento cuántico de fluorescencia máxima es 1; es decir, se presenta cuando cada fotón absorbido es emitido. Sin embargo, compuestos con rendimiento cuántico de 0.10 todavía son considerados altamente fluorescentes.

2.2.3. Descripción de la técnica

Para estudiar los flujos que son inducidos por fuentes de calor (por ejemplo convección natural) o flujos de transporte de calor (por ejemplo chorros), a menudo es necesario medir la temperatura u otros escalares. La sensibilidad de la fluorescencia a un escalar independiente puede ser explotada para cuantificar el valor del escalar independiente. Se sabe que para algunos colorantes orgánicos el nivel de intensidad de fluorescencia varía con la concentración, la temperatura y otros parámetros experimentales. Para el caso analizado en este trabajo, todo el flujo tiene una concentración uniforme de colorante sensible a la temperatura, pero un campo de temperatura heterogéneo. La dependencia que presenta el rendimiento cuántico respecto a la temperatura puede ser útil para el cálculo de esta última, pues estudios previos han determinado que el aumento de la temperatura produce una disminución de la eficiencia cuántica (*Nakajima et al. 1990; Sakakibara et al. 1999; Lemoine et al. 1999; Coolen et al. 1999*). La Figura 2.8 muestra la relación temperatura-fluorescencia de un colorante orgánico (Rodamina B) a distintas concentraciones. Nótese que la relación entre la intensidad de fluorescencia y la temperatura es lineal para todas las concentraciones mostradas en dicha gráfica.

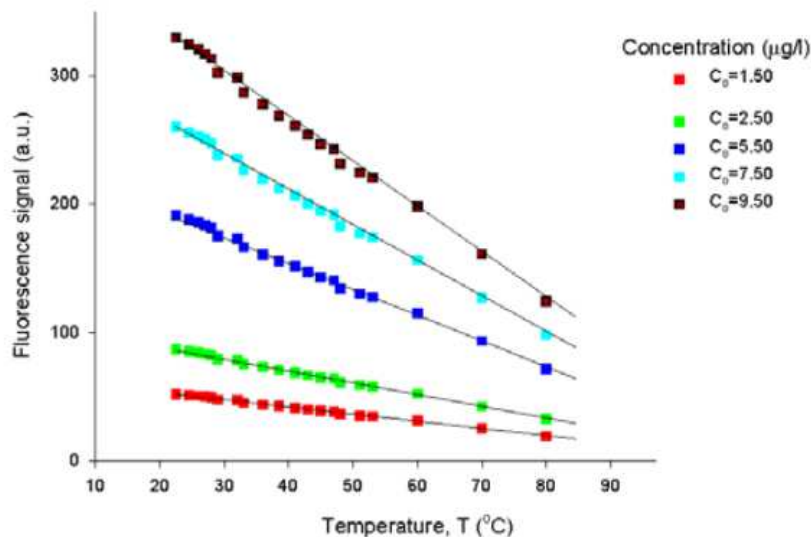


Figura 2.8: *Comportamiento de la intensidad de fluorescencia respecto a la temperatura para distintas concentraciones de Rodamina B.* Fuente: Dynamic Studio v3.14 User's Guide.

El principio básico de la técnica PLIF consta de una hoja de luz láser que se hace pasar en medio de un flujo compuesto por un colorante fluorescente disuelto en agua, iluminándolo con un plano sumamente delgado, el colorante absorbe parte de la luz, se excita a un estado de energía electrónica superior y en el posterior retorno a un estado de energía más bajo, una parte del exceso de energía es liberada en forma de luz a una longitud de onda más larga; comúnmente conocido como fluorescencia (sección 2.2.1). Para la detección de la fluorescencia se utiliza una cámara equipada con un filtro, de tal forma que sólo sea visualizada la luz fluorescente. Un esquema básico de la técnica se observa en la Figura 2.9.

Es necesario llevar a cabo un procedimiento de calibración el cual consiste en tomar imágenes previas a los experimentos a distintas temperaturas. La temperatura del líquido en cada toma debe ser homogénea en toda la región captada por la cámara. Con estas imágenes, se realiza una regresión lineal para obtener constantes de calibración en cada píxel de la cámara, las cuales sirven para determinar en cada píxel el cambio producido al aumentar la temperatura y con ello tener una relación que permita convertir los campos de intensidad de fluorescencia (generados por las imágenes tomadas en los experimentos) en campos de temperatura.

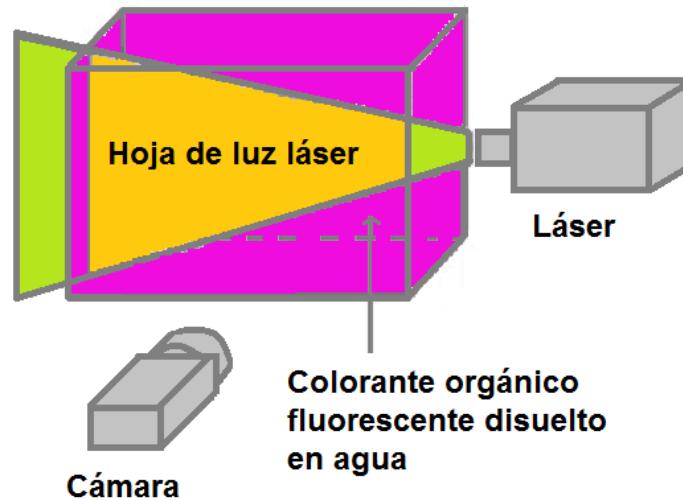


Figura 2.9: Esquema de los elementos necesarios para la técnica de fluorescencia inducida por láser

2.2.4. Sistema de medición PLIF

Láser

Un sistema de PLIF requiere un láser adecuado de acuerdo al colorante fluorescente utilizado. La longitud de onda de emisión del láser debe de estar dentro de la banda de absorción del colorante, o al menos en parte de ella. Láseres de onda continua (CW) de iones de argón que funcionan a 488 y/o 514.5 nm se han empleado como fuente de excitación en la mayoría de los experimentos de PLIF en flujos acuosos reportados en la literatura de mecánica de fluidos. El uso de láseres pulsados de doble frecuencia (Nd:YAG) que operan a 532 nm se ha convertido cada vez más común en los últimos años.

Los láseres de iones de argón tienen la ventaja de tener una calidad de emisión superior y una salida continua que facilita la visualización del flujo y poseen una potencia de salida estable, lo cual simplifica la calibración del sistema PLIF. En comparación, el láser Nd:YAG tiene una calidad de emisión inferior y el poder y la distribución del haz de luz puede variar entre cada pulso (Law y Wang, 2000). La principal ventaja del láser Nd:YAG es su alta potencia de salida en comparación con el láser de iones de argón.

No obstante, la potencia alta del láser Nd: YAG también puede ser problemática. Si la intensidad de excitación del láser es muy alta en relación a la intensidad de saturación del colorante, puede producirse una relación no lineal entre la temperatura y la intensidad de fluorescencia. Este efecto puede ser significativo con láseres pulsados, ya que los tiempos de pulso cortos pueden llevar a intensidades excepcionalmente altas, incluso en comparación con los producidos por los láseres CW de alta potencia. Sin embargo, pueden realizarse mediciones de PLIF bastante exactas con láseres pulsados siempre y cuando se tengan en cuenta los factores antes mencionados (*Melton y Lipp* 2003; *Shan et al.* 2004).

Colorantes orgánicos

La selección del colorante es importante para aplicaciones de medición de temperatura, ya que la sensibilidad a la temperatura varía de acuerdo a las propiedades de cada colorante. Rodamina B y Kiton rojo (también llamado sulforodamina B) son los mejores sensores de temperatura (*Coppeta y Rogers*, 1998). Además, estos dos colorantes también pueden ser excitados por los dos láseres ampliamente disponibles, es decir, el láser de iones de argón o el láser pulsado de doble frecuencia Nd:YAG.

Los factores más importantes para la elección de un colorante incluyen un espectro de absorción que sea compatible con la excitación del láser disponible, una gran separación entre espectros de absorción y de emisión y una alta eficiencia cuántica para maximizar la intensidad de la señal (*Arcoumanis et al.* 1990). Otras consideraciones incluyen el grado de sensibilidad de fluorescencia a la temperatura y el pH (*Walker* 1987; *Coppeta y Rogers* 1998), la susceptibilidad a la descomposición química/fotoquímica conocida como *photobleaching* (*Crimaldi* 2008; *Wang y Fiedler* 2000) y la linealidad de la fluorescencia con la concentración del colorante (*Karasso y Mungal* 1997; *Melton y Lipp* 2003; *Shan et al.* 2004).

Para aplicaciones de PLIF en flujos acuosos, la elección de colorante fluorescente está limitado a aquellos que son solubles en agua. Los colorantes más comunes son Fluoresceína y Rodamina B. Estos dos colorantes de clase xanteno son solubles en agua y poseen eficiencias cuánticas mayores a 0.95 (*Crimaldi* 2008).

Las propiedades de Rodamina B ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$) son apropiadas para llevar a cabo las mediciones de temperatura por medio de PLIF. Este colorante es muy soluble en agua y su fluorescencia, centrada en la parte rojo-naranja del espectro visible, es fuerte. Además, su sensibilidad a la temperatura es alta y la fluorescencia puede ser inducida por un láser Nd:YAG.

14 Introducción

Para este colorante, se ha observado una disminución de la intensidad de fluorescencia de entre el 2 y 3% por Kelvin, de acuerdo con *Nakajima et al.* (1990) y *Sakakibara et al.* (1997). De acuerdo con López Arbeloa et. al (1986, 1991) la disminución de la intensidad de fluorescencia con el aumento de temperatura es causada por una disminución en el rendimiento cuántico. Esta disminución no es dependiente de la longitud de onda como puede concluirse a partir de los espectros de fluorescencia que se muestran en la Figura 2.10. Esta característica combinada con el hecho de que la fluorescencia se produce a una longitud de onda más larga que la absorción, hace que sea posible separar la señal de fluorescencia de la luz láser dispersada elásticamente (sin pérdida de energía). Esto se logra mediante la colocación de un filtro de paso de onda larga en frente de la lente de la cámara, que bloquea la luz con una longitud de onda menor que el espectro de absorción de la Rodamina B disuelta en agua(550nm aproximadamente). De la Figura 2.10 se puede concluir que el láser de Nd: YAG es adecuado para la excitación en mediciones de PLIF si se utiliza Rodamina B como colorante. Además, la onda de excitación de este láser (532 nm) está más cerca de la máxima absorción de la onda de excitación que un láser de iones de Argón (514.5 nm). Esto significa que para una intensidad igual de excitación de un láser de Nd: YAG, se tendrá una intensidad de fluorescencia más alta.

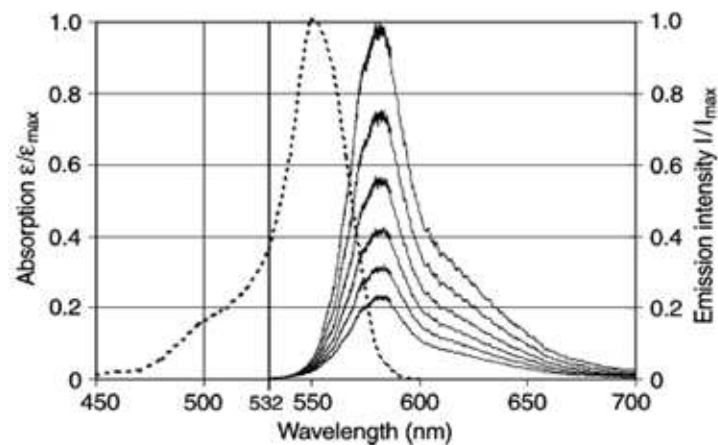


Figura 2.10: Absorción(- - -) y emisión(—) del espectro de rodamina B para 20,30,40,50,60 y 70 °C. Fuente: López Arbeloa (1981)

La Rodamina B es quizá el mejor colorante para mediciones de temperatura en agua mediante PLIF por las siguientes razones:

- 1) Es ampliamente soluble en agua y químicamente estable incluso en niveles altos de concentración.
- 2) Su eficiencia cuántica es alta.
- 3) Los efectos de *Photobleaching* son relativamente pequeños.
- 4) Las características espectrales de este colorante son óptimas cuando se usa con un láser de iones de argón, o preferentemente con un láser Nd:YAG.
- 5) Este colorante es ampliamente sensible a la temperatura y varía al rededor de -3% por °C en un rango de 10-70 °C. (ver cuadro 2.1)

Temperatura(°C)	Intensidad normalizada
20	1.000
30	0.755
40	0.577
50	0.422
60	0.311
70	0.222

Cuadro 2.1: Señal de dependencia a la temperatura de la fluorescencia de Rodamina B (en la longitud de onda máxima de excitación). Fuente: Dynamic Studio v3.14 User's Guide.

Cámaras

La elección de una cámara digital para una aplicación de PLIF regularmente se basa en la maximización del número de píxeles, la profundidad de bits y la tasa de adquisición. El número de píxeles influye en la resolución espacial. La profundidad de bits determina la resolución de la intensidad; una cámara digital con una profundidad de N bits puede obtener una resolución máxima de 2^N escalas de grises (Crimaldi 2008). La mayoría de los experimentos PLIF han empleado cámaras de 8 bits, sin embargo algunos cuantos han utilizado cámaras de 10 (por ejemplo Diez et al. 2005) y de 12 bits (por ejemplo Pan y Meng 2001; Matsumoto et al. 2005) con el objetivo de capturar un mayor rango dinámico de las concentraciones en un sistema. La tasa de adquisición establece la velocidad máxima a la que las imágenes pueden ser tomadas (esta tasa también puede estar limitada por el sistema que se

utiliza para almacenar las imágenes). Para aplicaciones PLIF de alta velocidad, se han utilizado velocidades de hasta 955 cuadros por segundo (Van Vliet *et al.* 2004). Una consideración final es la sensibilidad espectral de la cámara; la sensibilidad del chip CCD o CMOS en la longitud de onda de la fluorescencia influye en el tiempo de exposición requerido para una imagen dada. Como se mencionó anteriormente, un filtro óptico de banda estrecha se coloca generalmente en frente de la lente de la cámara para permitir que sólo las longitudes de onda de fluorescencia sean reflejadas.

2.2.5. Errores de medición e incertidumbres

Uno de los principales errores en la temperatura final medida se debe a una estimación poco precisa en la función de calibración obtenida, ya que si esta función no es lo suficientemente exacta, se introducirá un error considerable al utilizarla para realizar la transformación de intensidad de fluorescencia a temperatura.

Otro factor importante que influye en la exactitud de la medición es la degradación del colorante que se introduce por la salida de alta potencia del láser. Esta degradación hace que la intensidad de la fluorescencia disminuya durante la excitación. Dicha disminución se produce debido a la descomposición química/fotoquímica conocida como *photobleaching* (Saylor 1995). De acuerdo con Coolen *et al.* (1999), para eliminar los efectos de photobleaching el tiempo de excitación debe ser reducido al mínimo durante los experimentos.

De la Figura 2.10 se puede observar que existe una superposición entre la absorción y espectro de emisión. Esta superposición da como resultado una absorción parcial de la señal de fluorescencia también llamado auto-absorción. Parte de esta señal de fluorescencia absorbida se vuelve a emitir. Esta re-emisión es, sin embargo, dependiente de la temperatura debido al rendimiento cuántico dependiente de la temperatura. Esto conducirá a una auto-absorción creciente de aumento de la temperatura y por lo tanto influir en el campo de intensidad obtenido. Sin embargo, para concentraciones de colorante pequeñas, este efecto puede ser despreciable según Coolen *et al.* (1999).

El resultado de los efectos de sombras generalmente se debe a una variación local de la intensidad de excitación, que son causadas por la variación en el índice de refracción en el interior del flujo considerado. Esta variación es causada por una variación de la densidad del fluido. La densidad depende finalmente de la temperatura que hace que el índice de refracción sea dependiente de la temperatura de igual forma. La variación de la intensidad

de excitación que se produce debido a la variación del índice de refracción $\Delta I/I$ puede aproximarse mediante la siguiente ecuación (*Merzkirch* 1974):

$$\frac{\Delta I}{I} = l \int_{x=x_1}^{x=x_2} \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \ln n(x, y, z) dx \quad (2.8)$$

donde x_1 es el inicio de la imagen o cuadro (frame), x_2 el final de la imagen y l la longitud promedio de un cuadro. La sensibilidad térmica del índice de refracción en el agua (con T en $^{\circ}C$) se puede escribir como (*Merzkirch* 1974):

$$\begin{aligned} n(T) = n(\lambda_e, 20C) - 10^{-5}(0,124(T - 20) + 0,1993(T^2 - 400) \\ - 5E(-5)(T^4 - 1,6E4)) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$n(\lambda_e, 20C) = \sqrt{1,76148 - 0,13414\lambda_d + 0,0065438/(\lambda_d - 0,11512)^2} \quad (2.10)$$

$$\text{con } \lambda_d = (\lambda_e x 10^6)^2$$

Usando las ecuaciones 2.8- 2.10 (Solo para un láser Nd :YAG) y aplicándolas para el campo de temperatura determinado por PLIF se calculan las variaciones locales debido a los efectos de sombras. Por otro lado, si se logra obtener alguna imagen de referencia sin efectos de sombras, la variación de la intensidad de excitación puede calcularse sencillamente como (*Coolen et al.* 1999):

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I_0(y, z) - I_0^*(y, z)}{I_0^*} \quad (2.11)$$

donde I_0 es la intensidad de excitación sin efectos de sombras y I_0^* es la intensidad de excitación calculada.

2.3. Velocimetría por Imágenes de Partículas

La Velocimetría por Imágenes de partículas(PIV) es una técnica no invasiva para la visualización de flujos líquidos y gaseosos. Esta técnica proporciona mediciones de los vectores de velocidad instantáneos en una sección transversal de un flujo. Este método ha sido ampliamente utilizado en la industria y en la investigación de dinámica de fluidos.

Para realizar mediciones de PIV, pequeñas partículas conocidas como *partículas trazadoras*, son suspendidas en el fluido, por lo que deben tener una flotabilidad neutra y ser capaces de seguir el flujo. Para flujos acuosos los trazadores pueden estar hechos de poliestireno, poliamida o esferas de cristal huecas con un rango de $5\text{-}100\mu\text{m}$. Si es posible determinar el movimiento de las partículas trazadoras, se conocerá entonces el movimiento del flujo en el cual se encuentran suspendidas. Con el fin de detectar su movimiento, un área del flujo es iluminada por una hoja de luz láser, mientras una cámara de alta velocidad es colocada de forma perpendicular a este plano de luz para capturar las imágenes. La Figura 2.11 muestra la visualización de partículas suspendidas en agua.

Las capturas de la cámara son sincronizadas a la frecuencia del pulso del láser por medio de una unidad de adquisición y control tal como se muestra en la Figura 2.12, cada imagen es transferida y guardada en esta unidad. La técnica de PIV mide la distancia recorrida por las partículas suspendidas en el fluido, lo que conocemos como intervalo de tiempo Δt . Para ello, se emplea una herramienta de procesamiento conocida como *Correlación Cruzada* la cual consiste en lo siguiente:

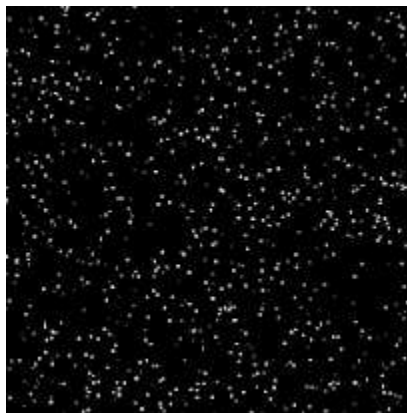


Figura 2.11: *Visualización de partículas trazadoras*

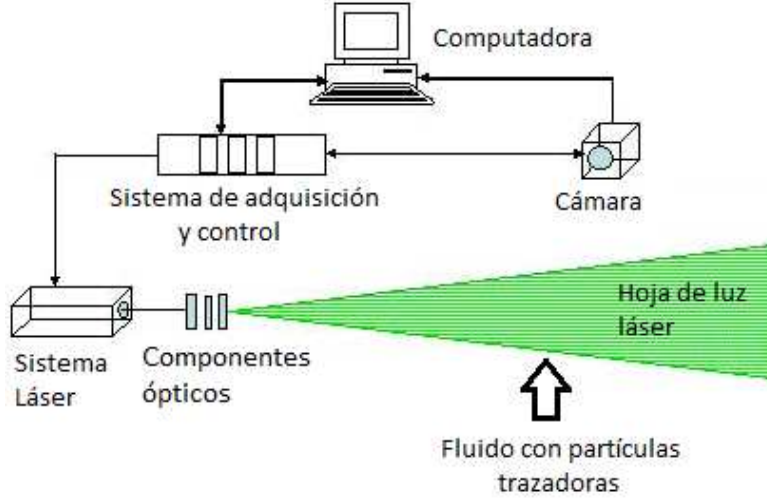


Figura 2.12: Sincronización y adquisición de datos

Dos imágenes con un conocido tiempo de retraso Δt son tomadas, por lo que la posición de cada una de las partículas en ambos tiempos puede ser identificada. Se realiza un mallado que divide cada imagen tomada en pequeñas regiones llamadas *áreas de interrogación*. En cada área de interrogación se compara la posición de las partículas entre la imagen A y la imagen B para producir un vector promedio del desplazamiento. Al realizar la misma correlación en todas las áreas de interrogación, se genera un campo de vectores del promedio de los desplazamientos de las partículas (Figura 2.13). Si se dividen estos valores obtenidos entre el intervalo de tiempo Δt , se obtiene un campo de vectores de velocidad.

Considerando que la función $f(k,l)$ describe la intensidad de la luz dentro de un área de interrogación de la imagen A grabada en el tiempo t y la función $g(k,l)$ describe la intensidad de luz captada en el tiempo $t + \Delta t$ (imagen B) siendo k y l las coordenadas de la imagen en pixeles, la función discreta *Correlación Cruzada* puede ser definida como el valor esperado:

$$\phi_{fg}(k,l) = E[f(k,l), g(k,l)] \quad (2.12)$$

$$\phi_{fg}(k,l) = \sum_{i=1-\infty}^{i=\infty} \sum_{j=1-\infty}^{j=\infty} f(i,j) \cdot g(i+k, j+l) \quad (2.13)$$

20 Introducción

Con el fin de obtener el desplazamiento real de las partículas, un factor de escala es utilizado para relacionar el espacio del objeto(real) y el espacio de la imagen(cámara), es decir; $F = \text{objeto/imagen}$. Con ello se obtienen las distancias en pixeles y su equivalente en mm.

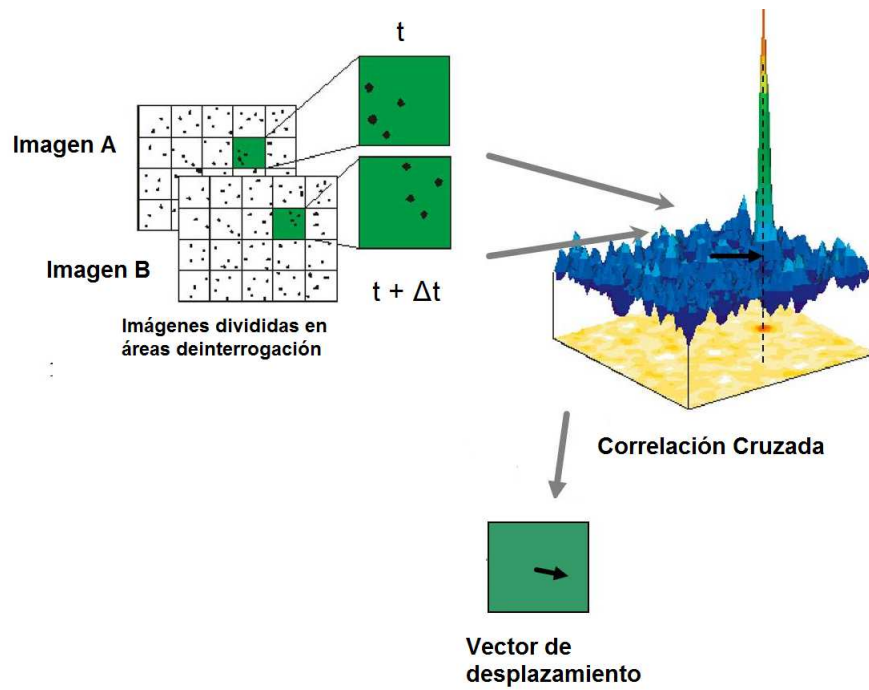


Figura 2.13: *Procesamiento de Correlación Cruzada*

Capítulo 3

Diseño experimental

El experimento consistió en el estudio de la interacción entre un anillo de vorticidad laminar lanzado de forma ascendente con una placa plana caliente colocada horizontalmente. La Figura 3.1 muestra un esquema del arreglo experimental implementado en las mediciones.

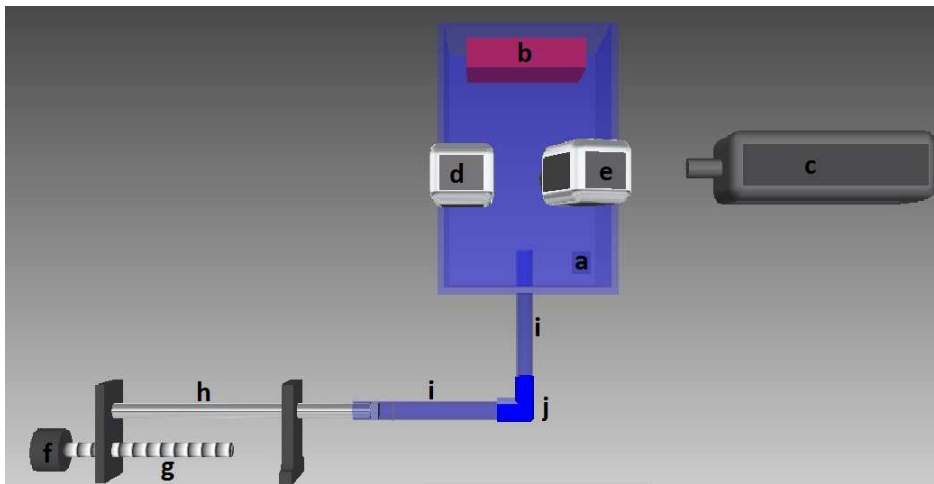


Figura 3.1: Representación esquemática del dispositivo experimental; a) Tanque contenedor de la solución Agua-Rodamina b) Tanque con circulación interna de agua caliente c) Láser d) Cámara 1 (PLIF) e) Cámara 2 (PIV) f) Motor de corriente directa g) Tornillo acoplado al motor h) Pistón i) Tubo de vidrio j) codo a 90° .

22 Diseño experimental

Los anillos de vorticidad se generaron dentro de una solución acuosa de Rodamina B con un dispositivo cilindro-pistón. La placa plana caliente está constituida básicamente por un tanque pequeño de paredes planas con circulación interna de agua caliente generada por un baño térmico que se encuentra a temperatura constante para producir una capa límite térmica estable. El láser genera un plano vertical de luz, el cual pasa por el centro del arreglo experimental, excitando la solución de Rodamina B y haciéndola emitir su fluorescencia(para mediciones PLIF), además de hacer brillar a la partículas trazadoras(para mediciones PIV). Dos cámaras de alta velocidad con chip CMOS son colocadas; una de ellas de forma perpendicular a la luz láser, la otra es colocada con cierto ángulo para poder observar todo el vórtice, de este modo se capturaron de manera simultánea las imágenes para la obtención de los campos de temperaturas y velocidades respectivamente.

En todos los experimentos la superficie plana caliente fue colocada de forma horizontal a una distancia de $10D_0$ (19.4 mm) desde la boquilla del tubo de vidrio como puede apreciarse en el diagrama de la Figura 3.2, en donde también se muestra el marco de referencia empleado. Se hicieron pruebas para vórtices impulsados con distintos desplazamientos del pistón; $L/D_0 = 1$, $L/D_0 = 2$ y $L/D_0 = 3$, donde L es la carrera del pistón y D_0 su diámetro. Además, es importante mencionar que en todos los casos se tomó como referencia el instante $t=0$, en el momento en el que el vórtice se encuentra a una distancia igual a $3D_0$ medida desde la pared.

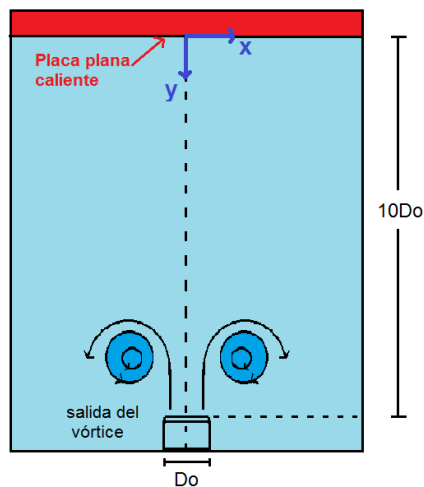


Figura 3.2: Marco de referencia del experimento

3.1. Características del equipo empleado

3.1.1. Dispositivo cilindro-pistón

El cilindro donde se mueve el pistón es de vidrio y tiene un diámetro interior $D_0=1.94$ cm y la salida del tubo está afilada con un ángulo de aproximadamente 20° en la punta con la finalidad de evitar efectos de borde. El pistón esta conectado a un trineo que es conducido a través de un tornillo acoplado a un motor de corriente directa(Figura 3.3). El motor fue impulsado por una fuente de alimentación cuyo voltaje y tiempo de alimentación fueron controlados por un ordenador.

3.1.2. Superficie plana caliente

La placa plana caliente se obtiene por medio de un pequeño tanque hermético(Figura 3.4); 5 de sus paredes están hechas de acrílico de 12 mm de espesor y una de ellas es de vidrio de 3 mm de espesor. Se escogió el vidrio para una de las caras por tener mejor coeficiente de conductividad térmica además de un bajo coeficiente de expansión térmica en comparación con el acrílico, pues esta es la pared que entra en contacto con el vórtice frío al momento de los experimentos. Las dimensiones internas de este tanque son $16.8 \times 13.2 \times 3.3$ cm es decir, tiene una capacidad aproximada de 0.73 litros. Este pequeño tanque cuenta con una entrada y una salida de agua para ser calentado y conservarse a una temperatura constante por medio de un sistema de baño térmico Thermo Haake K15(Figura 3.5) y un un sistema de recirculación; Circulator DC10 (Figura 3.6), el cual genera un flujo constante de agua impulsada dentro de este. El sistema cuenta con una capacidad de circulación de 17 l/min, un rango de temperatura de funcionamiento de -30 a 100 °C y una precisión de temperatura de $0,02 \pm$ °C.

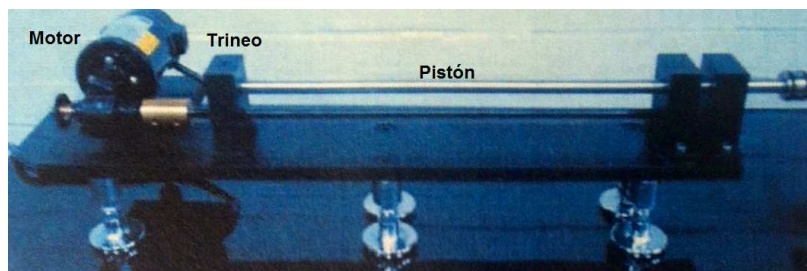


Figura 3.3: *Dispositivo cilindro-pistón y mecanismo de accionamiento.*

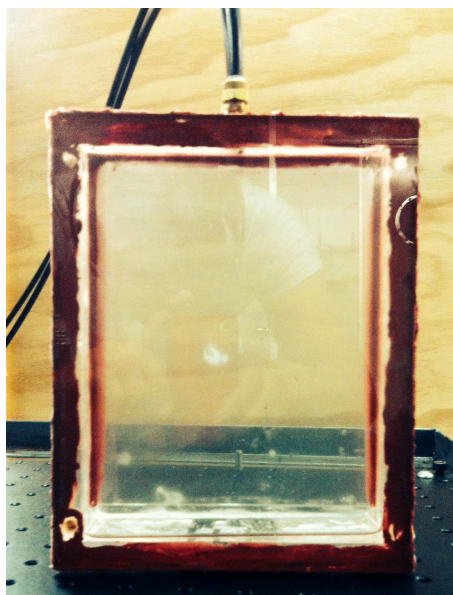


Figura 3.4: *Tanque hermético con recirculación de agua*



Figura 3.5: *Sistema de baño térmico-Thermo Haake K15*



Figura 3.6: *Sistema de recirculación-Circulator DC10*

3.1.3. Equipo para mediciones PIV y PLIF

Se utilizó un láser pulsado Nd: YAG que genera un haz de luz a 532 nm y posee una potencia de salida de 150 W (Figura 3.7), al cual está acoplado un arreglo óptico para generar un plano de luz cuyo espesor es de 3 mm aproximadamente. El pulso del láser fue sincronizado con dos cámaras con chip CMOS de alta velocidad; Speed Sense Phantom (Figura 3.8) a una frecuencia de medición de 100 Hz. En la cámara 1 (medición de temperaturas) se colocó un filtro óptico (Figura 3.9) con la finalidad de bloquear la luz con longitudes de onda menores a la de la fluorescencia del marcador de temperatura utilizado y de este modo observar con mejor resolución la intensidad de fluorescencia de dicho colorante, además con esto se filtra también el brillo de las partículas trazadoras impidiendo que interfieran en la medición de temperatura y solo sean observadas por la cámara 2.

Por otra parte, la cámara 2 (medición de velocidades), no está perfectamente colocada de forma perpendicular a la hoja de luz del láser, pues la cámara 1 interfiere con la visualización completa del vórtice en la cámara 2, así que tiene que ser colocada con un ligero ángulo y hacerse una corrección con ayuda de una tarjeta de calibración, en estos experimentos se empleó una tarjeta de 20 x 20 cm con puntos de referencia equidistantes a 0.5 cm (Figura 3.10).

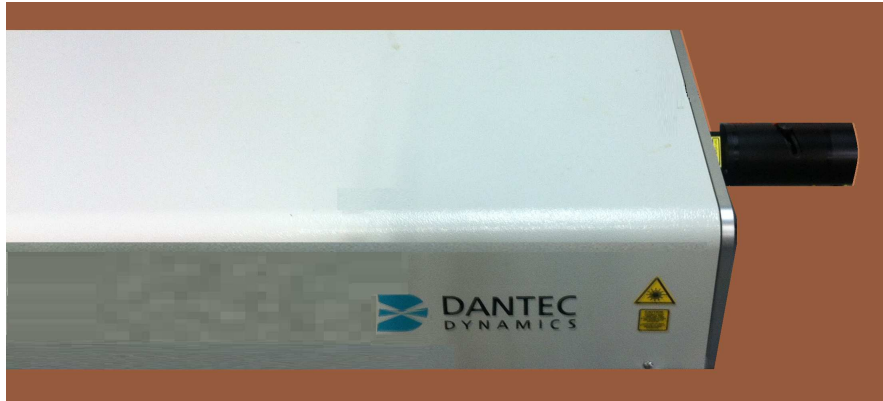


Figura 3.7: Láser Nd: YAG

Para las mediciones PLIF, como indicador de temperatura se utilizó el compuesto Rodamina B (Figura 3.11) disuelto en agua, ya que como se explicó en la sección 2.2.4, presenta algunas ventajas para hacer mediciones de temperatura usando la técnica PLIF en medios acuosos. Se utilizó una concentración $C = 1 \times 10^{-6}$ mol/l, ya que tanto *Bruchhausen et al.* (2005), así como *Lemoine et al.* (1999); señalaron que esta concentración de Rodamina B es bastante adecuada si se desea conservar un comportamiento lineal entre temperatura y fluorescencia con una excitación de láser a 532 nm. Además, como se mencionó también en la sección 2.2.4 esta concentración es lo suficientemente baja para evitar efectos de atenuación significativos debido a la absorción del haz de láser incidente y la re-absorción de la fluorescencia en el medio (*Lemoine et al.* 1996). Este colorante cuya fórmula química es $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$, tiene un peso molecular de 479.02 g/mol, por lo que la concentración que se empleó en los experimentos descritos en este trabajo fue de 0.47902 mg/l. Por otro lado para mediciones de velocimetría (PIV), se emplearon como partículas trazadoras esferas de vidrio recubiertas de plata con flotación neutra las cuales tienen un diámetro promedio de $10 \mu m$.

Los registros de las cámaras fueron sincronizados con el disparo del láser y almacenados con ayuda del software *Dynamic Studio*®, con el cual también se llevó a cabo parte del procesamiento de imágenes. El procesamiento final y los cálculos posteriores fueron realizados con ayuda del software *Matlab*® (ver Apéndice B).



Figura 3.8: *Cámara CMOS de alta velocidad:Speed Sense Phantom.*



Figura 3.9: *Filtro óptico de banda estrecha.*

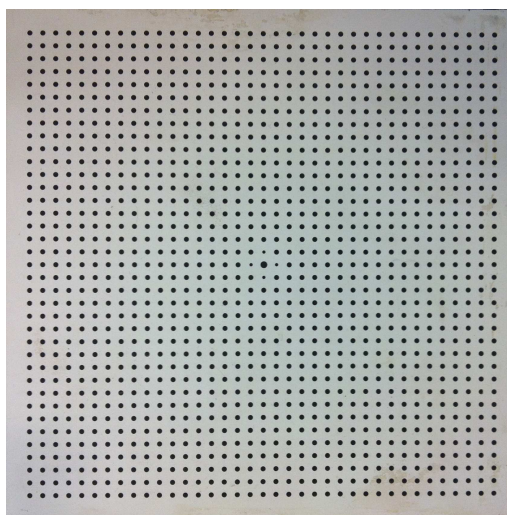


Figura 3.10: *Tarjeta de calibración.*



Figura 3.11: *Colorante usado como indicador de temperatura-Rodamina B.*

3.2. Consideraciones y mediciones previas

3.2.1. Registro de temperaturas con termopares

El agua que circula dentro del tanque que genera la placa caliente se encuentra a una temperatura de 60°C en todos los experimentos y la temperatura del medio acuoso se mantiene en 22.5°C , por lo tanto, debe considerarse que 60°C es la temperatura en el interior de el tanque, pero es necesario conocer la temperatura real en la superficie de la placa caliente, además de determinar la temperatura que se tendrá cuando dicha placa entre en contacto con la solución acuosa. Por tal motivo se realizaron algunas mediciones previas a los experimentos finales con las técnicas PLIF y PIV.

Para ello, fueron colocados 5 termopares planos de respuesta rápida Omega Enginering modelo SA1-K-72 y SA1-T-72 acoplados y distribuidos en diferentes partes de la superficie de vidrio tal como lo ilustra la Figura 3.12. Sus dimensiones son 26 x 19 mm y 1mm de espesor y cuentan con un rango de temperatura medible de -60°C a 177°C . Los termopares están conectados a una tarjeta de adquisición externa USB-TEMP de la marca Measuring Computing similar a la mostrada en la Figura 3.13. Esta tarjeta permite realizar hasta 8 mediciones simultáneas utilizando distintos sensores como termopares y sincronizarlos con un ordenador para la obtención de datos.

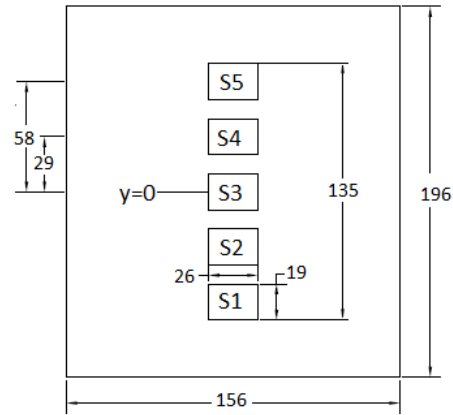


Figura 3.12: Distribución de los termopares en la superficie plana (medidas dadas en mm).



Figura 3.13: Tarjeta de adquisición externa de datos.

Temperatura de la superficie plana caliente

Se definió la variable $\theta = (T - T_i)/T_i$ para poder observar a mayor detalle el comportamiento de la temperatura en cada termopar, donde T es la temperatura medida en cada instante de tiempo y T_i es la temperatura inicial registrada en cada uno de los termopares.

La gráfica de la Figura 3.14 muestra los datos obtenidos del calentamiento de la superficie(en aire) a partir de la temperatura ambiente por medio del sistema de circulación de agua a 60 °C mencionado anteriormente. Puede observarse que a la superficie le toma 1700 segundos(28.33 minutos) estabilizarse a un valor promedio de $\theta=1.4$ (54.7°C aproximadamente), por lo que debe de considerarse ese tiempo de espera desde el encendido del equipo para poder sumergir la placa dentro del medio liquido.

Por otro lado, la Figura 3.15 muestra el registro de temperatura de los termopares desde el momento en que la placa plana es sumergida en la solución acuosa. Se puede apreciar que desde los 220 segundos la temperatura se estabiliza y permanece constante con un valor promedio de $\theta=0.3$ (37.1°C) hasta los 340 segundos cuando la temperatura comienza a elevarse de nuevo. Por lo tanto, el lanzamiento del vórtice debe realizarse en este intervalo de tiempo(3.6-5.7 minutos) para poder considerar una temperatura de placa constante a 37.1°C.

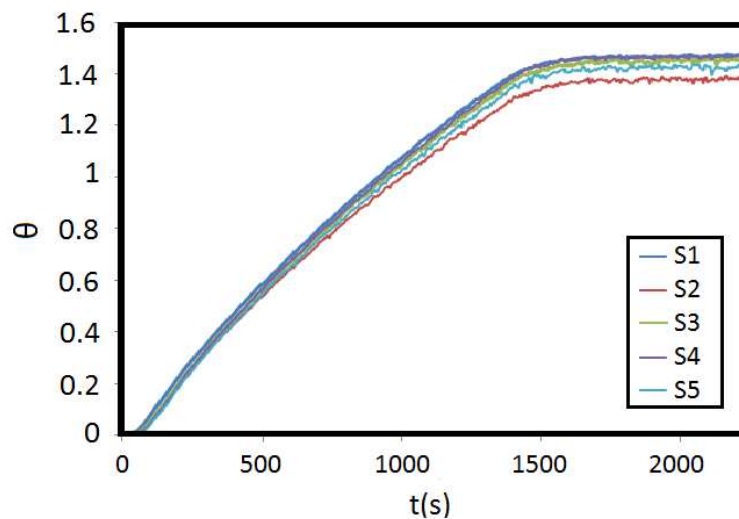


Figura 3.14: Evolución de la Temperatura de la superficie plana al ser calentada. ($\theta = \frac{T-T_i}{T_i}$)

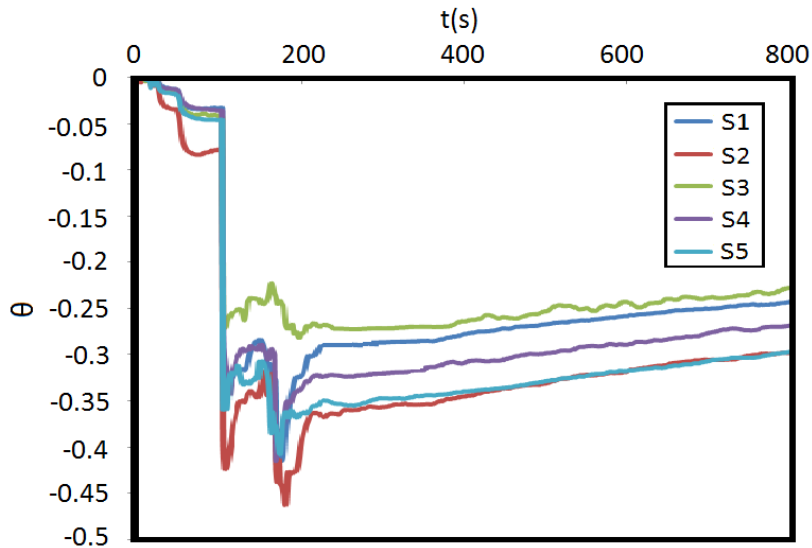


Figura 3.15: Evolucion de la Temperatura de la superficie plana caliente sumergida en agua a $22.5^{\circ}C$. ($\theta = \frac{T-T_i}{T_i}$)

Colisión del vórtice con la pared

También se realizó una prueba la cual consistió en colocar la placa plana caliente dentro del medio acuoso frío de forma horizontal (misma posición en la que permanecerá en los experimentos posteriores de PLIF) y fue lanzado un anillo de vorticidad con ayuda del dispositivo cilindro-pistón descrito anteriormente con un voltaje de 40V y un desplazamiento $L/D_0=2$. Los 5 termopares antes mencionados permanecieron adheridos a la superficie para registrar la temperatura en la pared.

La Figura 3.16 muestra una gráfica de los valores registrados por los termopares al hacer colisionar el vórtice con la superficie plana caliente. Se puede observar que los termopares $S1$, $S2$, $S4$ y $S5$ perciben solo pequeñas perturbaciones cuando el vórtice colisiona con la pared, pues la temperatura registrada por ellos permanece aproximadamente constante todo el tiempo. Sin embargo, el Termopar $S3$, que es el que registra la temperatura justo en el centro de la pared (región donde el vórtice colisiona directamente con ella) registró una temperatura constante de aproximadamente $37.1^{\circ}C$ ($\theta=0$)

la cual disminuye súbitamente segundos después del lanzamiento del vórtice hasta los 29°C ($\theta = -0.24$), para después reincorporarse de nuevo a una temperatura estable de 37.1°C . Lo anterior deja ver de forma clara el efecto de transferencia de calor por convección que genera el vórtice al ser lanzado y chocar con la superficie caliente, pues remueve por algunos instantes el fluido caliente cercano a la pared.

3.2.2. Velocidad del pistón

La velocidad con que el pistón se mueve dentro del tubo de vidrio para generar el anillo de vorticidad es muy importante y se considera un parámetro característico de los experimentos realizados. Para todos los experimentos se empleó un voltaje de 40V y una corriente de 0.49 A . Bajo estas condiciones se capturó una secuencia de imágenes del movimiento del pistón para determinar su velocidad.

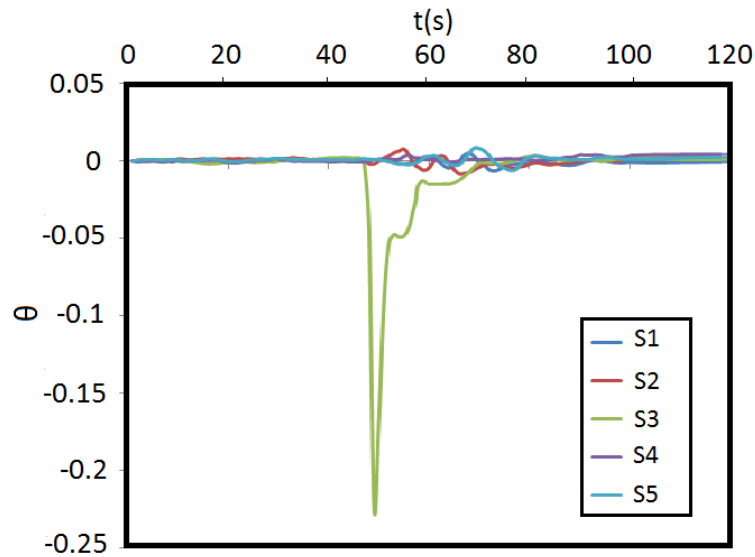


Figura 3.16: Respuesta de los termopares ante la presencia del vórtice en la superficie caliente. ($\theta = \frac{T - T_i}{T_i}$)

Como se observa en la Figura 3.17 se colocó un punto negro como marcador en el pistón para observar su movimiento. Con un procesamiento posterior en *Matlab*® se localizó el centroide de dicho punto el cual es mostrado con un marcador rosa en forma de cruz. Al seguir la trayectoria de dicho centroide, se obtuvo la posición del pistón en cada instante de tiempo. A su vez, si se conoce el tiempo entre cada captura de imagen es posible determinar la velocidad de este en cada instante como lo muestra la gráfica de la Figura 3.18. De dicha gráfica puede observarse que el pistón se acelera en aproximadamente 0.1s hasta llegar a una velocidad relativamente constante y que cuando deja de recibir la corriente de alimentación le toma 0.2s detenerse por completo. Es evidente la existencia de pequeñas fluctuaciones de la velocidad del pistón dentro del tubo de vidrio, sin embargo, para un análisis practico es posible tomar un valor promedio para los datos obtenidos después de la aceleración del pistón y antes de la desaceleración del mismo. Se determino de esta forma una velocidad promedio del pistón $U_p = 94,89\text{mm/s}$.

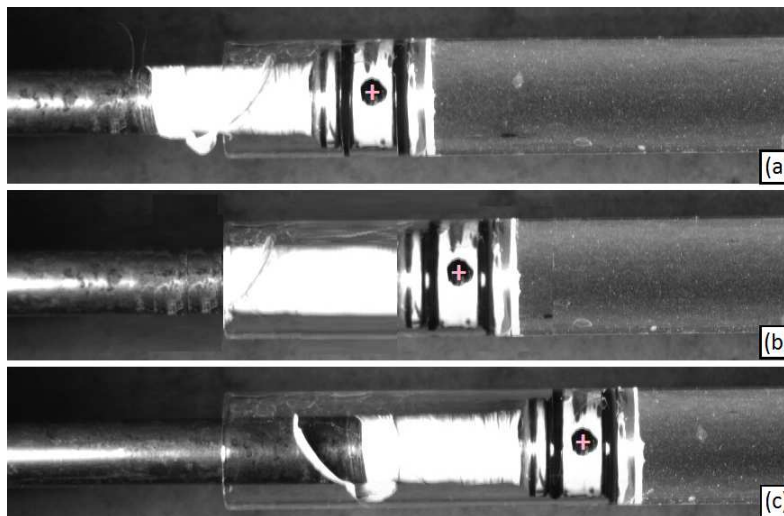


Figura 3.17: *Captura del movimiento del pistón dentro del tubo de vidrio; a) Posición inicial(pistón detenido), b) Posición intermedia(pistón en movimiento), c) Posición final(pistón detenido)*

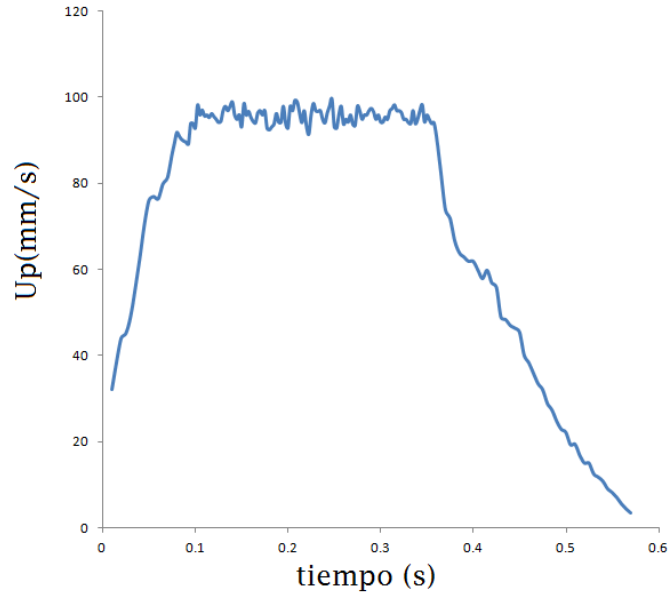


Figura 3.18: *Movimiento del pistón a 40V y 0.49A*

Ademas, al conocer el valor de la velocidad del pistón fue posible calcular el numero de Reynolds de la forma:

$$\mathbf{Re} = \frac{U_p D_0 \rho}{\mu} \quad (3.1)$$

donde ρ es la densidad y μ la viscosidad dinámica del agua. Se obtuvo como resultado para todos los experimentos un valor $\mathbf{Re} = 1800$.

3.2.3. Ajuste de imágenes

Como se indicó previamente, se realizaron mediciones simultáneas de temperatura y velocimetría con ayuda de dos cámaras rápidas de chip CMOS. La cámara 1 de donde se obtuvieron los datos de temperatura fue colocada

de forma perfectamente perpendicular a la hoja de luz láser, sin embargo la cámara 2, donde se obtuvieron los campos de velocidad posee cierto ángulo de inclinación θ con la finalidad de poder observar perfectamente el fenómeno a estudiar sin que la cámara 1 interfiera con su visión tal como se muestra en la Figura 3.19. Por lo tanto es necesario hacer un ajuste a las imágenes capturadas por esta cámara, pues de lo contrario se obtendrían resultados erróneos. En principio, si se conocen algunos parámetros como ángulos, distancias etc., es posible calcular un modelo de transformación que permita obtener dicho ajuste. Sin embargo, este procedimiento es poco práctico pues puede resultar complicado medir dichos parámetros con una exactitud suficientemente buena.

En lugar de ello, se utiliza un enfoque experimental donde se registran y analizan los parámetros de las imágenes de una tarjeta de calibración como la que se describió en la sección anterior. En el presente trabajo se empleó el software *Dynamic Studio*® para aplicar uno de sus modelos matemáticos de ajuste el cual consiste en la aplicación de una matriz de transformación que modifica una imagen distorsionada por el ángulo de visión a su tamaño y forma real. El procedimiento que se tuvo que seguir fue el siguiente;

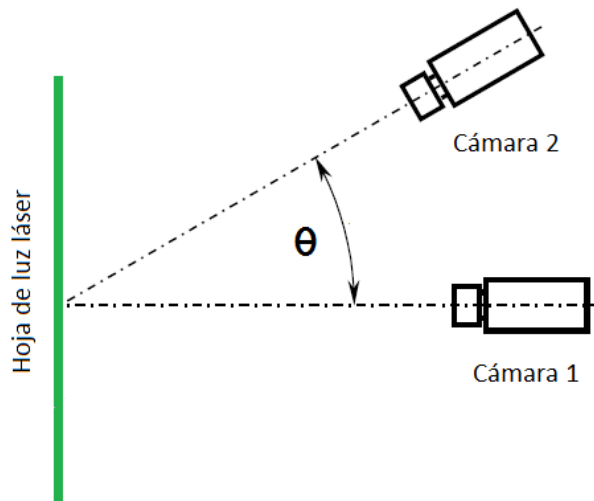


Figura 3.19: Posición de las cámaras respecto a la hoja de luz láser.

Primero se debe alinear la tarjeta de calibración con la hoja de luz láser, así como colocar la cámara en la posición en la que permanecerá durante todos los experimentos. La cámara tiene que ver el mayor área posible de la tarjeta de calibración y enfocar perfectamente sus puntos. En algunos casos las cámaras permiten girar su lente como lo muestra la Figura 3.20 donde se puede apreciar no solo la existencia de un ángulo θ , que es el ángulo existente entre la lente y el área de visión, sino que además la lente posee un ángulo ϕ respecto a la posición de la cámara, el cual es útil para la obtención de un mejor enfoque.

Después se asigna un eje de referencia, usualmente la tarjeta de calibración incluye un punto grande (el marcador cero) rodeado por cuatro más pequeñas (los marcadores de eje) para identificar el origen del sistema de coordenadas. Una vez enfocado, se toma una imagen de referencia con la cual el software es capaz de localizar el centro de cada uno de estos puntos aunque en la imagen aparezcan distorsionados y como se conoce la distancia real entre ellos (5mm), así como la distancia en píxeles de acuerdo con la imagen captada, es posible aplicar una *transformación lineal directa* (TLD) tal como se muestra en la Figura 3.21 donde \mathbf{X}, \mathbf{Y} y \mathbf{Z} son las coordenadas en mm de los puntos de la tarjeta de calibración, \mathbf{x} y \mathbf{y} representan las coordenadas correspondientes de la imagen en píxeles y los valores A_{mn} son constantes de calibración.

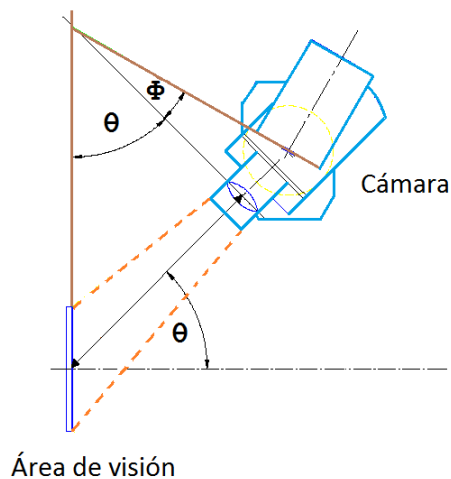


Figura 3.20: Posición de la cámara utilizada en los experimentos.

Las propiedades de la transformación realizada que nos proporciona el software son mostradas en la Figura 3.22 donde pueden observarse los coeficientes de la matriz de transformación empleada así como el error obtenido al realizar dicho ajuste, el cual resulta ser del orden de 0.4%. Por otro lado, la Figura 3.23 muestra el proceso de ajuste de imágenes descrito anteriormente, en la Figura 3.23(a) se observa la tarjeta de calibración deformada tal como fue captada por la cámara, la Figura 3.23(b) muestra como todos los puntos de la tarjeta son detectados para su ajuste y finalmente la Figura 3.23(c) muestra la imagen obtenida después de aplicarse la Transformación Lineal Directa.

Transformación Lineal Directa

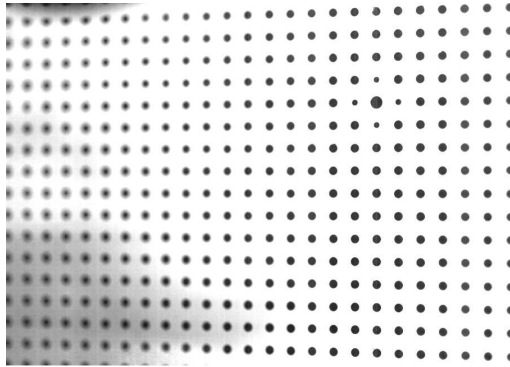
$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x = \frac{k_x}{k_0}, \quad y = \frac{k_y}{k_0}$$

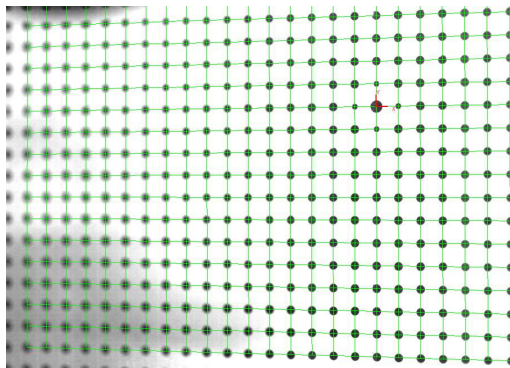
Figura 3.21: *Modelo de Transformación Lineal Directa.*

#	1	2	3	4
1	Average reprojection error (pixels)			
2	3.94728E-001			
3	DLT matrix:			
4	1.29729E+001	1.54727E-002	0.00000E+000	1.17312E+003
5	-4.08075E-001	1.44739E+001	0.00000E+000	8.35851E+002
6	-7.21871E-004	3.42563E-005	0.00000E+000	1.00000E+000
7				
8				
9				
10	Reprojection Error (per view)	No. points		
11	3.94728E-001	Points: 382		
12				

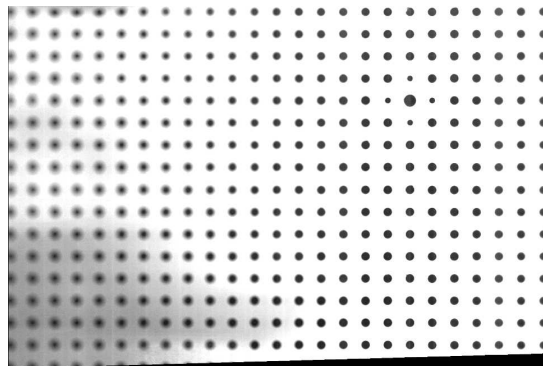
Figura 3.22: *Propiedades del ajuste de imagen realizado.*



(a) *Imagen deformada.*



(b) *Puntos detectados para la creación de la matriz de transformación.*



(c) *Imagen ajustada.*

Figura 3.23: *Imagen ajustada mediante Transformación Lineal Directa.*

Capítulo 4

Propiedades del vórtice

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la técnica de PIV para estudiar el comportamiento hidrodinámico de los anillos de vorticidad presentes en los experimentos realizados. El presente capítulo describe algunas técnicas matemáticas para la identificación de los vórtices y su centro geométrico. Además se mostrarán algunas propiedades de interés del vórtice antes y después de su interacción con la pared; tales como la trayectoria, el diámetro de vórtice, la velocidad de traslación y la circulación.

4.1. Identificación del vórtice

Existen numerosos métodos para la identificación de vórtices basados en un análisis local del tensor gradiente de velocidad $\nabla\mathbf{u}$. Entre los más utilizados está el *criterio Q*, dicho método usa la descomposición del gradiente de velocidad de la siguiente forma:

$$\nabla\mathbf{u} = \mathbf{D} + \mathbf{\Omega} \quad (4.1)$$

donde

$\mathbf{D} = \frac{1}{2}((\nabla\mathbf{u}) + (\nabla\mathbf{u})^t)$ es la componente simétrica de $\nabla\mathbf{u}$ y

$\mathbf{\Omega} = \frac{1}{2}((\nabla\mathbf{u}) - (\nabla\mathbf{u})^t)$ es la componente antisimétrica de $\nabla\mathbf{u}$

El tensor \mathbf{D} es llamado comúnmente *Tensor de rapidez de deformación*, mientras que al tensor $\mathbf{\Omega}$ se le conoce como *Tensor de rapidez de rotación*.

El segundo invariante Q , para un flujo incompresible ($\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$) está definido como:

$$Q = \frac{1}{2}(|\boldsymbol{\Omega}|^2 - |\mathbf{D}|^2) \quad (4.2)$$

donde

$$|\boldsymbol{\Omega}| = \text{tr}[\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\Omega}^t]^{1/2} \text{ y}$$

$$|\mathbf{D}| = \text{tr}[\mathbf{D}\mathbf{D}^t]^{1/2}$$

En las regiones donde $Q > 0$, la tasa de rotación es mayor que la tasa de deformación, por lo tanto esta región espacial pertenece a un vórtice. El valor de Q puede ser evaluado punto a punto para determinar si se encuentra dentro o fuera del vórtice.

4.2. Centro del vórtice

De acuerdo con *Palacios(2010)* es posible encontrar puntos especiales dentro del flujo para la localización el centro del anillo de vorticidad. En flujos bidimensionales, dos tipos de puntos especiales pueden ser identificados en las regiones donde la velocidad local llega a ser cero. Para las regiones de flujo donde la vorticidad es dominante se pueden encontrar los denominados puntos *elípticos*, mientras que en las regiones donde la deformación es dominante se encuentran los llamados puntos *hiperbólicos*. Se sabe que los puntos elípticos corresponden a los centros de los vórtices en un flujo (*Chong et al. 1990*). Es posible encontrar dichos puntos calculando la curvatura de las trayectorias del movimiento de los elementos del fluido. Cerca de los puntos elípticos e hiperbólicos, la dirección de las trayectorias cambian en escalas de longitud muy cortas, produciendo grandes valores de curvatura. La curvatura puede ser obtenida de acuerdo a la siguiente ecuación (*Braun et al. 2006*):

$$k(t) = \frac{|\mathbf{u} \times \partial_t \mathbf{u} + \mathbf{u} \times [\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}]|}{|\mathbf{u}|^3} \quad (4.3)$$

donde \mathbf{u} es el campo de velocidad y ∂_t es la derivada parcial respecto al tiempo. Una vez que los puntos de máxima curvatura son identificados, es posible determinar si son elípticos o hiperbólicos empleando el criterio

Q descrito anteriormente. Cuando se tiene un punto especial con un valor de $Q < 0$ el flujo local es dominado por la deformación; pero si $Q > 0$, donde la rotación es dominante, el punto corresponde al centro del anillo de vorticidad.

La Figura 4.1 muestra el campo de velocidades de un vórtice en el cual fueron colocados dos marcadores(+) correspondientes a los puntos de máxima curvatura encontrados, puede observarse que efectivamente dichos puntos coinciden con el centro geométrico del vórtice.

4.3. Vorticidad

La vorticidad es una medida de la velocidad de rotación de un pequeño elemento del fluido alrededor de sus propios ejes. El movimiento de un elemento del fluido con vorticidad cero ($\nabla \times \mathbf{u} = 0$) es llamado irrotacional". La vorticidad $\boldsymbol{\omega}$ de un campo de flujo \mathbf{u} esta definida por:

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u} \tag{4.4}$$

4.4. Circulación

La circulación Γ es otro concepto importante en Mecánica de Fluidos y se define como una integral de línea de la velocidad de un flujo \mathbf{u} a lo largo de un circuito cerrado C de la siguiente forma:

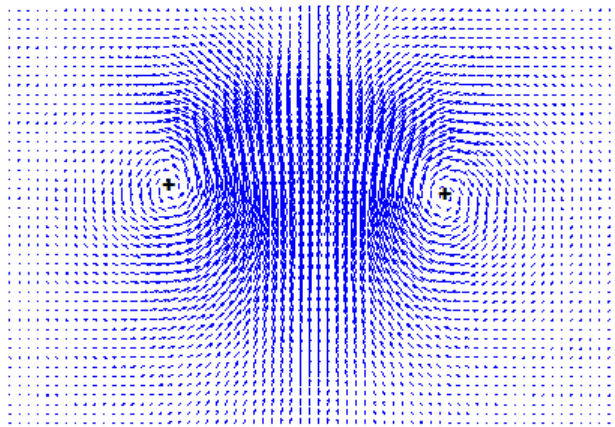


Figura 4.1: Localización del centro geométrico del vórtice

$$\Gamma = \oint_C \mathbf{u} \cdot d\mathbf{l} \quad (4.5)$$

donde $d\mathbf{l}$ es la diferencial de longitud en la curva C .

De acuerdo al teorema de Stokes, una integral de línea puede ser transformada en una integral de superficie, por lo que se puede llegar a la siguiente expresión:

$$\Gamma = \oint_C \mathbf{u} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\nabla \times \mathbf{u}) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n} dS \quad (4.6)$$

donde S es una diferencial de área perpendicular a \mathbf{n} .

La Circulación es una cantidad escalar que mide la componente de la vorticidad normal integrada en la superficie rodeada por C . Para un flujo 2D la circulación total es igual a la suma de la vorticidad total en el campo del flujo.

4.5. Resultados

La Figura 4.2 muestra los campos de velocidad superpuestos en los de vorticidad obtenidos para el lanzamiento de un vórtice con un desplazamiento de pistón $L/D_0=3$. Esta serie de imágenes ejemplifica el comportamiento del vórtice al acercarse e interactuar con la pared para todos los casos. En los campos de vorticidad se puede observar que a medida que el vórtice se acerca a la pared, se genera un vórtice secundario con una rotación en sentido opuesto al vórtice primario como ya ha sido observado en estudios previos por otros autores (*Orlandi P.1993; Guzmán et al.2012*).

Para observar el comportamiento del vórtice con un mayor detalle, el *Apéndice A* muestra para cada uno de los casos analizados sus respectivos campos de velocidad y de vorticidad por separado, además de presentar secuencias de imágenes más amplias y con un Δt mas pequeño.

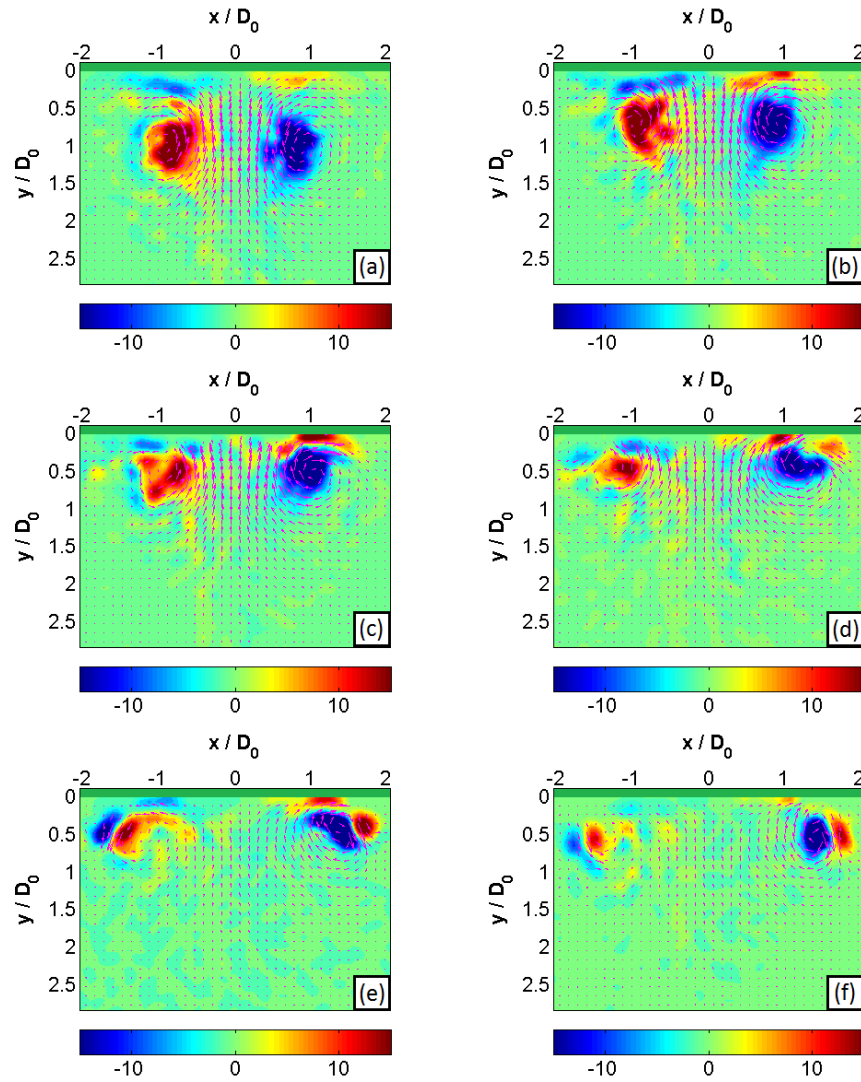


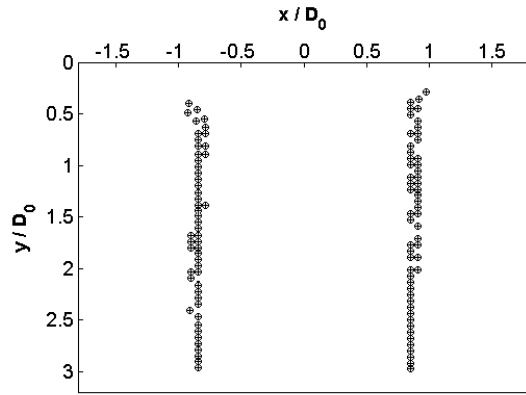
Figura 4.2: Superposición de los campos de velocidad en los campos de vorticidad ($L/D_0=3$); a) $t=1.08s$, b) $t=1.28s$, c) $t=1.48s$, d) $t=1.68s$, e) $t=1.88s$, f) $t=2.08s$.

Trayectoria y diámetro de vórtice

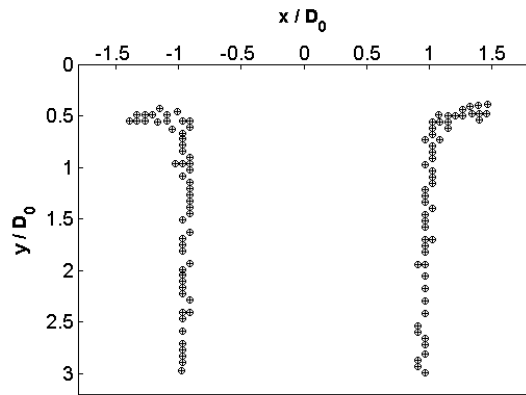
Como se comentó anteriormente, la trayectoria del vórtice fue determinada calculando los centros de vórtice con el criterio de máxima curvatura. La Figura 4.3 muestra la trayectoria del vórtice a partir de que este se encuentra a una distancia de $3D_0$ de la pared y hasta algunos instantes después de que interactúa con la superficie plana.

En los los vórtices lanzados con desplazamientos de pistón $L/D_0=2$ y $L/D_0=3$ puede observarse claramente que la distancia entre cada centro de vórtice localizado empieza a incrementarse cuando estos se encuentran a una distancia aproximada de $0.75D_0$ de la pared y continúa creciendo conforme el vórtice sigue acercándose a ella. Por otro lado, para los vórtices lanzados con un desplazamiento $L/D_0=1$ este comportamiento es menos notorio, ya que los vórtices llegan demasiado débiles al aproximarse a la pared. Si observamos los campos de vorticidad obtenidos para cada caso (ver *Apendice A*), lo anterior parece bastante obvio, ya que para el caso $L/D_0=1$ se obtuvieron valores de vorticidad muy pequeños en comparación con los otros dos casos analizados.

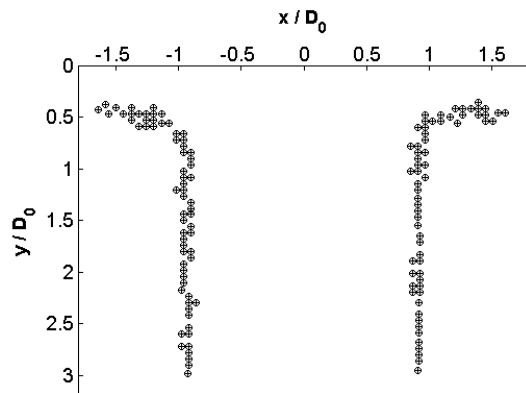
El efecto antes mencionado puede ser observado con mayor facilidad calculando el diámetro de vórtice D_v , el cual se obtiene al medir la distancia entre cada centro de vórtice encontrado en cada instante. La Figura 4.4 muestra la evolución del diámetro de vórtice nuevamente desde que el vórtice se encuentra a una distancia de $3D_0$ de la pared. Para el caso $L/D_0=1$, el diámetro de vórtice posee un valor aproximado $D_v/D_0 = 1.7$ durante su trayectoria por el medio acuoso, pero al aproximarse a la pared y colisionar con ella crece hasta un valor $D_v/D_0=1.9$. Por otro lado, el vórtice lanzado con un desplazamiento de $L/D_0=2$ posee un diámetro inicial $D_v/D_0=1.8$ y después de chocar con la superficie plana su diámetro llega a ser de $D_v/D_0=3$. Finalmente para $L/D_0=3$, el diámetro de vórtice crece desde $D_v/D_0=1.8$ hasta $D_v/D_0=3.2$ después de su colisión con la pared.



(a) $L/D_0 = 1$

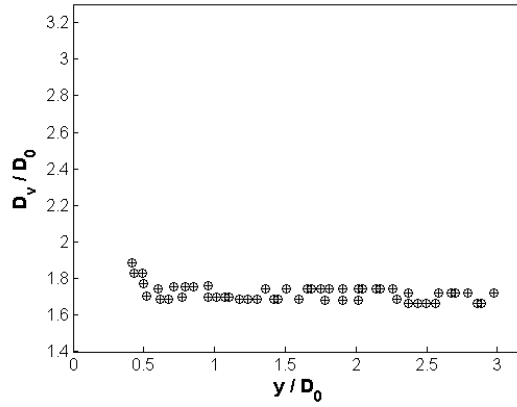


(b) $L/D_0 = 2$

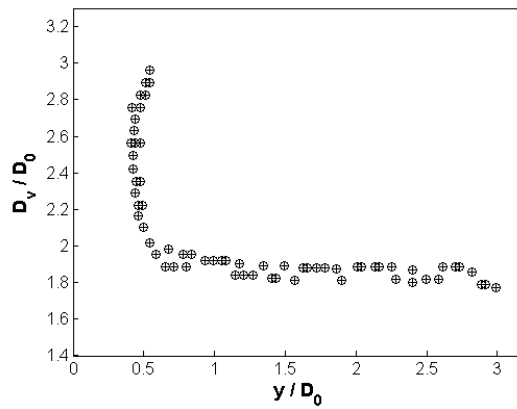


(c) $L/D_0 = 3$

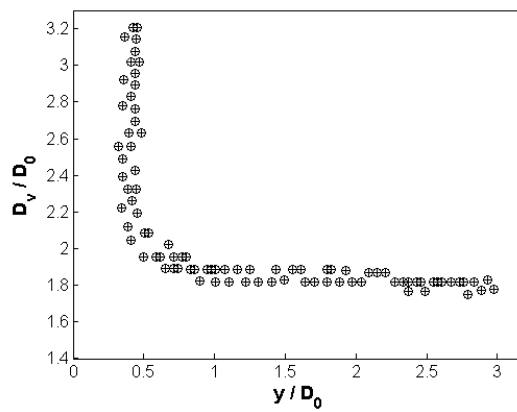
Figura 4.3: Trayectoria del vórtice de acuerdo al criterio de máxima curvatura.



(a) $L/D_0 = 1$



(b) $L/D_0 = 2$



(c) $L/D_0 = 3$

Figura 4.4: Diámetro de vórtice.

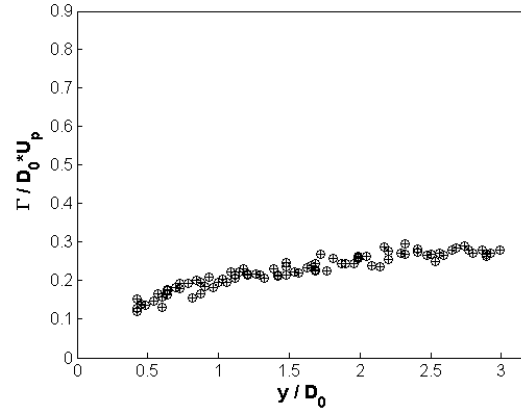
Circulación

También se determinó el valor de la circulación en cada caso a partir de que el vórtice se encuentra a una distancia de $3D_0$ (Figura 4.5), para ello se realizó el cálculo como se indicó en la ecuación 4.6, aunque la teoría de identificación de vórtices hace mención que los valores de $Q > 0$ indican la presencia de un vórtice, muchos autores han encontrado mas adecuado considerar únicamente los valores de $Q > 0.01s^{-1}$ (por ejemplo *Palacios et al. 2014*), el presente trabajo tomó en cuenta este mismo criterio, calculando por lo tanto la circulación Γ como la sumatoria de todos los valores de ω en la región donde $Q > 0.01s^{-1}$.

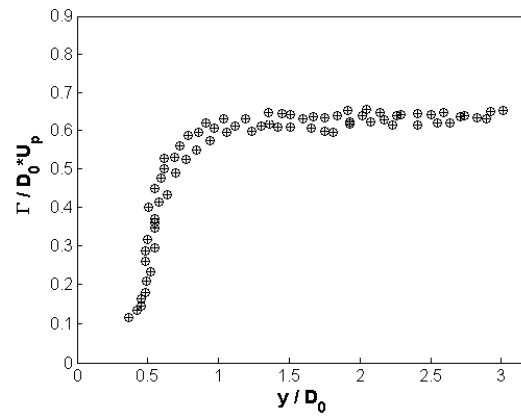
Nuevamente el caso $L/D_0=1$ presenta un comportamiento un poco distinto a los otros dos, pues el valor obtenido de $\Gamma/D_0 * U_p$ cuando el vórtice se encuentra a una distancia de $3D_0$ de la pared fue de 0.28 y durante toda su trayectoria decae de forma continua hasta llegar a un valor $\Gamma/D_0 * U_p = 0.11$. Lo anterior también puede interpretarse como resultado de los valores de vorticidad inferiores obtenidos en este caso.

Para el vórtice generado con un desplazamiento $L/D_0=2$, se obtuvo un valor de $\Gamma/D_0 * U_p=0.62$ que permanece aproximadamente constante desde que este se encuentra a una distancia de $3D_0$ de la pared hasta que llega a una distancia aproximada de $0.8D_0$ cuando comienza a descender dicho valor hasta llegar a $\Gamma/D_0 * U_p=0.11$.

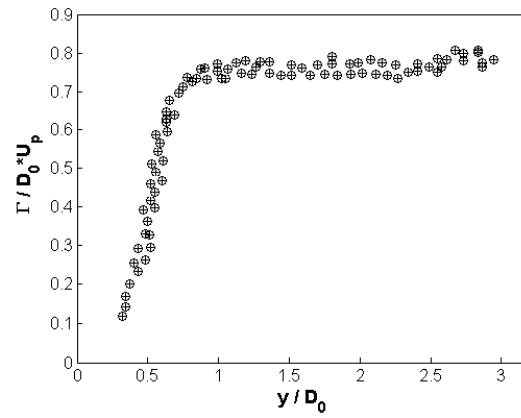
Por ultimo para $L/D_0=3$ se obtuvo un valor aproximadamente constante $\Gamma/D_0 * U_p=0.78$ desde una posición de $3D_0$ y hasta una distancia de $0.8D_0$ de la pared que comienza a disminuir de forma continua hasta llegar a un valor de $\Gamma/D_0 * U_p=0.11$.



(a) $L/D_0 = 1$



(b) $L/D_0 = 2$



(c) $L/D_0 = 3$

Figura 4.5: Circulación.

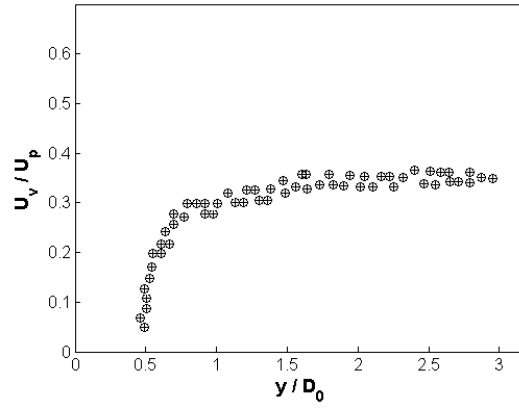
Velocidad de traslación

La velocidad de traslación del vórtice U_v es otra de las propiedades hidrodinámicas importantes en los vórtices, por ello también fue calculada para todos los caso analizados en el presente trabajo. Esta velocidad se determina fácilmente dividiendo la distancia existente en dos distintas posiciones del vórtice obtenidas con la máxima curvatura entre el tiempo que le lleva al vórtice cambiar de posición. La Figura 4.6 muestra el comportamiento de dicha propiedad del vórtice para cada caso analizado. Puede observarse en todos los casos que el vórtice viaja a una velocidad aproximadamente constante durante su trayectoria pero que conforme este se va acercando a la pared pierde velocidad de manera considerable.

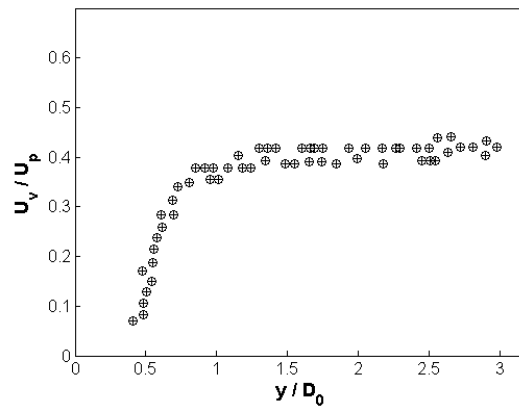
El vórtice lanzado con un desplazamiento de pistón $L/D_0=1$ viaja con una velocidad promedio $U_v/U_p=0.3$, empieza a decaer cuando el vórtice se encuentra a una distancia de $0.6D_0$ de la pared y continua disminuyendo hasta que finalmente el vórtice se detiene a una distancia de $0.5D_0$.

En el siguiente caso analizado ($L/D_0=2$), se encontró una velocidad promedio $U_v/U_p=0.39$ durante la trayectoria del vórtice la cual comienza a disminuir notablemente cuando este se aproxima a una distancia de $0.8D_0$ para detenerse por completo cuando el vórtice llega a una distancia igual a $0.5D_0$ de la superficie plana.

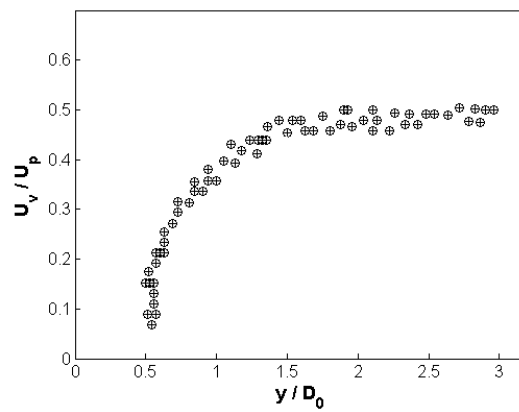
Para el caso $L/D_0=3$ se obtuvo un velocidad $U_v/U_p=0.45$ durante su recorrido la cual comienza a ser inferior desde que el vórtice se aproxima a la pared con una distancia de $1.3D_0$ y al igual que los casos anteriores se detiene por completo cuando la distancia entre la pared y el centro geométrico del vórtice es igual a $0.5D_0$.



(a) $L/D_0 = 1$



(b) $L/D_0 = 2$



(c) $L/D_0 = 3$

Figura 4.6: Velocidad de traslación.

Capítulo 5

Medición de temperatura

Una vez obtenidos algunas propiedades hidrodinámicas de interés en los vórtices, es necesario conocer los resultados térmicos obtenidos a partir de la utilización de la técnica de PLIF. Por ello, en este capítulo se detallará el procedimiento a seguir para la determinación de los campos de temperatura a partir de las imágenes captadas.

Una prueba inicial se realizó al mandar un vórtice con un desplazamiento del pistón $L/D_0=2$. La Figura 5.1 muestra algunas capturas de la cámara 1 en distintos instantes de tiempo; el tiempo entre cada toma es de 10 ms. Se puede apreciar el comportamiento del vórtice cuando este se aproxima y choca con la superficie caliente, desprendiendo parte de la capa límite térmica la cual se distingue como una fracción de líquido más oscura respecto al medio acuoso frío que se ve con una mayor intensidad en la escala de grises. La observación anterior parece bastante obvia de acuerdo al comportamiento de la Rodamina B respecto al incremento de temperatura explicado previamente; sin embargo, es necesario obtener una aproximación más exacta de la temperatura en cada una de las regiones de las imágenes captadas, para ello las imágenes fueron exportadas y procesadas en *Matlab*® con la finalidad de tener un mejor y más certero procesamiento de imágenes (*Apéndice B*).

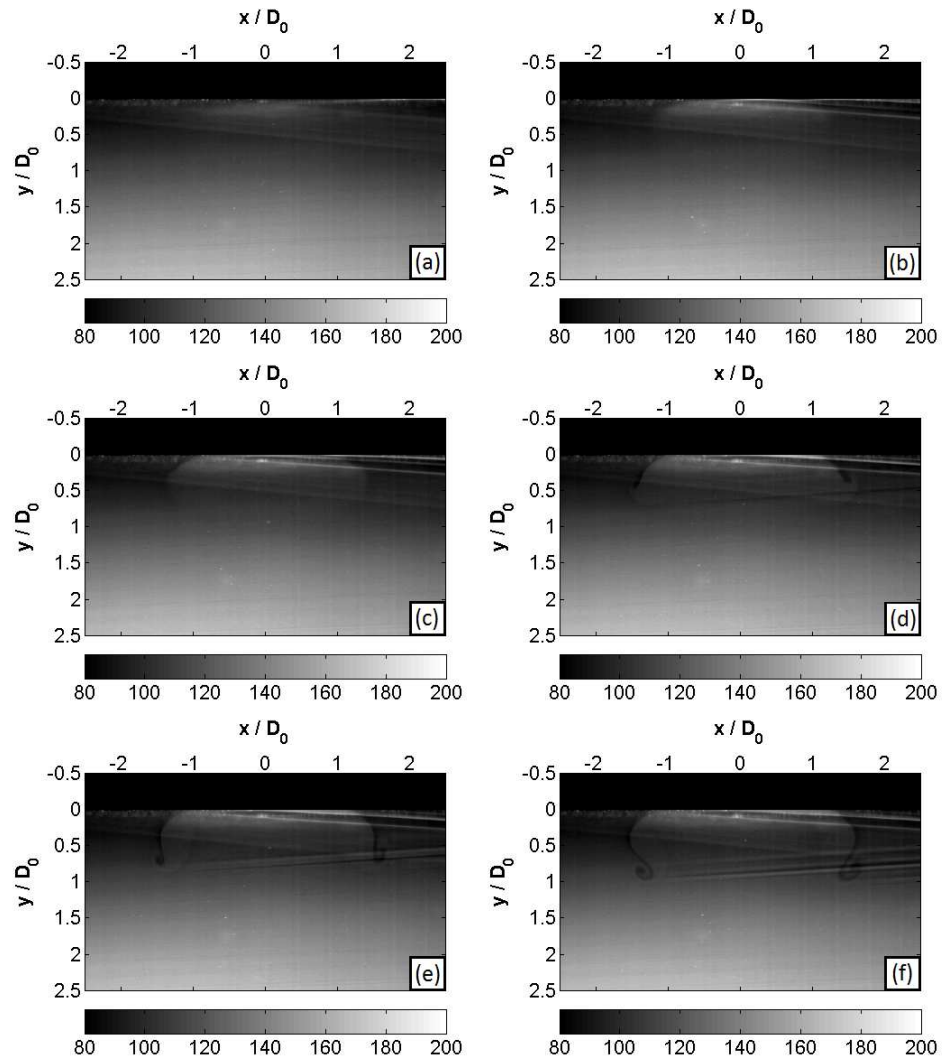


Figura 5.1: Interacción del vórtice con la pared caliente (Escala de grises).

5.1. Calibración

Como se hace mención en la sección 2.2, es necesario realizar una calibración para poder transformar los campos de intensidad de fluorescencia obtenidos en los experimentos en campos de temperatura. Para ello se tomaron imágenes isotérmicas a distintas temperaturas con la placa plana colocada en la misma posición donde se mantendría en todos los experimentos, así como una misma concentración de Rodamina B disuelta en agua. La Figura 5.2 muestra las imágenes tomadas para tal propósito; en ellas puede apreciarse el comportamiento de la disminución de intensidad de fluorescencia con el aumento de temperatura tal como se había previsto.

Puede observarse además un ligero desvío de la luz láser al chocar con la superficie de cristal, dicho desvío parece generar una variación de la intensidad de fluorescencia en la zona cercana a la pared y se incrementa de forma diagonal de izquierda a derecha en las imágenes captadas. Teóricamente, si este reflejo esta presente en todas las imágenes de calibración así como en los experimentos realizados, no debería de repercutir en las mediciones.

Una vez capturadas las imágenes de calibración, se asigna el valor conocido de la temperatura a cada una de ellas y se realiza una regresión lineal pixel a pixel, es decir; se obtiene una relación entre cada una de las imágenes de calibración para así determinar una curva en cada punto, la cual relaciona la variación de intensidad de fluorescencia entre cada una de las imágenes. Como se mencionó anteriormente, la relación entre intensidad de fluorescencia y temperatura en una solución de Rodamina B puede aproximarse a una ecuación de primer grado, por lo que se usó el siguiente modelo:

$$I = mT + b \tag{5.1}$$

donde

I es la intensidad en escala de grises que se tiene en cada pixel de la imagen.

T es el valor de la temperatura en cada pixel de la imagen.

m y b son la pendiente y la ordenada al origen respectivamente.

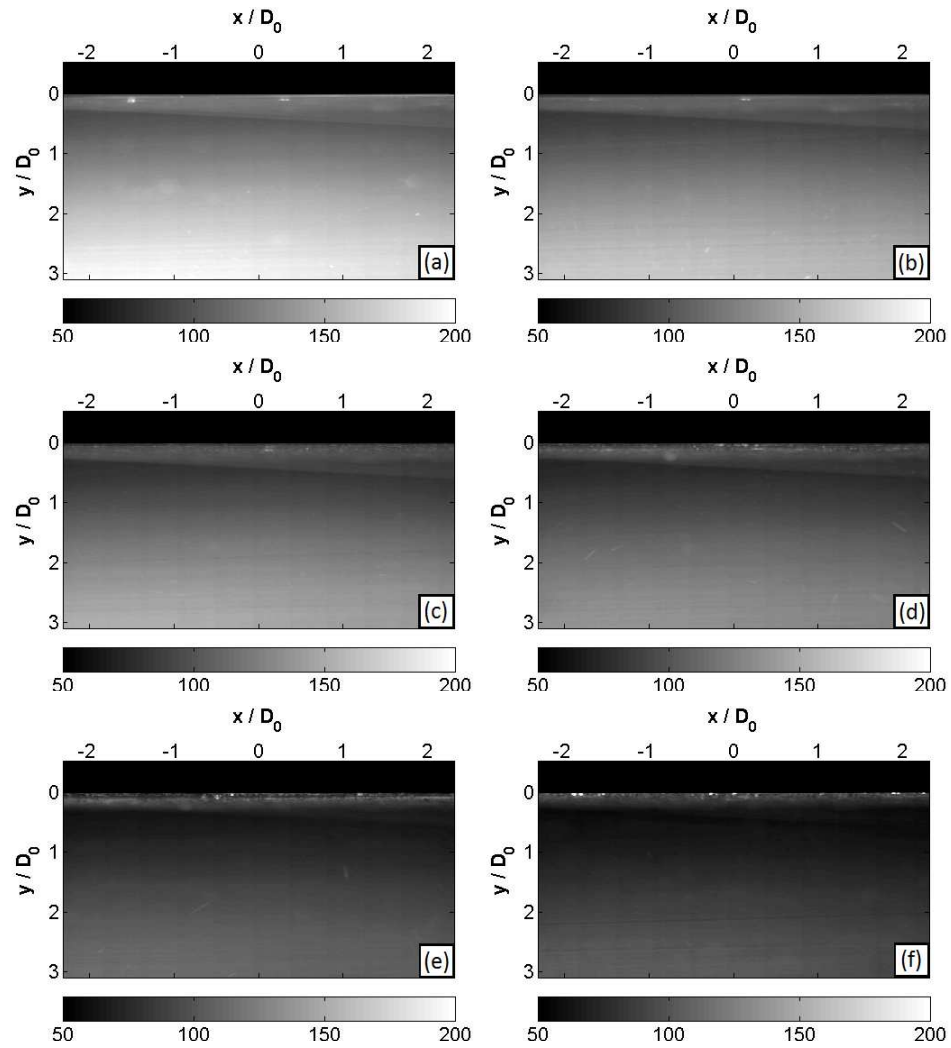


Figura 5.2: Imágenes de calibración PLIF. a)20°C, b)27.1°C, c)31.8°C, d)35.8°C, e)41.5°C y f)45.9°C.

Por lo tanto, al obtener los valores de m y b en cada punto, basta con despejar a T de la ecuación 5.1 y aplicarlo en cada uno de los puntos de la imagen que se desee analizar para así obtener el campo de temperaturas correspondiente. Es decir, en cada pixel de la imagen del experimento se debe aplicar la siguiente relación;

$$T = I - b/m \quad (5.2)$$

La gráfica mostrada en la Figura 5.3, muestra una curva general de calibración obtenida a partir de las imágenes de la Figura 5.2 con ayuda del software *Dynamics Studio*® en donde puede observarse un comportamiento lineal de la intensidad de fluorescencia respecto a la temperatura.

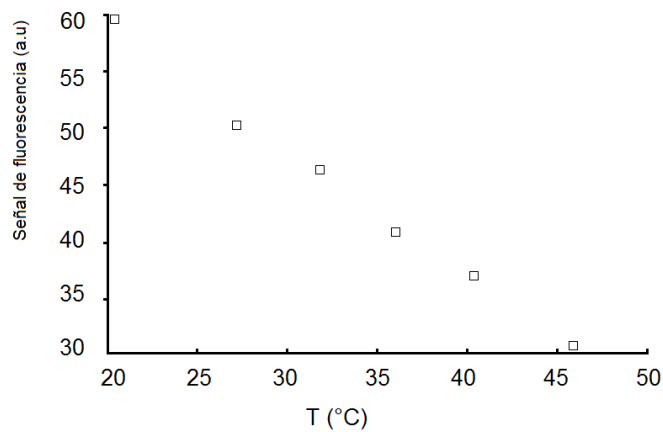


Figura 5.3: Gráfica de la señal de fluorescencia respecto a la temperatura obtenida a partir de las imágenes de calibración.

5.2. Procesamiento de imágenes

La Figura 5.4 muestra los campos de temperaturas obtenidos para las imágenes de la Figura 5.1 después de ser procesadas de acuerdo a la ecuación 5.2. Puede notarse que a pesar de que se realizó una calibración pixel a pixel, la zona antes mencionada donde se presenta un desvío de la luz láser (zona ubicada por encima de la línea punteada) produce variaciones significativas en la intensidad de fluorescencia captada por la cámara, lo cual introduce ruido en los campos de temperatura obtenidos, dando como resultado una zona de grandes incertidumbres en las mediciones realizadas. Más adelante, en la sección 5.3.1 se mostrarán los resultados obtenidos al cuantificar las incertidumbres y los errores en la medición de temperatura en toda la región vista por la cámara.

Además, fuera de esta zona se presentaron errores debido a las variaciones del índice de refracción del agua, ocasionando que la luz del láser se desvíe generando sombras, las cuales a su vez impiden mediciones exactas en la zona del semi-vórtice derecho. Si se toma en cuenta que los vórtices pueden ser considerados teóricamente axisimétricos, basta con el análisis de uno de los dos semi-vórtices captados por la cámara 1. Por ello, para los resultados finales se cambió la lente en la cámara 1 para tener un mayor acercamiento, por lo que solo se mostrará el procesamiento en el semi-vórtice izquierdo, ya que es el que no se ve afectado por sombras debido a la variación del índice de refracción y con ello obtener un mejor análisis.

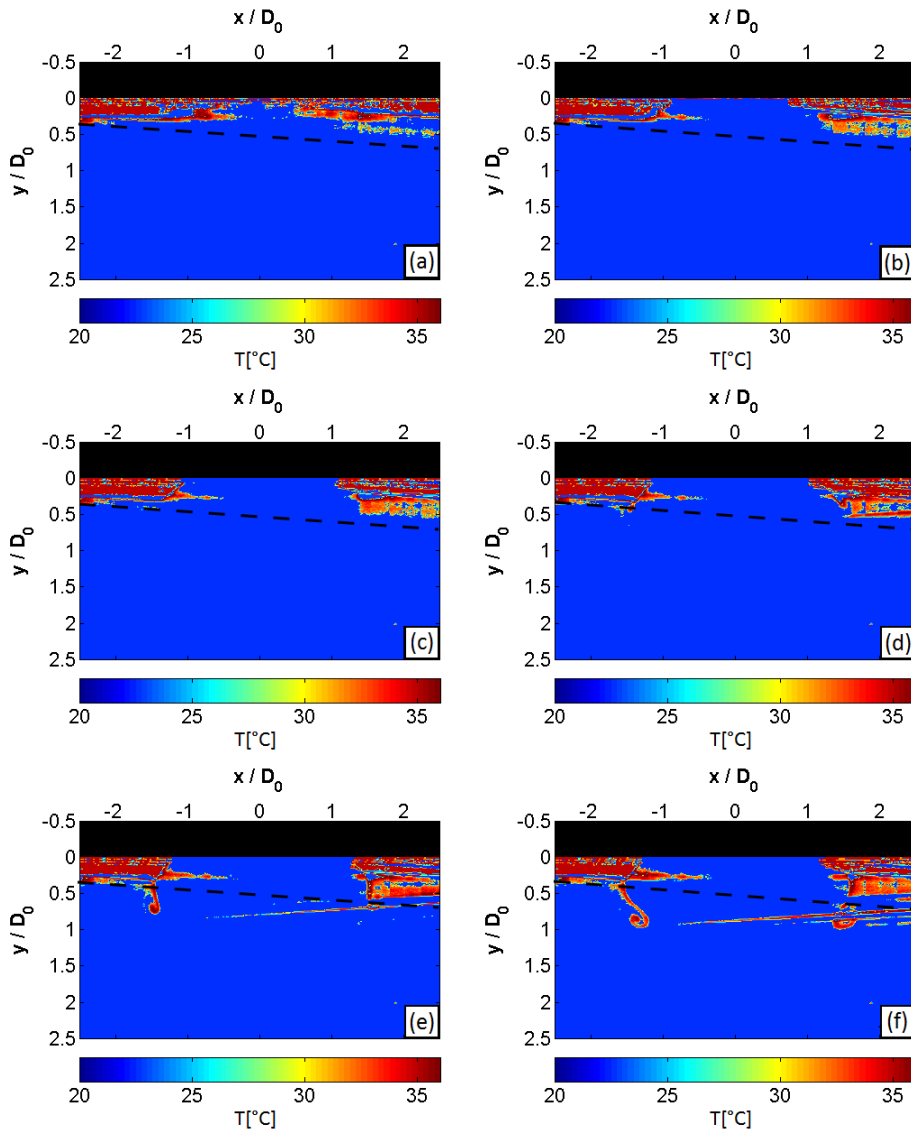


Figura 5.4: Interacción del vórtice con la pared caliente (campos de temperatura).

5.3. Resultados

Como se indicó en el capítulo 3, se ha fijado para todos los casos un tiempo de referencia $t=0$ en el momento en el cual el vórtice se encuentra a una distancia de $3D_0$ de la pared. La Figura 5.5 muestra algunas imágenes en escala de grises para el vórtice lanzado con desplazamiento de pistón $L/D_0=1$ cuando este se aproxima a la pared. En la imagen 5.5a, el vórtice se encuentra a una distancia desde la pared de $0.48D_0$ y el tiempo entre cada una de las imágenes mostradas es de 0.05 s. Puede observarse que el vórtice es demasiado débil y al chocar con la superficie plana, la fracción de fluido caliente que se desprende de ella es demasiado pequeña y se mantiene dentro del área de alta incertidumbre mencionada anteriormente, por lo tanto se omitirán los campos de temperatura para este caso. Este resultado era de esperarse, ya que de acuerdo a lo mostrado en el capítulo anterior para este vórtice en particular se observaron valores muy bajos tanto en la velocidad de traslación(Figura 4.6) como en la circulación(Figura 4.5).

Por otro lado, en los casos $L/D_0=2$ y $L/D_0=3$ que se muestran en las Figuras 5.6 y 5.7 respectivamente, se observa como los vórtices impactan con la pared y desprenden de ella una gran parte de fluido caliente. En ambos casos la primer imagen mostrada corresponde a una posición de vórtice respecto a la pared de $0.48D_0$ aproximadamente. Para el caso $L/D_0=2$, la imagen 5.6a fue captada en un instante de tiempo $t=1.72$ s y el tiempo entre cada imagen es de 0.04 s. Por otro lado para $L/D_0=3$ la imagen 5.6a fue tomada en un instante de tiempo $t=1.48$ s y el tiempo entre cada toma es de 0.02 s.

Haciendo referencia nuevamente al capítulo anterior, se observó en la Figuras 4.3 y 4.4 que en ambos casos el diámetro de vórtice incrementa de forma significativa al chocar con la pared, lo cual afecta directamente en el desprendimiento de líquido caliente de ella, pues esto genera un desplazamiento notorio de fluido caliente en la dirección x , permitiendo que el fluido frío que es arrastrado por el vórtice entre en contacto con la superficie caliente. Para el caso $L/D_0=3$ se obtuvo un diámetro de vórtice mayor que para $L/D_0=2$, por lo que es evidente que para este caso el desplazamiento del fluido desprendido de la pared fue mayor y por lo tanto, mayor cantidad de líquido frío entra en contacto con la pared cuando el vórtice se aproxima a ella.

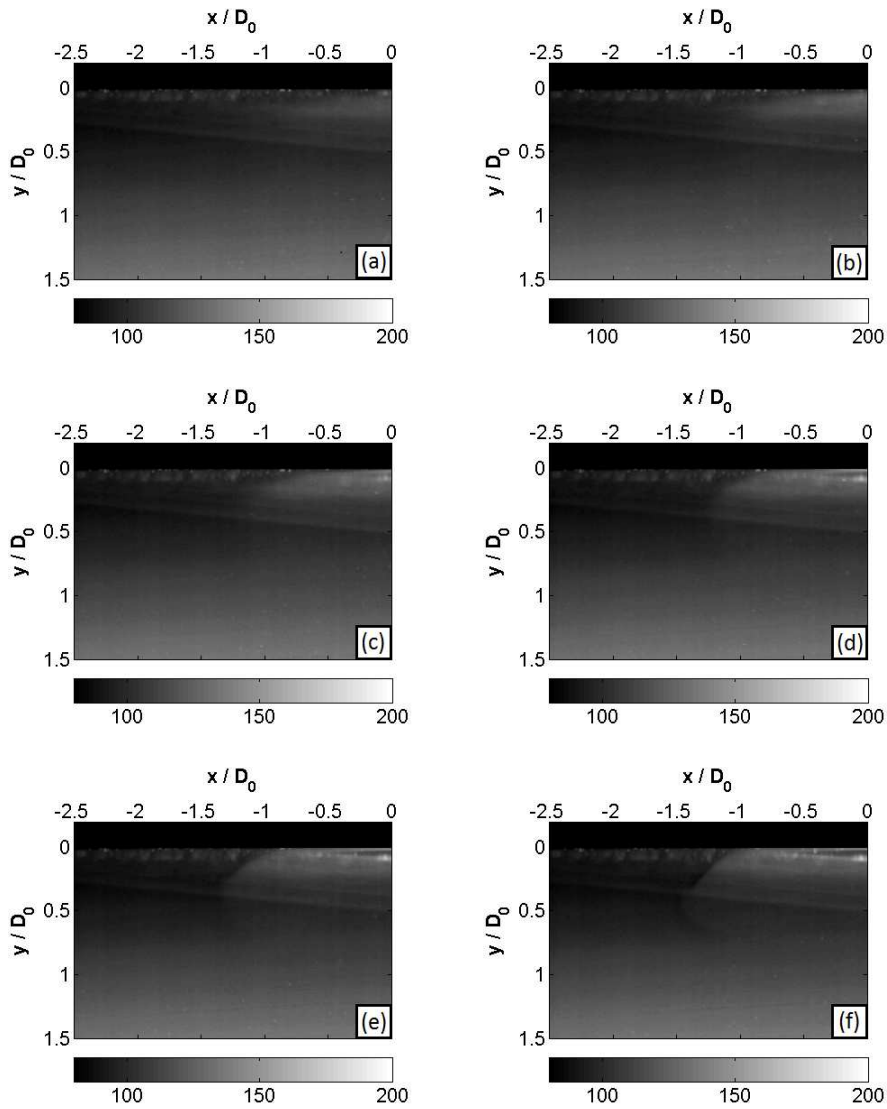


Figura 5.5: $L/D_0=1$, Interacción del vórtice con la pared. a) $t=4.25s$, b) $t=4.30s$, c) $t=4.35s$, d) $t=4.40s$, e) $t=4.45s$ y f) $t=4.50s$.

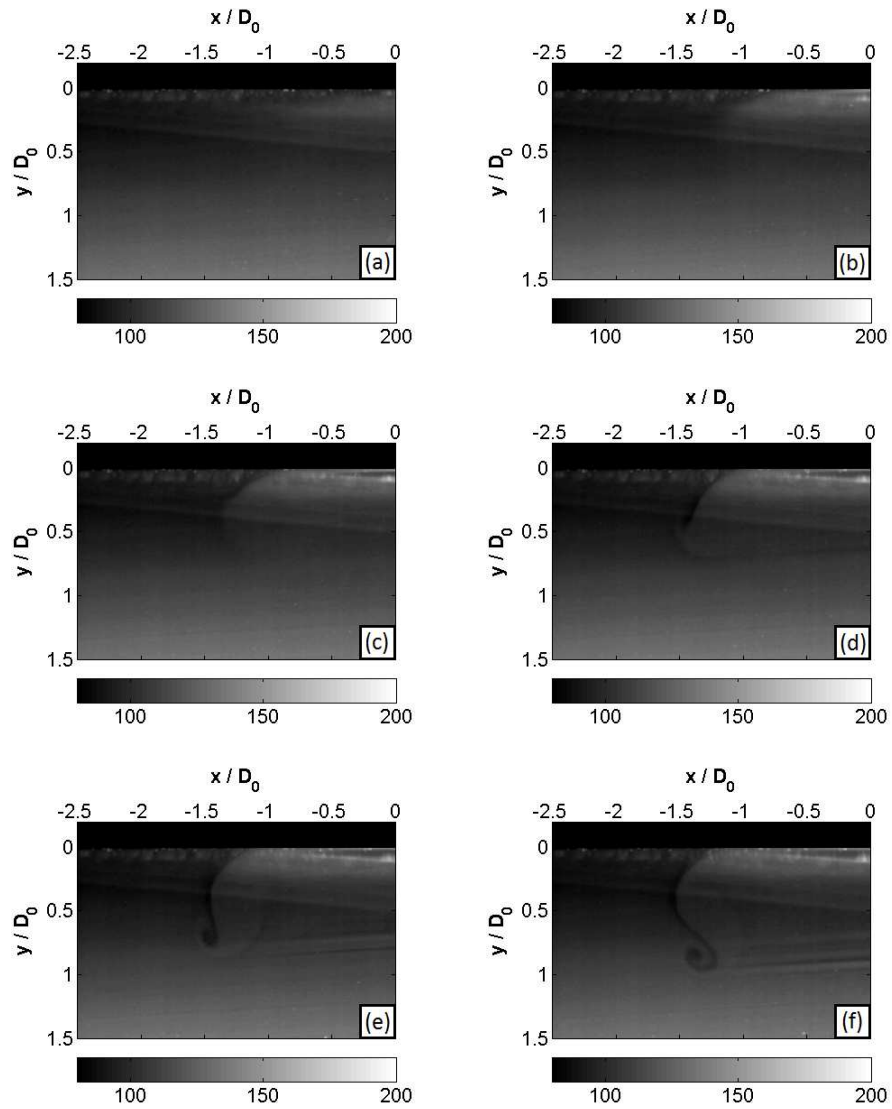


Figura 5.6: $L/D_0=2$, Interacción del vórtice con la pared. a) $t=1.72s$, b) $t=1.76s$, c) $t=1.80s$, d) $t=1.84s$, e) $t=1.88s$ y f) $t=1.92s$.

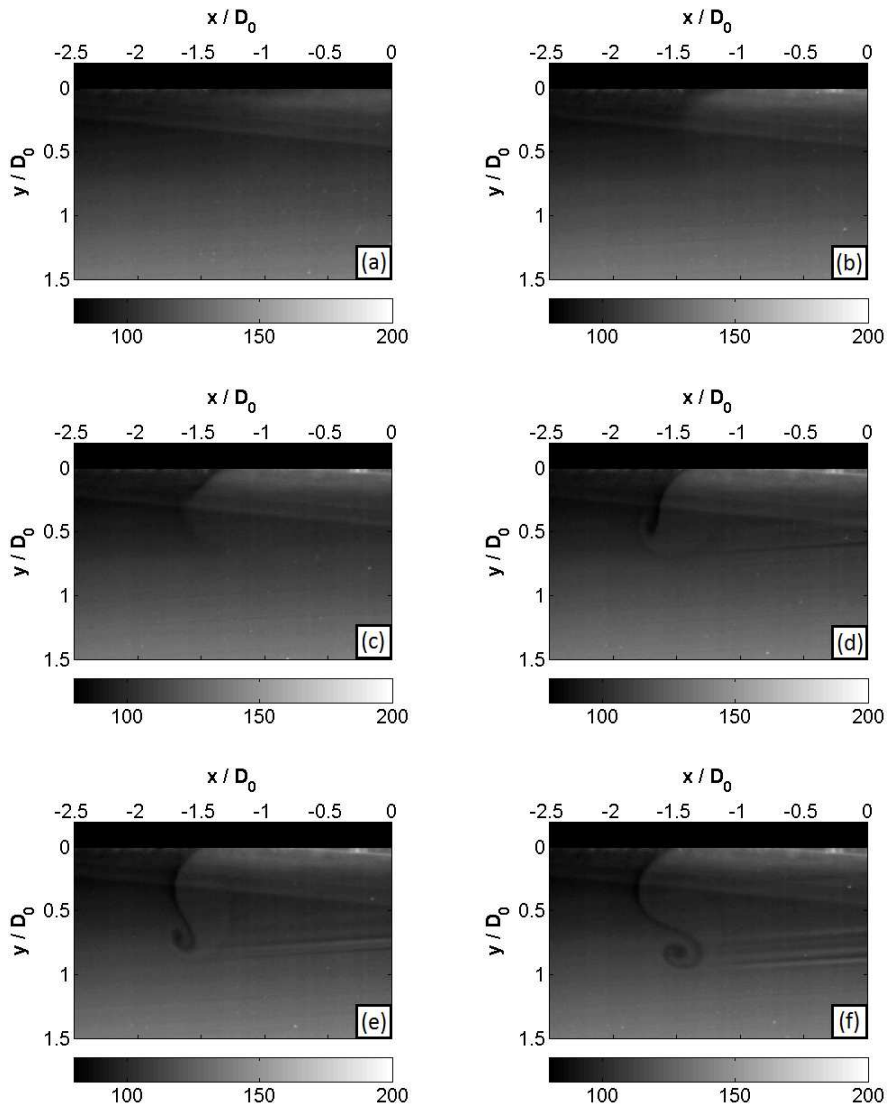


Figura 5.7: $L/D_0=3$, Interacción del vórtice con la pared. a) $t=1.48s$, b) $t=1.50s$, c) $t=1.52s$, d) $t=1.54s$, e) $t=1.56s$ y f) $t=1.58s$.

Las Figuras 5.8 y 5.9 muestran algunos campos de temperatura para los casos $L/D_0=2$ y $L/D_0=3$ respectivamente en una pequeña región donde se presentaron bajas incertidumbres en las mediciones. Puede apreciarse que la fracción de fluido caliente desprendida de la pared debido al vórtice posee una temperatura superior en el centro y disminuye hacia su periferia. También se observó que para el vórtice lanzado con un desplazamiento de pistón $L/D_0=3$, dicha fracción de fluido caliente se enfría en un tiempo menor que para el otro caso analizado($L/D_0=2$). Por ello, se realizó un análisis comparativo entre ambos casos en un mismo intervalo de tiempo dentro de la misma área de visión mostrada en las Figuras 5.8 y 5.9, el cual consistió en calcular el valor de máxima temperatura $T_{m\acute{a}x}$ y el de temperatura promedio T_{prom} únicamente de la fracción de fluido caliente. El análisis inició cuando el vórtice se encuentra a una distancia de $0.5D_0$ de la pared y finalizó justo un instante antes de que el fluido caliente comienza a salir de la región de estudio.

Las gráficas de la Figura 5.10 muestran la evolución de los valores obtenidos al calcular $T_{m\acute{a}x}$ y T_{prom} . Se definió un valor $T^* = \frac{T}{T_p}$, donde T es la temperatura calculada en cada instante de tiempo y T_p es la temperatura de la placa plana caliente. También se asignó el valor $t^* = \frac{(t-t_i)U_p}{D_0}$, donde t es el tiempo real en cada instante, t_i es el tiempo inicial de las mediciones, U_p es la velocidad del pistón y D_0 es el diámetro del mismo.

Para el vórtice lanzado con un desplazamiento $L/D_0=2$ se obtuvo un valor T_{prom} inicial de 35.9°C el cual disminuyó hasta 31.6°C , también se encontró un valor inicial $T_{m\acute{a}x}$ de 36.2°C que finalizó en 35.2°C . Además se encontró que T_{prom} disminuye aproximadamente 0.33°C cada 0.01s , mientras que $T_{m\acute{a}x}$ baja 0.11°C en el mismo intervalo de tiempo.

Para el siguiente caso($L/D_0=3$), el valor T_{prom} en un inicio fue de 33.4°C y descendió hasta 29.22°C . Por otro lado, el valor $T_{m\acute{a}x}$ que se obtuvo al inicio fue de 34.8°C y finalizó en 32.31°C . Para este caso se encontró que T_{prom} disminuye aproximadamente 0.41°C cada 0.01s y para el mismo intervalo de tiempo el valor $T_{m\acute{a}x}$ se reduce 0.22°C .

Lo anterior demuestra que al incrementar el desplazamiento del pistón, no solo el proceso de interacción entre el vórtice y la pared es mas rápido(debido a una mayor velocidad de traslación), sino que además la zona de contacto con la pared se incrementa; enfriando una región mas grande de la pared(debido a un incremento mayor en el diámetro de vórtice) y también se pudo observar que se obtiene una mayor tasa de enfriamiento en la fracción de fluido caliente desprendida(debido a valores mas altos de vorticidad y circulación).

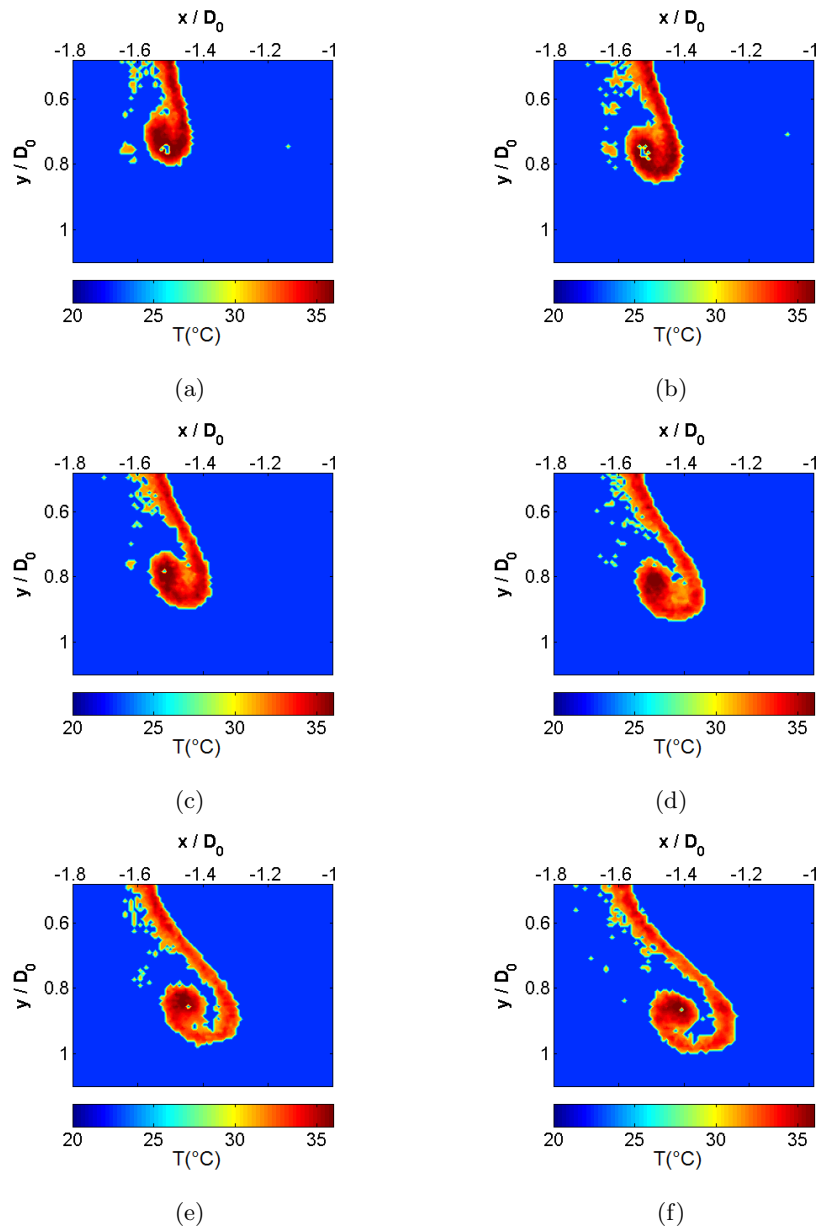


Figura 5.8: $L/D_0=2$, *Procesamiento PLIF(acercamiento)*. a)t=1.82s, b)t=1.84s, c)t=1.86s, d)t=1.88s, e)t=1.90s,f)t=1.92s.

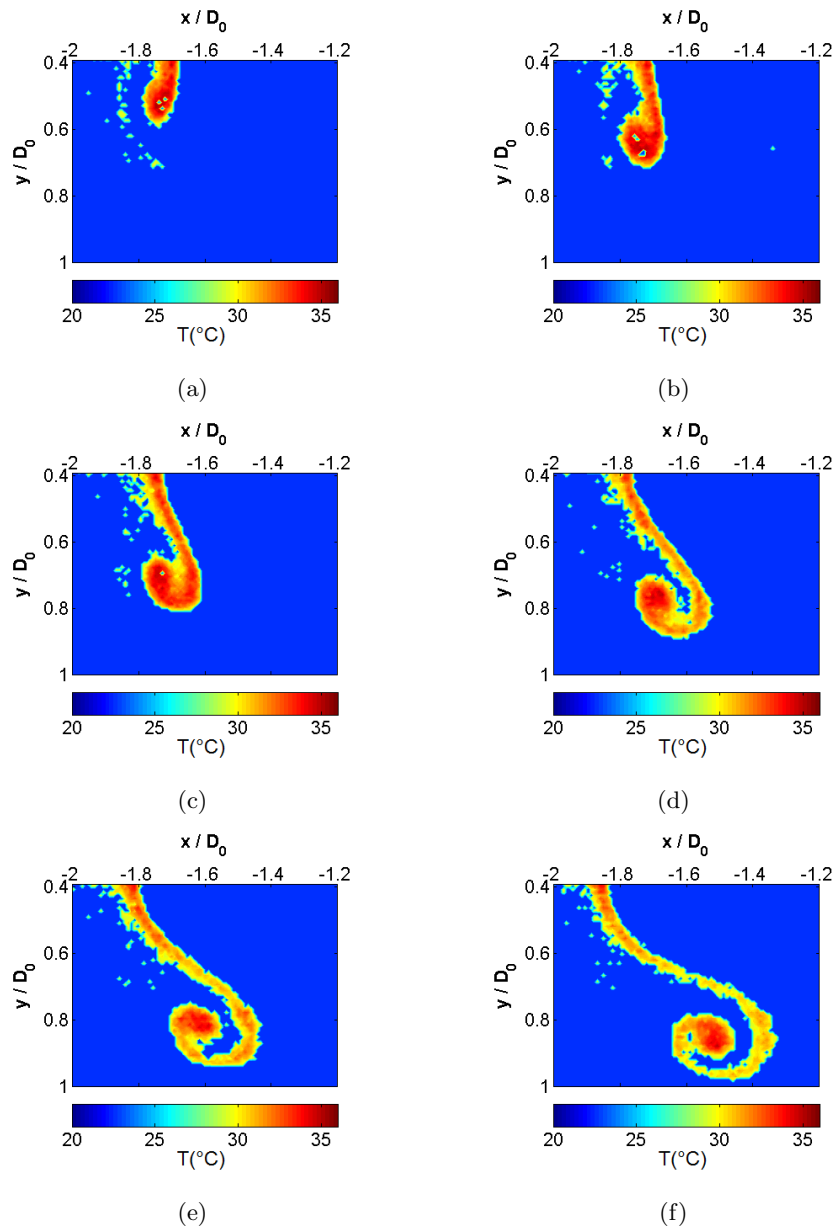
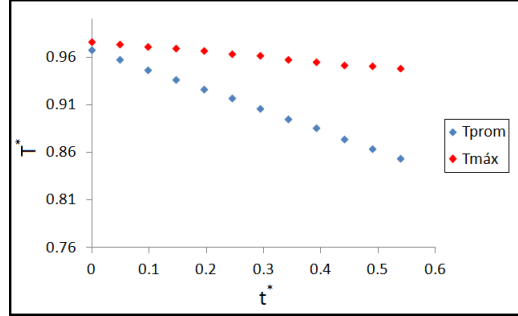
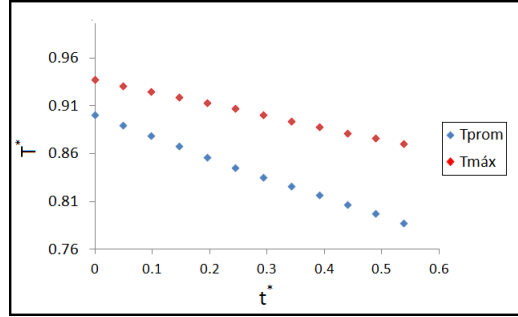


Figura 5.9: $L/D_0=3$, *Procesamiento PLIF(acercamiento)*. a) $t=1.53s$, b) $t=1.54s$, c) $t=1.55s$, d) $t=1.56s$, e) $t=1.57s$, f) $t=1.58s$.



(a)



(b)

Figura 5.10: Evolución de temperaturas en la fracción de fluido caliente desprendida de la pared. a) $L/D_0=2$, b) $L/D_0=3$.

Finalmente se realizó la superposición de los campos de velocidades obtenidos con la técnica PIV en los campos finales de temperatura obtenidos con PLIF. Para la región mostrada en las Figuras 5.11 y 5.12 puede notarse que el vórtice primario llega a la pared con un giro contrario a las manecillas del reloj, provocando el desprendimiento de líquido caliente cercano a la pared el cual evidentemente se mueve con una trayectoria con el mismo sentido de giro. Sin embargo, la presencia de un vórtice secundario con giro a favor de las manecillas del reloj ocasiona que la parte inferior del fluido caliente desprendido comience a cambiar de dirección. Por lo tanto, este flujo caliente finalmente sigue la trayectoria de una curva similar a una *S* debido a la presencia tanto del vórtice primario como del secundario. Es posible observar este mismo comportamiento dinámico y corroborar la presencia de un vórtice secundario al observar los campos de vorticidad mostrados en el *Apendice A*.

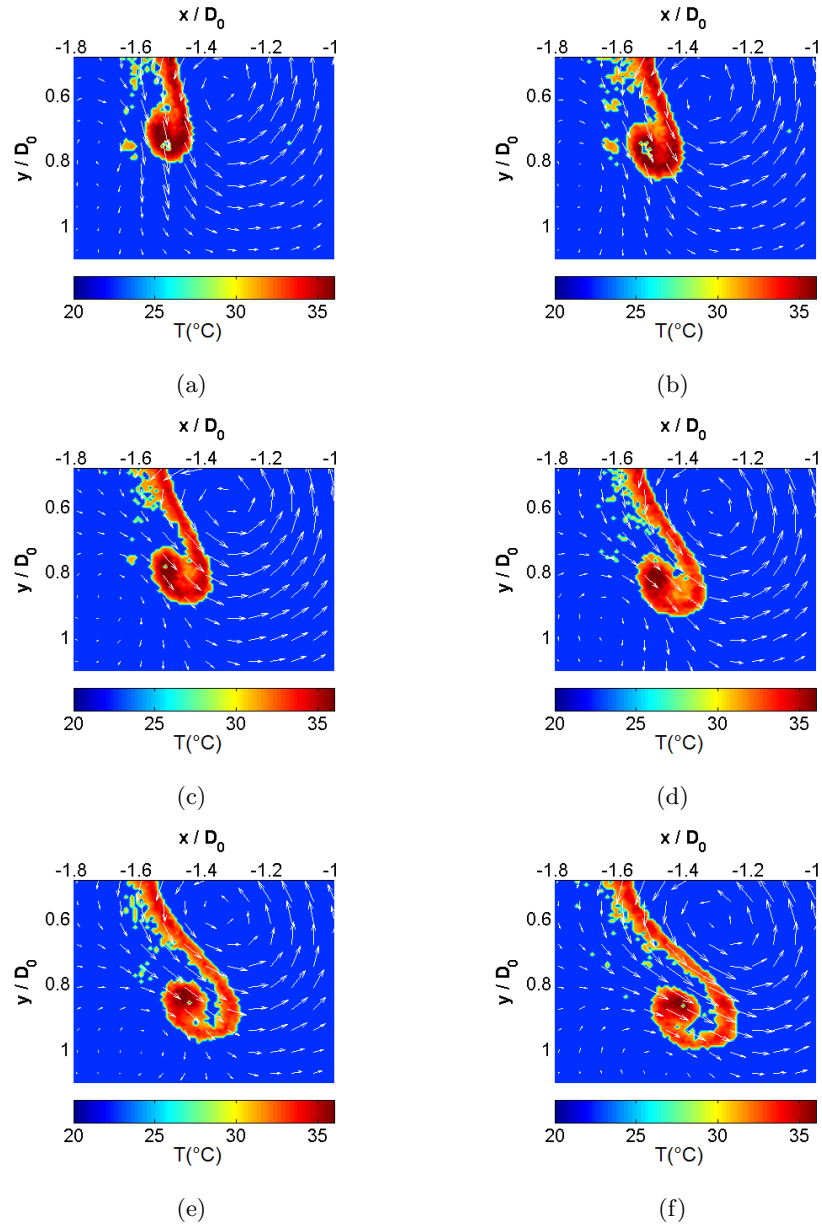


Figura 5.11: $L/D_0=2$, Superposición de campos de velocidad en los respectivos campos de temperaturas. a) $t=1.82s$, b) $t=1.84s$, c) $t=1.86s$, d) $t=1.88s$, e) $t=1.90s$, f) $t=1.92s$.

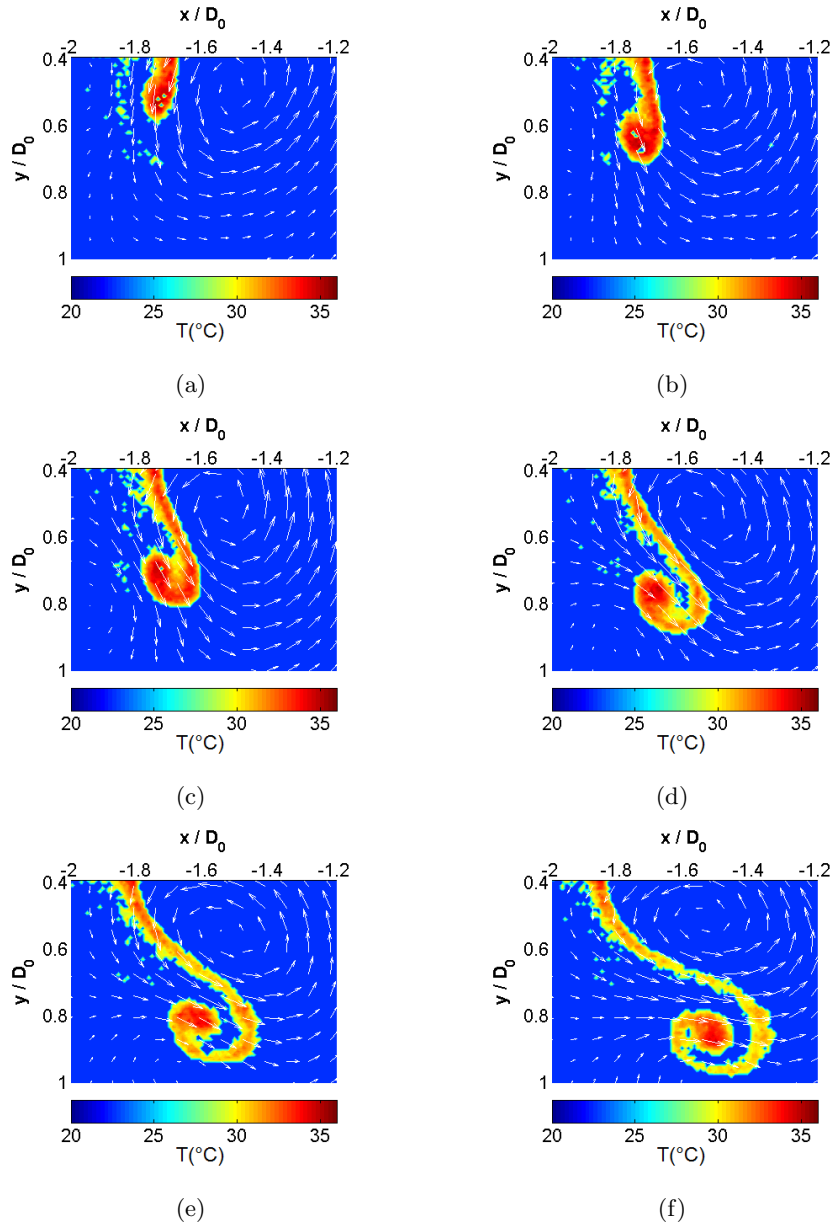


Figura 5.12: $L/D_0=3$, Superposición de campos de velocidad en los respectivos campos de temperaturas. a) $t=1.53\text{s}$, b) $t=1.54\text{s}$, c) $t=1.55\text{s}$, d) $t=1.56\text{s}$, e) $t=1.57\text{s}$, f) $t=1.58\text{s}$.

5.3.1. Error de medición e incertidumbres

Las principales incertidumbres en los experimentos fueron ocasionadas por la desviación de luz láser al chocar con la superficie plana caliente, pues como se hizo mención anteriormente, esto impidió obtener información confiable, ya que al obtener las imágenes procesadas se encontraron altos valores de incertidumbres en esa zona, sin embargo todo parece indicar que fuera de esa región donde precisamente se llevo a cabo el análisis final, las incertidumbres tienden a ser pequeñas. Para poder comprobar este hecho, fue tomada previamente una imagen con las mismas características de los experimentos realizados pero sin la placa plana colocada; es decir sin ningún tipo de desviación de luz láser, para ser comparada con una imagen que posee dicha desviación de luz (Figura 5.13) y de esta forma calcular las incertidumbres tal como se explicó en la sección 2.2.5 por medio de la ecuación 2.11. La Figura 5.14 muestra los resultados obtenidos al calcular la incertidumbre en cada punto de la imagen, se puede ver claramente que en la zona por encima del desvío de luz láser se obtuvieron valores de incertidumbre demasiado altos, llegando a ser en algunas zonas hasta del 80%, mientras que en la regiones fuera de esta las incertidumbres permanecen por debajo del 10% de las cuales se obtuvo un promedio de 6.48%.

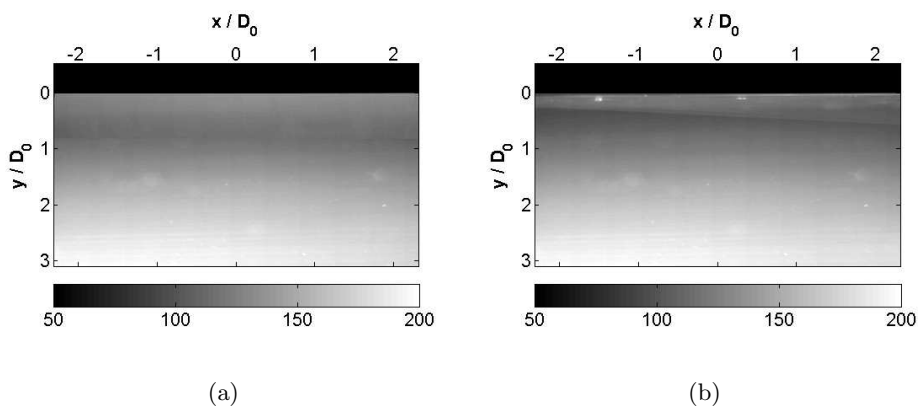


Figura 5.13: *Imágenes utilizadas para la estimación de incertidumbres. a) Imagen sin desviación de luz láser, b) Imagen con desviación de luz láser.*

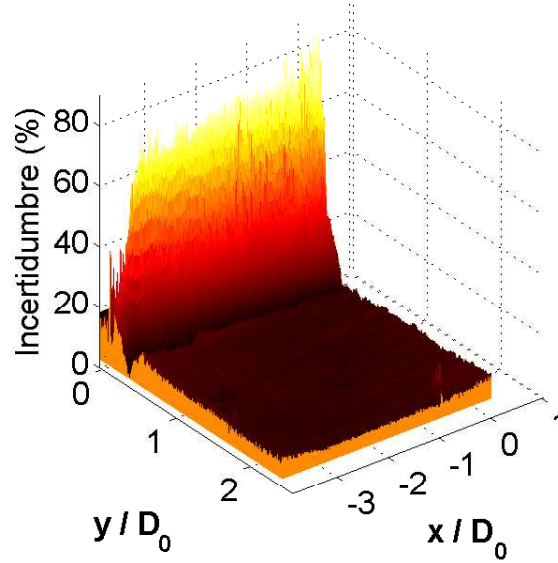


Figura 5.14: *Medición de Incertidumbres.*

Otro tipo de error que debe tomarse en cuenta es el error en la función de calibración, pues se realizó una transformación de los campos de intensidad de fluorescencia a campos de temperatura considerando que la relación existente entre ambos parámetros es lineal. Para ello se calculó el coeficiente de determinación R^2 de la siguiente manera;

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5.3)$$

Dicho coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, así como la relación existente entre las variables (Intensidad - Temperatura) a partir de la regresión lineal realizada. El coeficiente de determinación adquiere solo valores entre 0 y 1 donde $R^2=0$ indica de que la relación lineal entre las variables es nula, mientras que $R^2=1$ indica que el modelo obtenido en la regresión lineal se ajusta perfectamente al comportamiento entre las dos variables en cuestión. La Figura 5.15 muestra los resultados obtenidos en toda el área de visión de la cámara 1, obteniendo nuevamente

resultados poco favorables en la región donde las mediciones fueron alteradas por la desviación de la luz del láser, teniendo como resultado coeficientes de determinación incluso por debajo de 0.2, lo cual indica que las grandes incertidumbres determinadas anteriormente afectan, evidentemente, al cálculo de la función de calibración, ocasionando que el modelo matemático utilizado sea poco eficiente en esta zona. Sin embargo, para las demás regiones vistas por la cámara se obtuvieron resultados de R^2 mayores a 0.91, indicando con ello que el modelo tuvo un buen ajuste y pueden considerarse confiables las mediciones en esa área. Para obtener formalmente el porcentaje del error de calibración basta con usar una sencilla relación como la siguiente;

$$E_{calib} = (1 - R^2) \times 100 \quad (5.4)$$

La gráfica de la Figura 5.16 presenta un comportamiento muy similar al de la Figura 5.14, donde nuevamente es notorio que la zona por encima del reflejo que se generó de luz láser presenta errores significativos, por encima incluso del 70% , pero que fuera de esta, los errores poseen valores por debajo del 8% de los cuales se obtuvo un valor promedio del 5.47% de error, por lo que las mediciones realizadas en esa región pueden considerarse confiables.

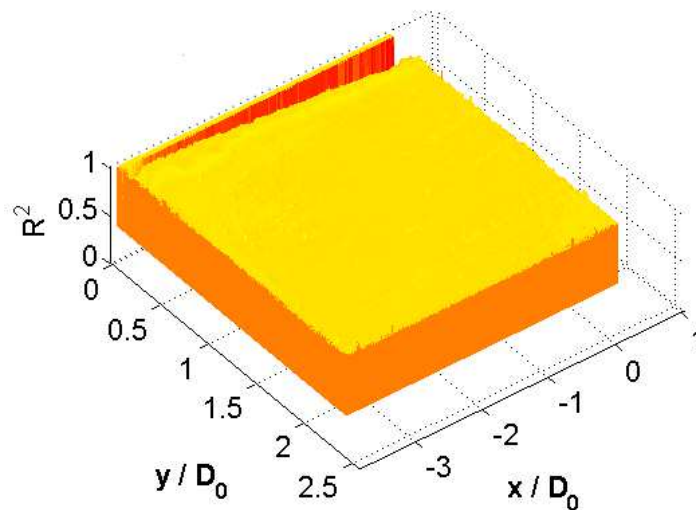


Figura 5.15: *Coeficiente de determinación.*

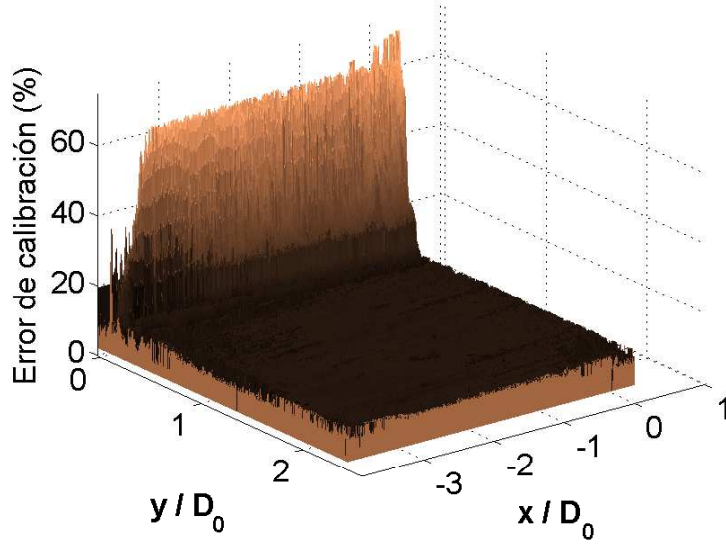


Figura 5.16: *Error en la curva de calibración.*

Capítulo 6

Conclusiones

Se ha demostrado la posibilidad de realizar mediciones de temperatura no intrusivas e instantáneas usando la fluorescencia inducida por láser de un colorante orgánico en un medio líquido de manera satisfactoria. Se utilizó un modelo lineal para relacionar la dependencia de la intensidad de fluorescencia respecto a la temperatura, el cual resultó apropiado en la mayor parte de la región del flujo analizado.

La técnica *PLIF* puede llegar a ser un poco complicada, pues factores como el cambio de índice de refracción ocasionado por la variación de la densidad del flujo, la auto-absorción del colorante durante el proceso de fluorescencia, la reflexión del haz de excitación, entre otros, pueden llegar a ocasionar errores significativos en la medición ya que alteran de manera directa la intensidad de fluorescencia, generando sombras o variaciones de luz, las cuales podrían interpretarse erróneamente como un cambio de temperatura. Sin embargo, esta gran sensibilidad de la técnica resulta también benéfica, pues ocasiona que incluso pequeños gradientes de temperatura puedan ser identificados.

Además, se demostró la posibilidad de emplear de manera simultánea la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas(*PIV*), lo cual permitió obtener para los mismos instantes de tiempo campos de velocidades con la finalidad de calcular algunas propiedades hidrodinámicas de interés como lo fueron; la velocidad de traslación, el diámetro de vórtice y la circulación para analizar el efecto que estas propiedades tienen en los campos de temperatura obtenidos con la técnica *PLIF*.

Las pruebas realizadas del lanzamiento de un vórtice que se desarrolla en un medio acuoso y viaja hacia una superficie plana caliente que se encuentra sumergida en el mismo medio, corroboraron que existe un despren-

dimiento de liquido caliente cercano a la pared cuando el vórtice colisiona con ella, ocasionando que parte del fluido frío del medio entre en contacto con la superficie plana disminuyendo su temperatura por algunos instantes (transferencia de calor por convección).

Finalmente, se observó que el emplear un desplazamiento mayor en la carrera del pistón que genera el vórtice, afecta de manera favorable el proceso de transferencia de calor entre el anillo de vorticidad y la superficie caliente. Primeramente se obtienen valores superiores en la velocidad de traslación, causando con ello que la interacción entre el vórtice y la superficie plana caliente se desarrolle en un menor tiempo. También el tamaño de vórtice al chocar con la pared es superior cuando se utiliza un desplazamiento de pistón de mayor valor, ocasionando que una región mas grande de la superficie plana sea enfriada por el vórtice durante su colisión. Además, se obtuvo una mayor tasa de enfriamiento del fluido caliente que fue desprendido de la pared a causa de valores más altos de vorticidad y de circulación.

Bibliografía

- [1] ARÉVALO G; HERNANDEZ R; NICOT C; PLAZA F (2007). *Vortex ring head-on collision with a heated vertical plate*. Phys. Fluids 19, 083603.
- [2] ARÉVALO G; HERNANDEZ R; NICOT C; PLAZA F (2010). *Particle image velocimetry measurements of vortex rings head-on collision with a heated vertical plate*. Phys. Fluids 22, 053604.
- [3] ARCOUMANIS C; MCGUIRK JJ; PALMA J (1990). *On the use of fluorescent dyes for concentration measurements in water flows*. Exp Fluids 10(2-3):177-180.
- [4] BRUCHHAUSEN M; GUILLARD F; LEMOINE F (2005). *Instantaneous measurement of two-dimensional temperature distributions by means of two-color planar laser induced fluorescence (PLIF)*. Exp Fluids 38:123–131.
- [5] COOLEN MCJ; KIEFT RN; RINDT CCM; VAN STEENHOVEN AA (1999). *Application of 2-D LIF temperature measurements in water using a Nd:YAG laser*. Exp Fluids 27(5):420-426.
- [6] COPPETA J; ROGERS C (1998). *Dual emission laser induced fluorescence for direct planar scalar behavior measurements*. Exp Fluids 25:1-15.
- [7] CRIMALDI JP (2008). *Planar laser induced fluorescence in aqueous flows*. Exp Fluids 44:851-863.
- [8] DIEZ F; BERNAL LP; FAETH GM (2005). *PLIF and PIV measurements of the self-preserving structure of steady round buoyant turbulent plumes in crossflow*. Int J Heat Fluid Flow 26:873-882.
- [9] FLETCHER DG; MAC DANIEL JC (1987). *Temperature measurements in a compressible flow field using laser-induced fluorescence*. Opt Lett 12: 16-18.

- [10] GROSS KP; MCKENZIE RL; LOGAN P (1987). *Measurements of temperature, density, pressure, and their fluctuations in supersonic turbulence using laser-induced fluorescence*. Exp Fluids 5: 372-380.
- [11] GUZMAN JE KP; KAMP LP RL; VAN HEIJSTC (2012). *Vortex dipole collision with a sliding wall*. Eindhoven University of Technology, Department of Applied Physics, P.O.Box 513, NL-5600 MB Eindhoven, The Netherlands.
- [12] HOLMAN JACK P, (1998). *Experimental Methods for Engineers*. McGraw-Hill; 3rd edition
- [13] HUBBLE DO; VLACHOS PP; DILLER TE (2013). *The role of large-scale vortical structures in transient convective heat transfer augmentation*. J. Fluid Mech. 718, 89.
- [14] KARASSO PS; MUNGAL MG (1997). *PLIF measurements in aqueous flows using the Nd:YAG laser*. Exp Fluids 23(5):382-387.
- [15] LAW AWK; WANG HW (2000). *Measurement of mixing processes with combined digital particle image velocimetry and planar laser induced fluorescence*. Exp Therm Fluid Sci 22(3-4):213-229.
- [16] LEMOINE F; WOLFF M; LÉBOUCHE M (1996). *Simultaneous concentration and velocity measurements using combined laser-induced fluorescence and laser doppler velocimetry: application to turbulent transport*. Exp Fluids 20(5):319-327.
- [17] LEMOINE F; WOLFF M; LÉBOUCHE M (1999). *Simultaneous temperature and 2D velocity measurements in a turbulent heated jet using combined laser-induced fluorescence and LDA*. Exp Fluids 26(4):315-323.
- [18] LÓPEZ ARBELOA I; RUIZ OJEDA P (1981). *Molecular forms of rhodamine B*. Chem Phys Lett 79: 347-350.
- [19] LÓPEZ ARBELOA I; ROHATGI-MUKHERJEE KK (1986). *Solvent effects on photophysics of the molecular forms of rhodamine B*. Internal conversion mechanism. Chem Phys Lett 129:607-614.
- [20] LÓPEZ ARBELOA I; LÓPEZ ARBELOA T; TAPIA ESTÉVEZ MJ (1991). *Molecular structure and solvent effects*. J Phys Chem 95:2203-2208

-
- [21] MARTIN R; ZENIT R. (2008). *Heat transfer resulting from the interaction of a vortex pair with a heated wall*. Trans. ASME: J. Heat Transfer 130(5), 051701.
- [22] MATSUMOTO R; ZADEH HF; EHRHARD P (2005). *Quantitative measurement of depth-averaged concentration fields in microchannels by means of a fluorescence intensity method*. Exp Fluids 39(4):722-729.
- [23] MELTON LA; LIPP CW (2003). *Criteria for quantitative PLIF experiments using high-power lasers*. Exp Fluids 35(4):310-316.
- [24] MERZKIRCH W (1974). *Flow visualization*.pp. 72-86, London: Academic Press
- [25] NAKAJIMA T; UTSUNOMIYA M; IKEDA Y; MATSUMOTO R (1990). *Simultaneous measurement of velocity and temperature of water using LDV and fluorescence technique*. Fifth Int Symp on Appl of Laser Tech to Fluid Mech. Lisbon
- [26] ORLANDI P(1990). *Vortex dipole rebound from a wall*. Uniuersita di Roma, "La Sapienza,"Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Via Eudossiana 18, 00184 Rama, Italy.
- [27] PALACIOS C (2010). *Dynamics of non-newtonian vortex rings*. Ph.D thesis. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- [28] PALACIOS C; GELDERBLOM G; SOLORIO F; SALINAS M; ZENIT R (2014). *Interaction of a vortex ring with a natural convective layer*. Phys. Fluids 26, 083602.
- [29] PAN G; MENG H (2001). *Experimental study of turbulent mixing in a tee mixer using PIV and PLIF*. AICHE J 47(12):2653-2665.
- [30] SAKAKIBARA J; HISHIDA K; MAEDA M (1997). *Vortex structure and heat transfer in the stagnation region of an impinging plane jet (simultaneous measurements of velocity and temperature fields by digital article image velocimetry and laser-induced fluorescence)*. Int J Heat Mass Transfer 40:3163-3176.
- [31] SAKAKIBARA J; ADRIAN R (1999). *Whole field measurements of temperature in water using two-color laser induced fluorescence*. Exp Fluids 26:7-15.

- [32] SHAN JW; LANG DB; DIMOTAKIS PE (2004). *Scalar concentration measurements in liquid-phase flows with pulsed lasers*. Exp Fluids 36(2):268-273.
- [33] SAYLOR JR (1995). *Photobleaching of disodium fluorescein in water*. Exp Fluids 18:455-447.
- [34] TROY C; KOSEFF JR (2005). *The generation and quantitative visualization of breaking internal waves*. Exp Fluids 38:549-562.
- [35] VAN VLIET E; VAN BERGEN SM; DERKSEN JJ; PORTELA LM; VAN DEN AKKER HEA (2004). *Time-resolved, 3D, laser-induced fluorescence measurements of fine-structure passive scalar mixing in a tubular reactor*. Exp Fluids 37(1):1-21.
- [36] WALKER D (1987). *A fluorescence technique for measurement of concentration in mixing liquids*. J Phys E Sci Instrum 20:217-224.
- [37] WANG GR; FIEDLER HE (2000). *On high spatial resolution scalar measurement with LIF-part 1:photobleaching and thermal blooming*. Exp Fluids 29(3):257-264.

Apéndice A

Interacción del vórtice con las superficie caliente

A.1. $L/D_0 = 1$

Campos de velocidad y vorticidad

$\Delta t = 0.15s$

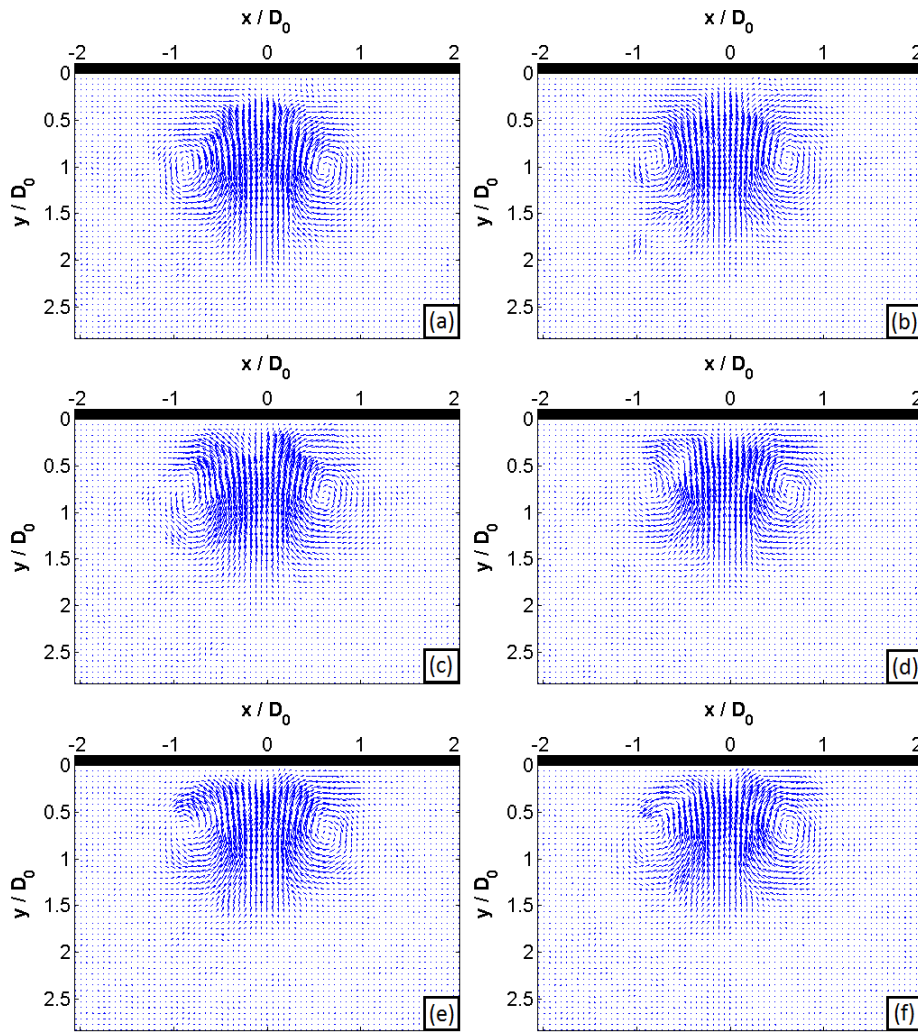


Figura A.1: Campos de velocidad; a) $t=3.05s$, b) $t=3.2s$, c) $t=3.35s$, d) $t=3.5s$, e) $t=3.65s$, f) $t=3.8s$

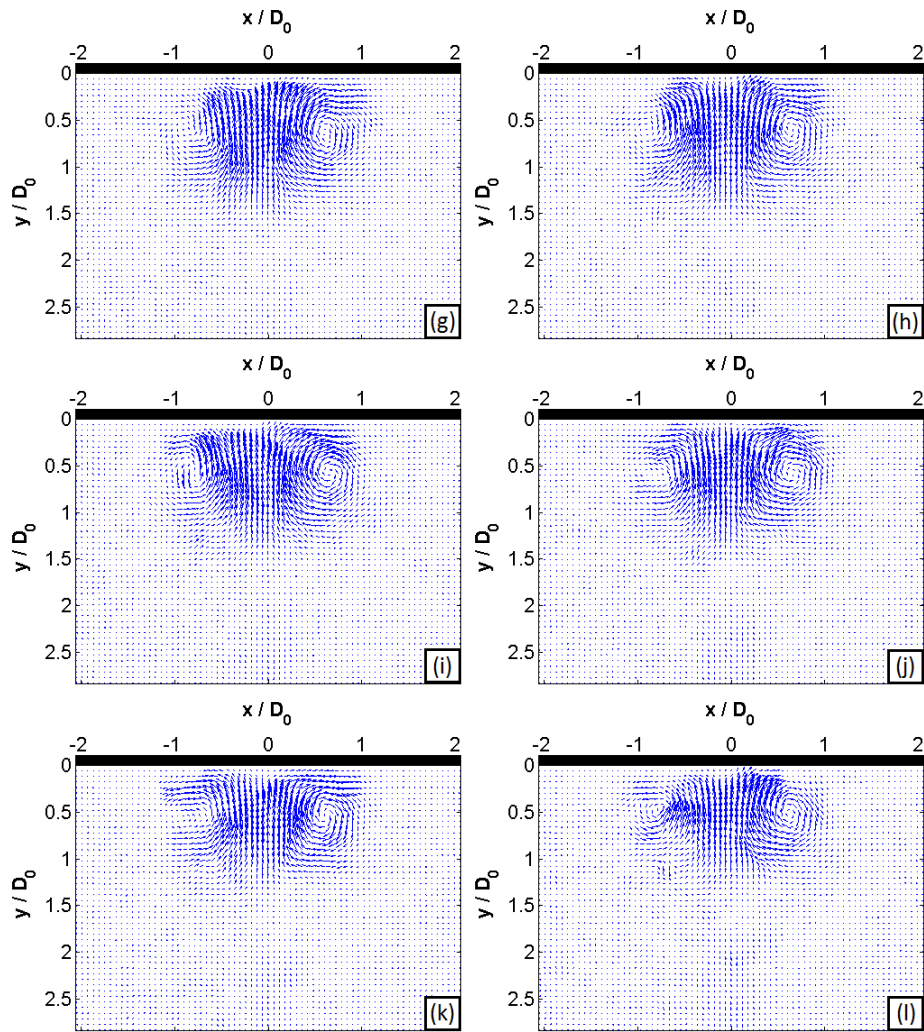


Figura A.2: Campos de velocidad(Continuación); g) $t=3.95s$, h) $t=4.1s$, i) $t=4.25s$, j) $t=4.4s$, k) $t=4.55s$, l) $t=4.7s$

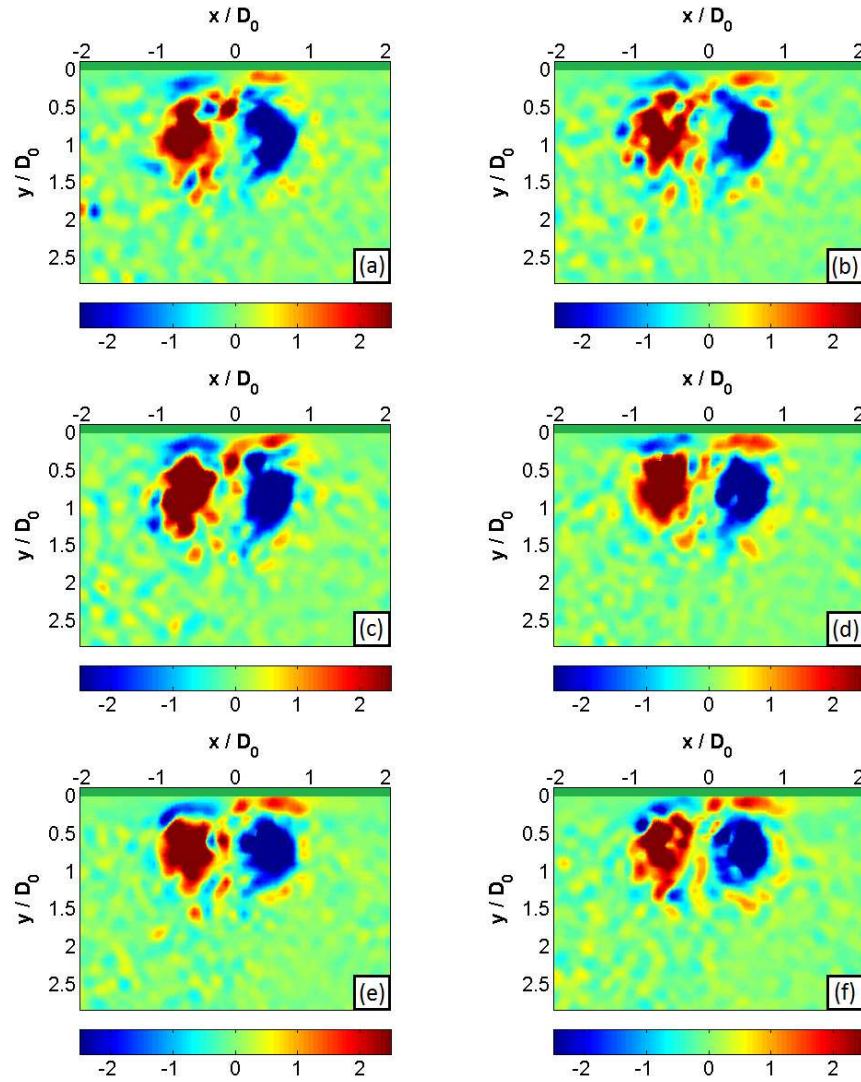


Figura A.3: Campos de vorticidad; a) $t=3.05s$, b) $t=3.2s$, c) $t=3.35s$, d) $t=3.5s$, e) $t=3.65s$, f) $t=3.8s$

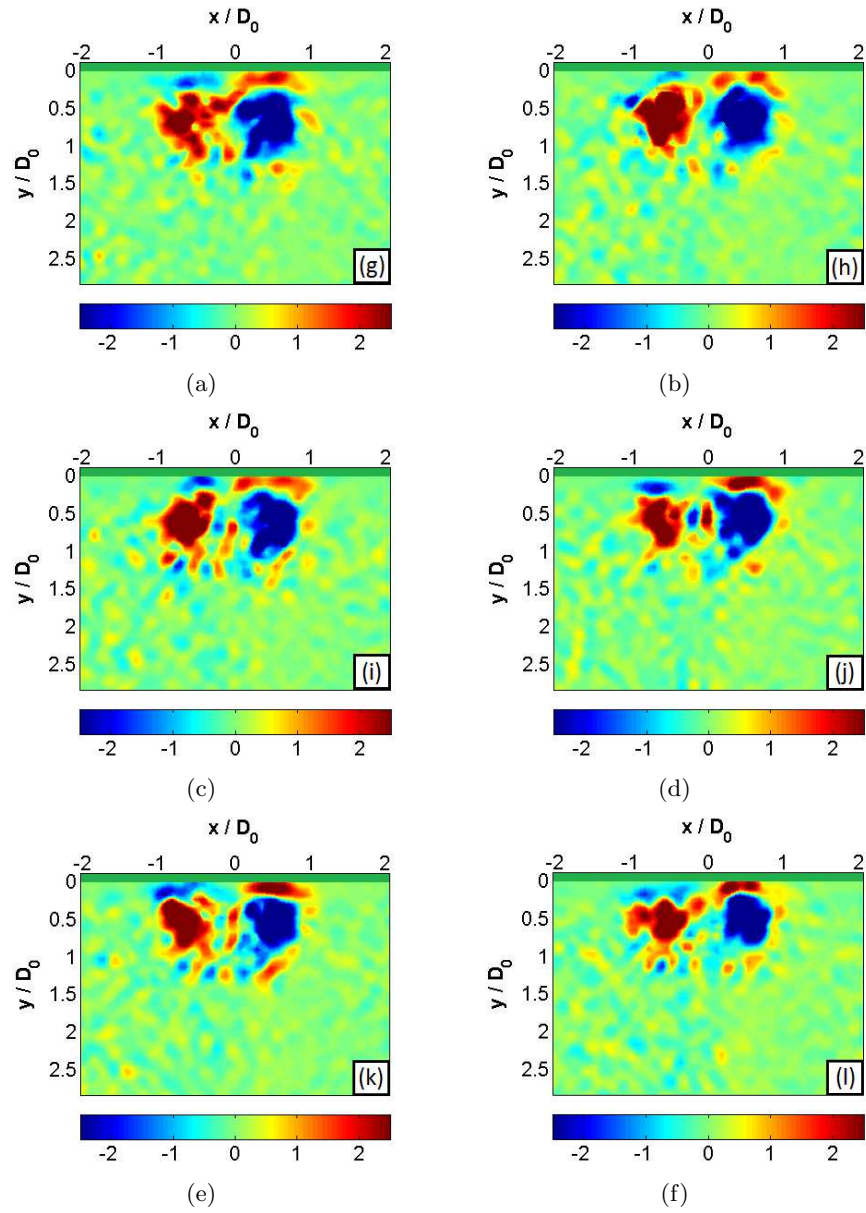


Figura A.4: Campos de vorticidad(Continuación); g)t=3.95s, h)t=4.1s, i)t=4.25s, j)t=4.4s, k)t=4.55s, l)t=4.7s

A.2. $L/D_0 = 2$

Campos de velocidad y de vorticidad

$\Delta t = 0.12s$

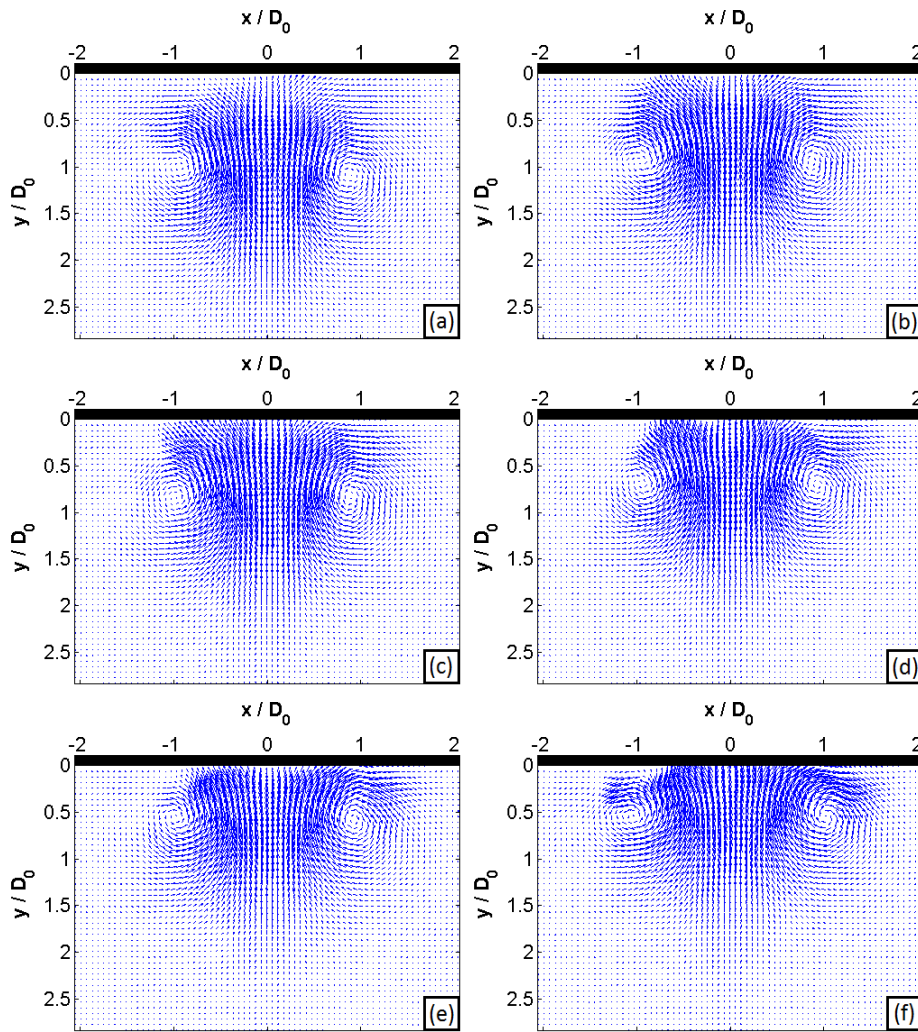


Figura A.5: Campos de velocidad; a) $t=1.84s$, b) $t=1.96s$, c) $t=2.08s$, d) $t=2.2s$, e) $t=2.32s$, f) $t=2.44s$

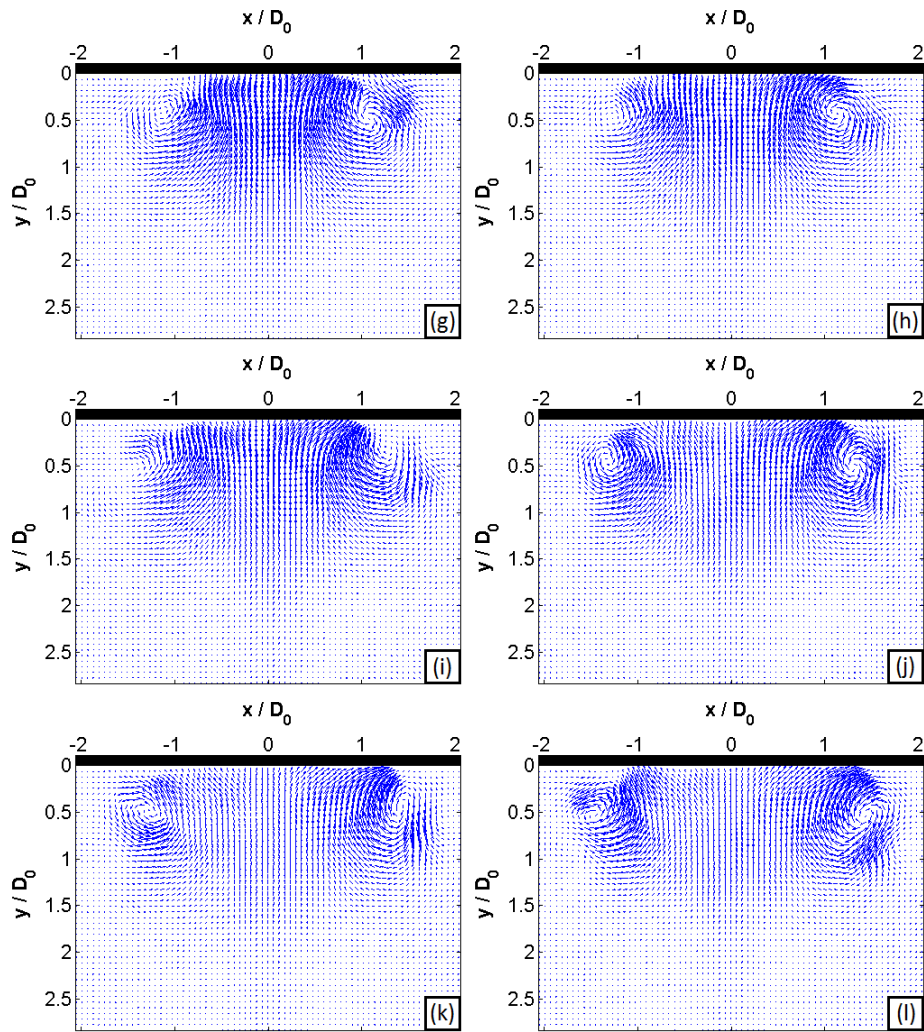


Figura A.6: Campos de velocidad(Continuación); g)t=2.56s, h)t=2.68s, i)t=2.8s, j)t=2.92s, k)t=3.04s, l)t=3.16s

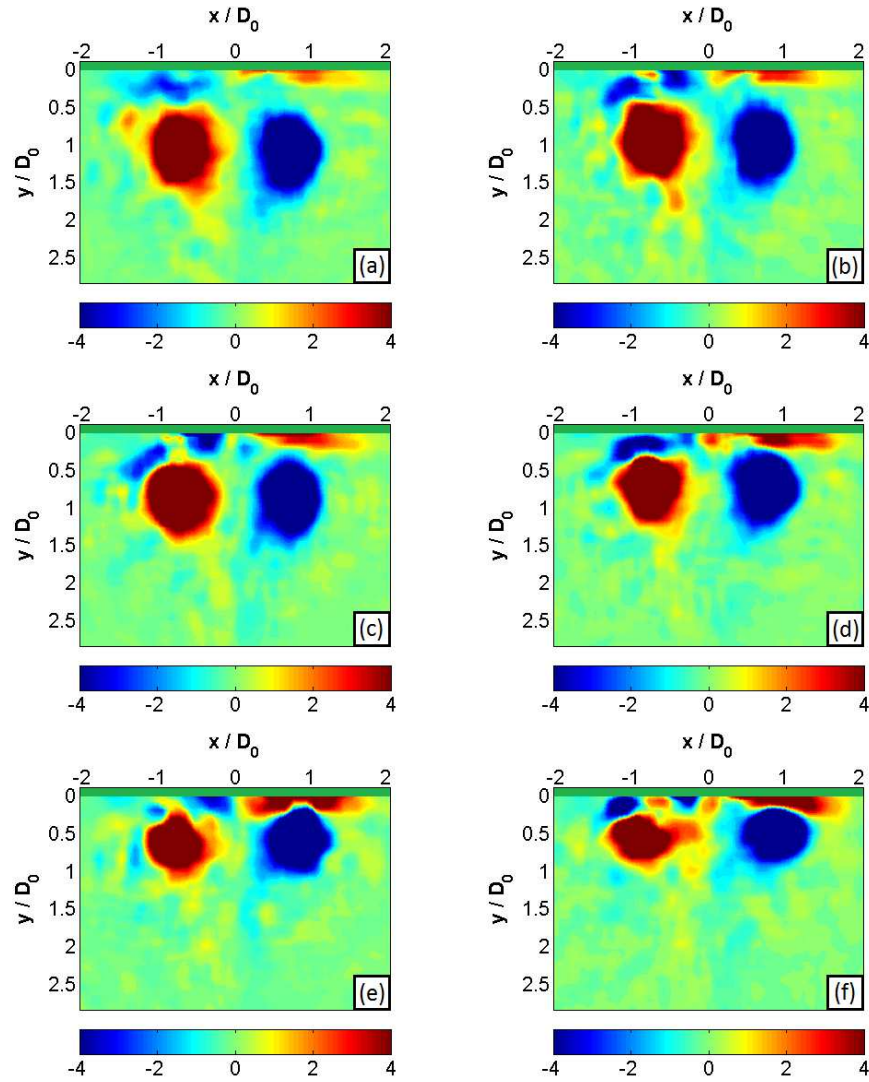


Figura A.7: Campos de vorticidad; a) $t=1.84s$, b) $t=1.96s$, c) $t=2.08s$, d) $t=2.2s$, e) $t=2.32s$, f) $t=2.44s$

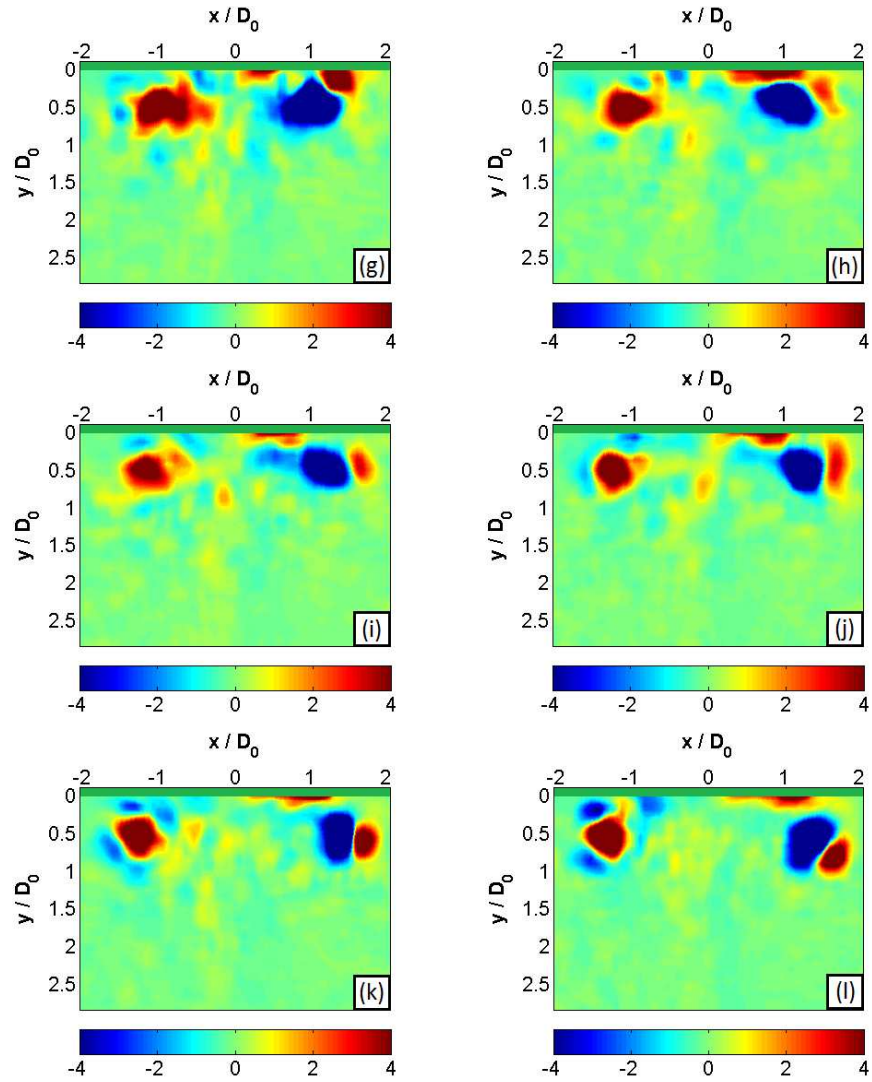


Figura A.8: Campos de vorticidad(Continuación); g)t=2.56s, h)t=2.68s, i)t=2.8s, j)t=2.92s, k)t=3.04s, l)t=3.16s

A.3. $L/D_0 = 3$

Campos de velocidad y de vorticidad

$\Delta t = 0.10\text{s}$

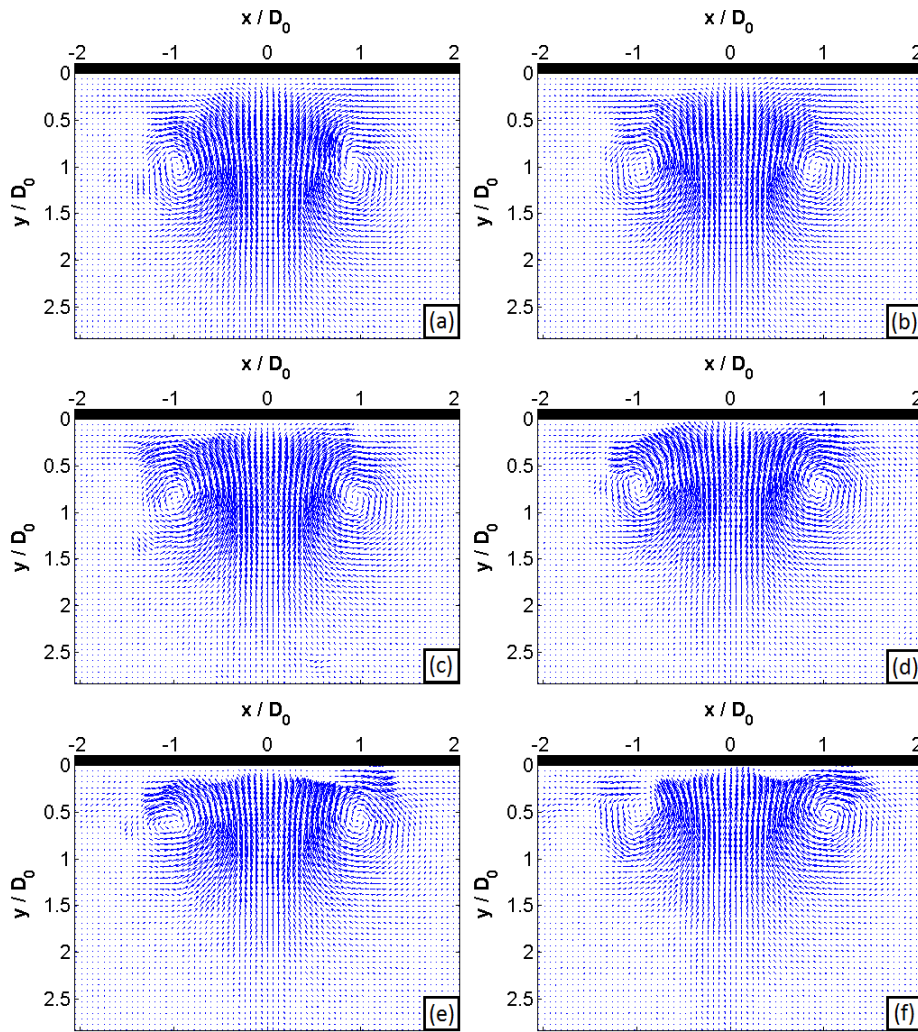


Figura A.9: Campos de velocidad; a) $t=0.98s$, b) $t=1.08s$, c) $t=1.18s$, d) $t=1.28s$, e) $t=1.38s$, f) $t=1.48s$

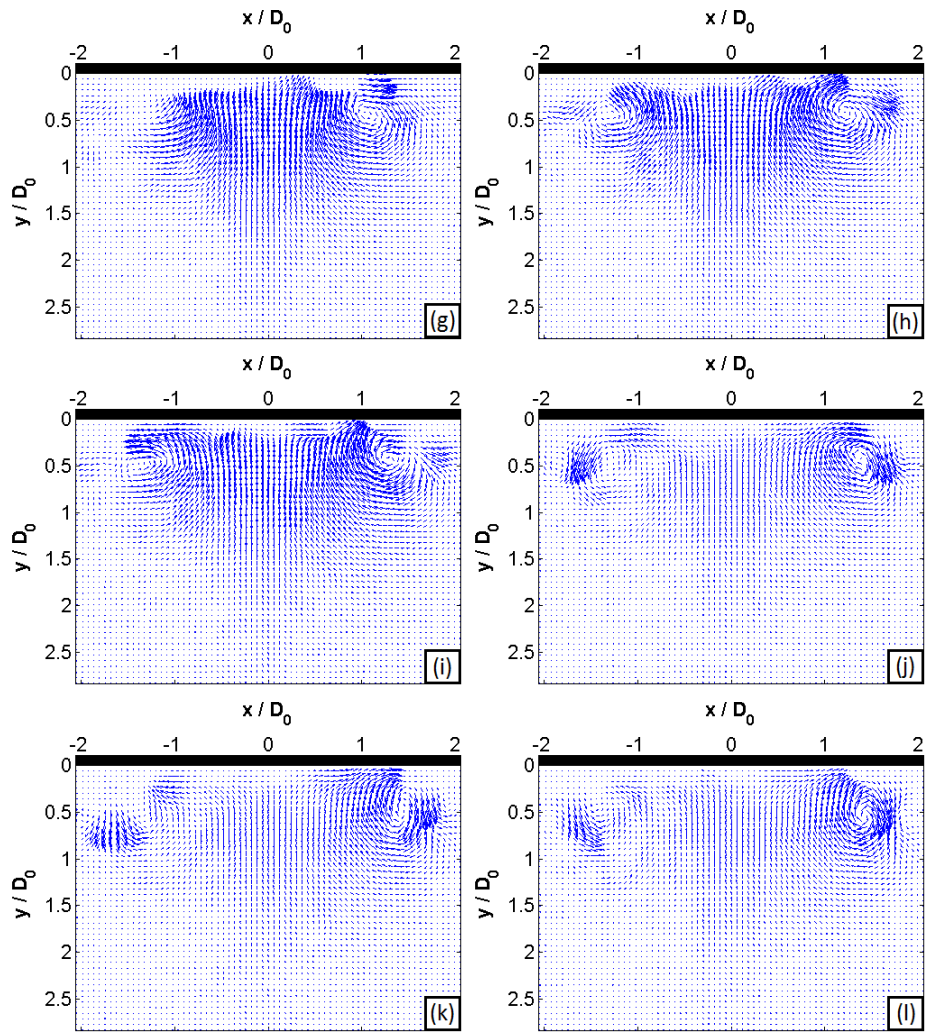


Figura A.10: Campos de velocidad(Continuación); g)t=1.58s, h)t=1.68s, i)t=1.78s, j)t=1.88s, k)t=2.98s, l)t=2.08s

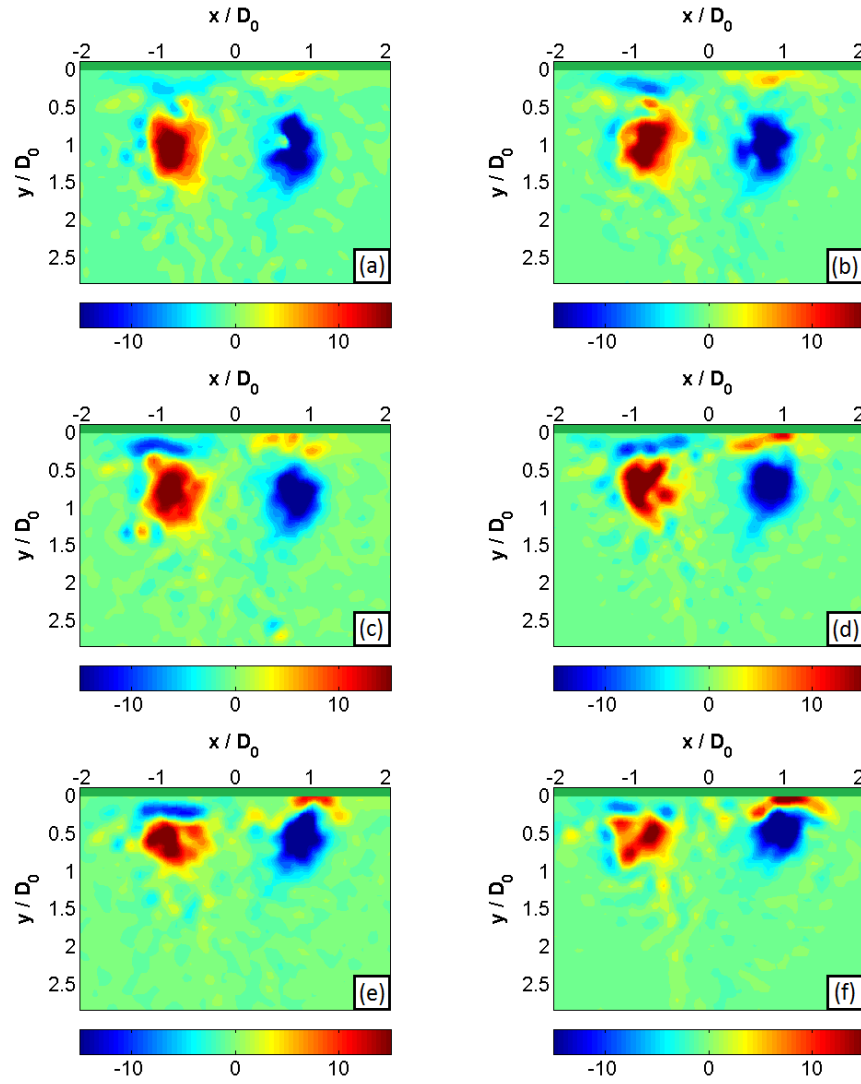


Figura A.11: Campos de vorticidad; a) $t=0.98s$, b) $t=1.08s$, c) $t=1.18s$, d) $t=1.28s$, e) $t=1.38s$, f) $t=1.48s$

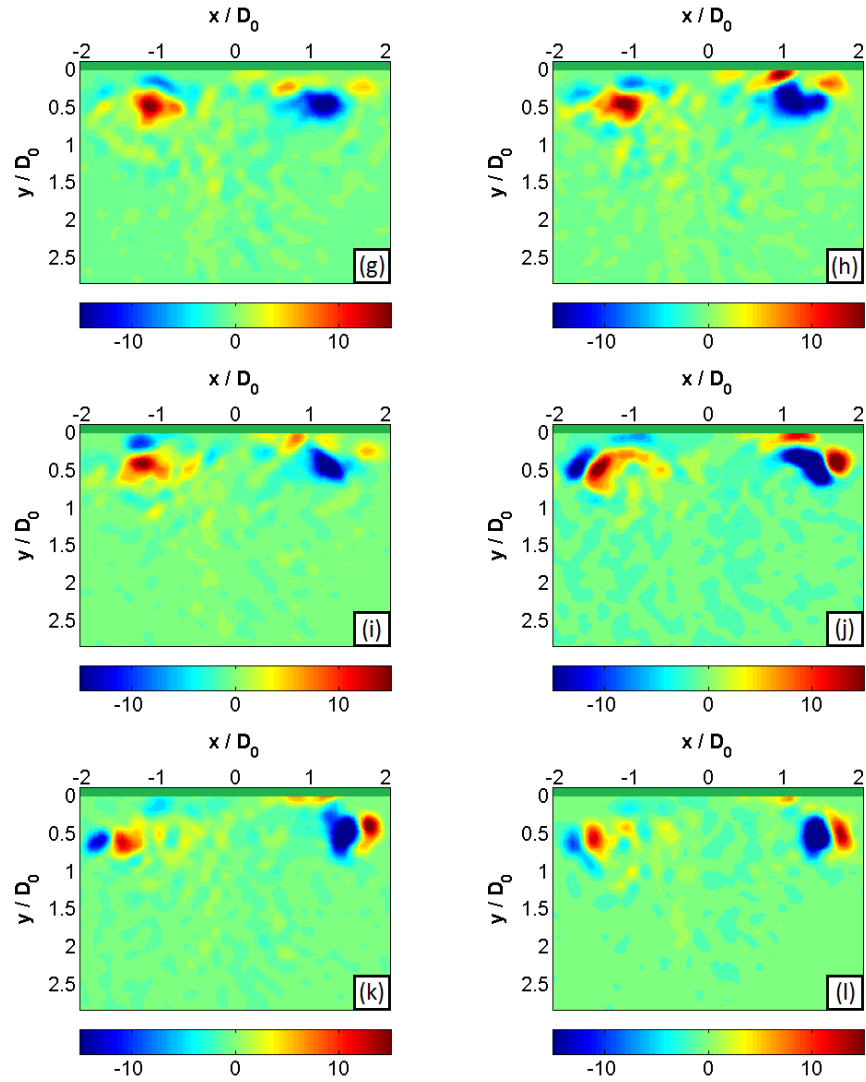


Figura A.12: Campos de vorticidad(Continuación); g) $t=1.58s$, h) $t=1.68s$, i) $t=1.78s$, j) $t=1.88s$, k) $t=2.98s$, l) $t=2.08s$

Apéndice B

Programas en Matlab

B.1. Calibración

```
clear all

%ruta de archivos exportados
ruta='C:\Users\Usuario\Desktop\FABIAN\calib\';

%ruta para salvar figuras
rutcal1='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\calib\fig\';
rutcal2='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\calib\png\';
rutcal3='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\calib\eps\';

%valores de imagenes de calibracion
temp=[20 27.1 31.8 35.8 41.5 45.9];

%paso de la matriz
step=2;
delimiterIn=' ';
headerlinesIn=3;
coldatay=1; coldatay=2; colpx=3; colpy=4; colpixel=5;

L=length(temp)

ind=1;
for ii=1:length(temp)
    archivo=[ruta 'calib' num2str(ii) '.dat'];
```

```
clear A;
A = importdata(archivo,delimiterIn,headerlinesIn);
datos=A.data;

% numero de valores en x y
xval=1+datos(length(datos),coldatay);
yval=1+datos(length(datos),coldatay);

%acomodar las matrices de posiciones

if datos(1,colpy) == datos(2,colpy)

% primeros renglones py = cte
px=reshape(datos(:,colpx),xval,yval);
px=transpose(px);
py=reshape(datos(:,colpy),xval,yval);
py=transpose(py);
pixel=reshape(datos(:,colpixel),xval,yval);
pixel=transpose(pixel);

% primeros renglones px = cte

elseif datos(1,colpx) == datos(2,colpx)
px=reshape(datos(:,colpx),yval,xval);
py=reshape(datos(:,colpy),yval,xval);
pixel=reshape(datos(:,colpixel),yval,xval);
end

if ind == 1
matriztemp=zeros(floor(yval2/step),floor(xval2/step),L));
ind=0;
end

[y0,x0]=size(matriztemp);
pxn=zeros(y0,x0);
pyn=zeros(y0,x0);
pixeln=zeros(y0,x0);

%reducir datos en la matriz
contx=1;
```

```
for i=1:step:xval2
    if i+step-1 > xval2
        break
    end
    pxn(1,contx)=mean(px(1,i:i+step-1));
    contx=contx+1;
end

for i=1:yval2/step
    pxn(i,:)=pxn(1,:);
end
conty=1;

for i=1:step:yval2
    if i+step-1 > yval2
        break
    end
    pyn(conty,1)=mean(py(i:i+step-1,1));
    conty=conty+1;
end

for i=1:xval2/step
    pyn(:,i)=pyn(:,1);
end
conty=1;

for m=1:step:yval2
    contx=1;
    for n=1:step:xval2
        if m+step-1>yval2 || n+step-1>xval2
            break
        end
        B=pixel(m:m+step-1,n:n+step-1);
        pixeln(conty,contx)=(sum(sum(B)))/(step^2);
        contx=contx+1;
    end
    conty=conty+1;
end
matriztemp(:,:,ii)=pixeln;
end
```

```
%traslacion de ejes
xtras=zeros(y0,x0)+20.121005;
ytras=zeros(y0,x0)-21.76503;

pxntras=zeros(y0,x0);
pyntras0=zeros(y0,x0);
pyntras=zeros(y0,x0);

for m=1:y0
    for n=1:x0
        pxntras(m,n)= pxn(m,n)+xtras(m,n);
        pyntras0(m,n)= pyn(m,n)+ytras(m,n);
        pyntras(m,n)=(-1)*pyntras0(m,n);
    end
end

save('pxntras.mat','pxntras')
save('pyntras.mat','pyntras')

%adimensionalizar ejes
pxadim=pxntras/19.4;
pyadim=pyntras/19.4;

save('pxadim.mat','pxadim')
save('pyadim.mat','pyadim')

%impresion de figuras
for ii=1:length(temp)
    figure(ii)
    clf
    box on
    contourf(pxadim,pyadim,matriztemp(:,:,ii),300,
    'LineStyle','none');
    caxis([50 200])
    colorbar('location','SouthOutside','fontsize',16);
    colormap(gray)
    xlabel('x / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
    ylabel('y / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
```



```
set(gca,'fontsize',16)
set(gca,'YDir','reverse')
set(gca,'YAxisLocation','left')
set(gca,'XAxisLocation','top')
axis([- 2.3196 2.3196 -0.5155 3.0928])

%salvar imag
calib1ruta=[rutcall 'calib' num2str(ii) '.fig'];
saveas(gcf,calib1ruta,'fig');
calib2ruta=[rutcal2 'calib' num2str(ii) '.png'];
saveas(gcf,calib2ruta,'png');
calib3ruta=[rutcal3 'calib' num2str(ii) '.eps'];
saveas(gcf,calib3ruta,'eps');

end

save('matriztemp.mat','matriztemp')
save('pxpy.mat','pxn','pyn')
save('temp.mat','temp')

%regresion lineal
xdata=temp;
ydata=zeros(1,length(temp));
coeffmatriz=zeros(y0,x0,2);

for m=1:y0
    for n=1:x0
        ydata(1,:)=matriztemp(m,n,:);
        [p,S] = polyfit(xdata,ydata,1);
        coeffmatriz(m,n,1)=p(1);
        coeffmatriz(m,n,2)=p(2);
    end
end

save('coeffmatriz.mat','coeffmatriz');

pends=zeros(y0,x0);
ords=zeros(y0,x0);
```

```
for m=1:yvaln
    for n=1:xvaln
        pends(m,n)=coeffmatriz(m,n,1);
        ords(m,n)=coeffmatriz(m,n,2);
    end
end

save('pends.mat','pends');
save('ords.mat','ords');

save('xdata.mat','xdata');
save('ydata.mat','ydata');
```

B.2. Imágenes en escala de grises

```
clear all

%ruta de archivos exportados
ruta='C:\Users\Usuario\Desktop\exportacion\cam1\';

delimiterIn=' ';
headerlinesIn=3;
coldatax2=1;
coldatay2=2;
colpx2=3;
colpy2=4;
colpixel2=5;

%ruta de archivos .mat
ruta2='C:\Users\Usuario\Desktop\FABIAN_plif\';

%cargar archivos .mat
archivomtem1=[ruta2 'matriztemp.mat'];
archivoxtran=[ruta2 'pxntras.mat'];
archivoytran=[ruta2 'pyntas.mat'];
archivopxxd=[ruta2 'pxadim.mat'];
```

```

archivopyyd=[ruta2 'pyadim.mat'];
archivomatvecx=[ruta2 'matrixvectorx.mat'];
archivomatvecy=[ruta2 'matrixvectory.mat'];
archivotraslax=[ruta2 'pxtrasla.mat'];
archivotraslay=[ruta2 'pytrasla.mat'];
load(archivomtem1);
load(archivoxtran);
load(archivoytran);
load(archivopxxd);
load(archivopyyd);
load(archivomatvecx);
load(archivomatvecy);
load(archivotraslax);
load(archivotraslay);

%ruta para salvar figuras
rutim1='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\cam1\fig\';
rutaim2='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\cam1\png\';
rutaim3='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\cam1\eps\';
stepma=2;

ind=1;
[y0,x0,ima0]=size(matriztemp);

%exportar y acomodar datos
for ii=1:ima0
archivo=[ruta 'im' num2str(ii) '.dat'];
clear C;
C = importdata(archivo,delimiterIn,headerlinesIn);
datos2=C.data;

%numero de valores en x y
xval2=1+datos2(length(datos2),coldatx2);
yval2=1+datos2(length(datos2),coldatay2);

%reacomodar las matrices de posiciones
if datos2(1,colpy2) == datos2(2,colpy2)
px2=reshape(datos2(:,colpx2),xval2,yval2);
px2=transpose(px2);
py2=reshape(datos2(:,colpy2),xval2,yval2);

```

```
py2=transpose(py2);
pixel2=reshape(datos2(:, colpixel2), xval2, yval2);
pixel2=transpose(pixel2);
    elseif datos2(1, colpx2) == datos2(2, colpx2)
        px2=reshape(datos2(:, colpx2), yval2, xval2);
        py2=reshape(datos2(:, colpy2), yval2, xval2);
        pixel2=reshape(datos2(:, colpixel2), yval2, xval2);
    end

    if ind == 1
        matriztemp2=zeros(y0, x0, 6);
        ind=0;
    end

    pxn2=zeros(y0, x0);
    pyn2=zeros(y0, x0);
    pixeln2=zeros(y0, x0);

    %reducir datos en la matriz
    contx2=1;
    for i=1:stepma:xval2-6
        if i+stepma-1 > xval2
            break
        end
        pxn2(1, contx2)=mean(px2(1, i:i+stepma-1));
        contx2=contx2+1;
    end

    for i=1:yval2-7/stepma
        pxn2(i, :)=pxn2(1, :);
    end

    conty2=1;
    for i=1:stepma:yval2-7
        if i+stepma-1 > yval2
            break
        end
        pyn2(conty2, 1)=mean(py2(i:i+stepma-1, 1));
        conty2=conty2+1;
    end
```

```

for i=1:xval2-6/stepma
pyn2(:,i)=pyn2(:,1);
end

conty2=1;
for m=1:stepma:yval2-7
contx2=1;

for n=1:stepma:xval2-6
if m+stepma-1>yval2 || n+stepma-1>xval2
break
end
D=pixel2(m:m+stepma-1,n:n+stepma-1);
pixeln2(conty2,contx2)=(sum(sum(D)))/(stepma^2);
contx2=contx2+1;
end
conty2=conty2+1;
end
matriztemp2(:, :, ii)=pixeln2;
end

[y,x,ima]=size(matriztemp2);

matriztemp21=zeros(y,x,ima);

%agregar mascara
for ii=1:ima
for m=1:y
for n=1:x
if matriztemp(m,n,1)==0;
matriztemp21(m,n,ii)=1;
else
matriztemp21(m,n,ii)=matriztemp2(m,n,ii);
end
end
end
end
end

```

```
%impresion de figuras

for ii=1:ima0
figure(ii)
clf
box on
contourf(pxadim,pyadim,matriztemp21(:, :, ii),300,
'LineStyle','none');
colorbar('location','SouthOutside','fontsize',16);
colormap(gray)
caxis([80 200])
axis equal
axis([- 2.5 0 -0.2 1.5])
xlabel('x / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
ylabel('y / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
set(gca,'fontsize',16)
set(gca,'YDir','reverse')
set(gca,'YAxisLocation','left')
set(gca,'XAxisLocation','top')

%salvar imag
imruta1=[rutim1 'calib' num2str(ii) '.fig'];
saveas(gcf,imruta1,'fig');
imruta2=[rutim2 'calib' num2str(ii) '.png'];
saveas(gcf,imruta2,'png');
imruta3=[rutim3 'calib' num2str(ii) '.eps'];
saveas(gcf,imruta3,'eps');

end

save('matriztemp2.mat','matriztemp2')
save('matriztemp21.mat','matriztemp21')
```

B.3. Obtención de mapas de temperatura

```
clear all
```

```

%ruta de archivos .mat
ruta='C:\Users\Usuario\Desktop\FABIAN_plif\';

%ruta para salvar figuras
rutat1='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\temp\fig\';
rutat2='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\temp\png\';
rutat3='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\temp\eps\';

%cargar archivos .mat
archivopxn2=[ruta 'px2py2.mat'];
archivoords=[ruta 'ords.mat'];
archivopens=[ruta 'pends.mat'];
archivomattemp2=[ruta 'matriztemp2.mat'];
archivoxtrans=[ruta 'pxntras.mat'];
archivoytrans=[ruta 'pynttras.mat'];
archivopxxd=[ruta 'pxadim.mat'];
archivopyyd=[ruta 'pyadim.mat'];
load(archivopxn2);
load(archivoords);
load(archivopens);
load(archivomattemp2);
load(archivoxtrans);
load(archivoytrans);
load(archivopxxd);
load(archivopyyd);

[y2,x2,im2]=size(matriztemp2);

restemp1=zeros(y2,x2,im2);
restemp2=zeros(y2,x2,im2);
restemp3=zeros(y2,x2,im2);

ind=1;
% filtro de pendientes
for ii=1:im2
    for m=1:y2
        for n=1:x2
            restemp1(m,n,ii)=(matriztemp2(m,n,ii)-ords(m,n));
        end
    end
end

```

```
    if pends2(m,n)>=-0.3
    restemp2(m,n,ii)=22.5;
    else
    restemp2(m,n,ii)=restemp1(m,n,ii)./ pends2(m,n);
    end

    if resultstemp2(m,n,ii)>37.2;
    resultstemp2(m,n,ii)=37.2;
    end
end
end
end

save('restemp1.mat','restemp1')
save('restemp2.mat','restemp2')

%filtro de temperaturas
for ii=1:im2
for m=1:y2
for n=1:x2
if restemp2(m,n,ii)<30.5;
restemp3(m,n,ii)=22.5;
end

if restemp2(m,n,ii)>30.5 &&
restemp2(m,n,ii)<=37.2;
restemp3(m,n,ii)=restemp2(m,n,ii);
end
end
end
end
end

save('restemp3.mat','restemp3')

%impresion de figuras
for ii=1:im2
figure(ii)
```



```
clf
box on
contourf(pxadim,pyadim,restemp3(:,:,ii),100,
'LineStyle','none');
colorbar('location','SouthOutside','fontsize',16);
xlabel('x / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
ylabel('y / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
caxis([20 36])
axis equal
set(gca,'fontsize',16)
set(gca,'YDir','reverse')
set(gca,'YAxisLocation','left')
set(gca,'XAxisLocation','top')
axis([- 2.3196 2.3196 -0.5155 3.0928])

%salvar figuras
t1ruta=[rutat1 'mtemp' num2str(ii) '.fig'];
saveas(gcf,t1ruta,'fig');
t2ruta=[rutat2 'mtemp' num2str(ii) '.png'];
saveas(gcf,t2ruta,'png');
t3ruta=[rutat3 'mtemp' num2str(ii) '.eps'];
saveas(gcf,t3ruta,'eps');

end
```

B.4. Campos de velocidad

```
clear all

%ruta de archivos exportados
ruta='C:\Users\Usuario\Desktop\exportacion\cam2\';

%ruta de archivos .mat
ruta2='C:\Users\Usuario\Desktop\FABIAN_plif\';

%ruta para salvar figuras
rutvec1='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\vec\fig\';
```

```
rutvec2='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\vec\png\';
rutvec3='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\vec\eps\';

delimiterIn=' ';
headerlinesIn=3;

coldatax4=1;
coldatay4=2;
colpx4=3;
colpy4=4;
colvx4=5;
colvy4=6;
collength=7;
colstatus=8;
value_status=17;
value_status2=16;

%cargar archivos .mat
archivomtem1=[ruta2 'matriztemp.mat'];
archivomtem2=[ruta2 'matriztemp2.mat'];
archivopx=[ruta2 'pxpy.mat'];
archivotrasx=[ruta2 'pxntras.mat'];
archivotrasy=[ruta2 'pyntas.mat'];
load(archivomtem1);
load(archivomtem2);
load(archivopx);
load(archivotrasx);
load(archivotrasy);

[y4,x4,impiv]=size(matriztemp2);
ind=1;

%exportar y acomodar datos

for ii=1:impiv
archivo=[ruta 'piv' num2str(ii) '.dat'];
clear G;
```

```
G = importdata(archivo,delimiterIn,headerlinesIn);
datos4=G.data;
[rentot, coltot]=size(datos4);

xval4=1+datos4(rentot, coldatax4);
yval4=1+datos4(rentot, coldatay4);

%crear mascara
maskcol=zeros(rentot,1);

for j=1:rentot
    if datos4(j,colstatus) ~= value_status2
        maskcol(j,1)=0;
    else
        maskcol(j,1)=1;
    end
end

% primeros renglones py = cte
if datos4(1,coldatay4) == datos4(2,coldatay4)
maskdata=reshape(maskcol,xval4,yval4);
maskdata=transpose(maskdata);

% primeros renglones px = cte
elseif datos4(1,coldatax4) == datos4(2,coldatax4)
maskdata=reshape(maskcol,yval4,xval4);
end

% primeros renglones py = cte
if datos4(1,colpy4) == datos4(2,colpy4)
px4=reshape(datos4(:,colpx4),xval4,yval4);
py4=reshape(datos4(:,colpy4),xval4,yval4);
px4=px4/1000;
py4=py4/1000; % milímetros a metros
px4=transpose(px4); py4=transpose(py4);

vx=reshape(datos4(:,colvx4),xval4,yval4);
vy=reshape(datos4(:,colvy4),xval4,yval4);
vx=transpose(vx); vy=transpose(vy);
```

```
vlength=reshape(datos4(:, collength), xval4, yval4);
vlength=transpose(vlength);

% primeros renglones px = cte
elseif datos4(1, colpx4) == datos4(2, colpx4)
px4=reshape(datos4(:, colpx4), yval4, xval4);
py4=reshape(datos4(:, colpy4), yval4, xval4);
px4=px4/1000;
py4=py4/1000; % milímetros a metros

vx=reshape(datos4(:, colvx4), yval4, xval4);
vy=reshape(datos4(:, colvy4), yval4, xval4);

vlength=reshape(datos4(:, collength), yval4, xval4);

end

dx=px4(1,2) - px4(1,1);
dy=py4(2,1) - py4(1,1);

vx=vx.*maskdata;
vy=vy.*maskdata;
vlength=vlength.*maskdata;

if ind == 1
vectorx=zeros(yval4, xval4, 6);
vectory=zeros(yval4, xval4, 6);

ind=0;
end

%matriz der velocidades x,y
vectorx(:, :, ii)=vx;
vectory(:, :, ii)=-vy;

end

save('vectorx.mat', 'vectorx')
save('vectory.mat', 'vectory')
save('px4py4.mat', 'px4', 'py4')
```

```
save('vlength.mat', 'vlength')
save('dx.mat', 'dx')
save('dy.mat', 'dy')

[yta, xta]=size(py4);

%traslacion de ejes
xtrasla=zeros(yval4, xval4)+0.0379213;
ytrasla=zeros(yval4, xval4)-0.02256345092;
pxtrasla=zeros(yval4, xval4);
pytrasla0=zeros(yval4, xval4);
pytrasla=zeros(yval4, xval4);

for m=1:yta
    for n=1:xta
        pxtrasla(m,n)= px4(m,n)+xtrasla(m,n);
        pytrasla0(m,n)= py4(m,n)+ytrasla(m,n);
        pytrasla(m,n)= -1*(pytrasla0(m,n));
    end
end

save('pxtrasla.mat', 'pxtrasla')
save('pytrasla.mat', 'pytrasla')

% ejes adimensionales

xadim=pxtrasla/0.0194;
yadim=pytrasla/0.0194;

% imprimir figuras
for ii=1:impiv
    figure(ii)
    clf
    box on
    quiver(xadim, yadim, vectorx(:, :, ii),
    vectory(:, :, ii), 2.8)
    axis equal
    set(gca, 'YDir', 'reverse')
```

```
set(gca,'XAxisLocation','top')
xlabel('x / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
ylabel('y / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
set(gca,'fontsize',16)
axis([-2.0619 2.0619 -0.1031 2.8351])

%salvar imagenes
vec1ruta=[rutvec1 'mapvec' num2str(ii) '.fig'];
saveas(gcf,vec1ruta,'fig');
vec2ruta=[rutvec2 'mapvec' num2str(ii) '.png'];
saveas(gcf,vec2ruta,'png');
vec3ruta=[rutvec3 'mapvec' num2str(ii) '.eps'];
saveas(gcf,vec3ruta,'eps');

end
```

B.5. Vorticidad, Criterio Q y Curvatura

```
clear all

%ruta de archivos exportados
ruta='C:\Users\Usuario\Desktop\FABIAN_plif\';

%ruta para salvar figuras
rutvor1='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\vor\fig\';
rutvor2='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\vor\png\';
rutvor3='C:\Users\Usuario\Desktop\SAVE\vor\eps\';

%cargar archivos .mat
archivotraslax=[ruta 'pxtrasla.mat'];
archivotraslay=[ruta 'pytrasla.mat'];
archivovx=[ruta2 'matrixvectorx.mat'];
archivovy=[ruta2 'matrixvectory.mat'];
archivotraslax2=[ruta2 'pxcden.mat'];
archivotraslay2=[ruta2 'pycden.mat'];
archivovx2=[ruta2 'matrixvectorx2.mat'];
archivovy2=[ruta2 'matrixvectory2.mat'];
```

```

archivopx4py4=[ruta2 'px4py4.mat'];
archivodx=[ruta2 'dx.mat'];
archivody=[ruta2 'dy.mat'];
archivoxtras=[ruta2 'pxntras.mat'];
archivoytras=[ruta2 'pyntras.mat'];
archivoesultstemp3=[ruta2 'resultstemp3.mat'];
load( archivotraslax );
load( archivotraslay );
load( archivovx );
load( archivovy );
load( archivotraslax2 );
load( archivotraslay2 );
load( archivovx2 );
load( archivovy2 );
load( archivopx4py4 );
load( archivodx );
load( archivody );
load( archivoxtras );
load( archivoytras );
load( archivoesultstemp3 );

[ypiv , xpiv , impiv]=size( vectorx );

vorticy=zeros(ypiv , xpiv , impiv );

ind=1;

% vorticidad
for ii=1:impiv
[vorticy (: , : , ii) , cav]=curl( pxtrasla , pytrasla ,
matrixvectorx (: , : , ii) , matrixvectory (: , : , ii) );
end

save( 'vorticy.mat' , 'vorticy ' )

% ejes adim
xadim=pxtrasla /0.0194;
yadim=pytrasla /0.0194;

```

```
% Imprimir figuras
for ii=1:impiv
figure(ii)
clf
hold on
box on
contourf(xadim,yadim,vorticy(:,:,ii),300,
'LineStyle','none')
set(gca,'Clim',[-3,3])
colorbar('location','SouthOutside','fontsize',16)
xlabel('x / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
ylabel('y / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
set(gca,'fontsize',16)
set(gca,'YDir','reverse')
set(gca,'YAxisLocation','left')
set(gca,'XAxisLocation','top')
axis equal
axis([-2.0619 2.0619 -0.1031 2.8351])

%salvar figuras
v1ruta=[rutvor1 'vort' num2str(ii) '.fig'];
saveas(gcf,v1ruta,'fig');
v2ruta=[rutvor2 'vort' num2str(ii) '.png'];
saveas(gcf,v2ruta,'png');
v3ruta=[rutvor3 'vort' num2str(ii) '.eps'];
saveas(gcf,v3ruta,'eps');

end

matrixvector1=-matrixvector1;
matrixvector2=-matrixvector2;

% Gradiente de velocidad
% [gux,guy] = gradient(vx, dx, dy);
% [gvx,gvy] = gradient(vy, dx, dy);

gux=zeros(ypiv,xpiv,impiv);
guy=zeros(ypiv,xpiv,impiv);
gvx=zeros(ypiv,xpiv,impiv);
gvy=zeros(ypiv,xpiv,impiv);
```



```

for ii=1:impiv
[gux (:, :, ii), guy (:, :, ii)] = gradient (matrixvectorx
      (:, :, ii), dx, dy);
[gvx (:, :, ii), gvy (:, :, ii)] = gradient (matrixvectory
      (:, :, ii), dx, dy);
end

save ('gux.mat', 'gux')
save ('guy.mat', 'guy')
save ('gvx.mat', 'gvx')
save ('gvy.mat', 'gvy')

%Definicion general del criterio Q
%quo=gux.*gvy-guy.*gvx;
% Definition of Q criterion for incompresible flow
% quo=-1/2*(gux).^2-guy.*gvx-1/2*gvy.^2;

quo=zeros (ypiv, xpiv, impiv);

for ii=1:impiv
quo (:, :, ii)=-1/2*(gux (:, :, ii)).^2-guy (:, :, ii)
.*gvx (:, :, ii)-1/2*gvy (:, :, ii).^2;
end

save ('quo.mat', 'quo')

% Curvatura
% umod=sqrt (vx.^2+vy.^2);
% umod3=umod.^3;
% umod3inv=umod3.^(-1);
% K=umod3inv.*(vx.*vx.*gvx+vx.*vy.*gvy-vx.*vy
.*gux-vy.*vy.*guy);

%Kabs=abs(K);

umod=zeros (ypiv, xpiv, impiv);

```

```
for ii=1:impiv
umod(:, :, ii)=sqrt((matrixvectorx(:, :, ii)).^2+
                    (matrixvector(:, :, ii).^2));
end

umod3=umod.^3;
umod3inv=umod3.^(-1);

K=zeros(ypiv, xpiv, impiv);
KT=zeros(ypiv, xpiv, impiv);
K1=zeros(ypiv, xpiv, impiv);
K2=zeros(ypiv, xpiv, impiv);
K3=zeros(ypiv, xpiv, impiv);
K4=zeros(ypiv, xpiv, impiv);

for ii=1:impiv
K1(:, :, ii)=matrixvectorx(:, :, ii).*matrixvectorx(:, :, ii)
             .*gvx(:, :, ii);
K2(:, :, ii)=matrixvectorx(:, :, ii).*matrixvector(:, :, ii)
             .*gvy(:, :, ii);
K3(:, :, ii)=matrixvectorx(:, :, ii).*matrixvector(:, :, ii)
             .*gux(:, :, ii);
K4(:, :, ii)=matrixvector(:, :, ii).*matrixvector(:, :, ii)
             .*guy(:, :, ii);
KT(:, :, ii)=K1(:, :, ii)+K2(:, :, ii)-K3(:, :, ii)-K4(:, :, ii);
K(:, :, ii)=umod3inv(:, :, ii).*KT(:, :, ii);
end

K=umod3inv.*KT;

% quitar valores no definidos NaN o Inf

for ii=1:impiv
for m=1:ypiv
for n=1:xpiv
if matrixvectorx(m,n,ii) == 0
K(m,n,ii) = 0;
end
end
end
end
```

```

end

Kabs=abs(K);
save('Kabs.mat', 'Kabs')

pxntras1000=pxntras/1000;
pyntras1000=pyntras/1000;

save('pxntras1000.mat', 'pxntras1000')
save('pyntras1000.mat', 'pyntras1000')

```

B.6. Trayectoria, Diámetro y $V_{traslacion}$

```

clear all

%ruta de archivos.mat
ruta='C:\Users\Usuario\Desktop\FABIAN_plif\';

%cargar archivos.mat
archivomatrixvectorx=[ruta 'vectorx.mat'];
archivomatrixvectory=[ruta 'vectory.mat'];
archivopxtrasla=[ruta 'pxtrasla.mat'];
archivopytrasla=[ruta 'pytrasla.mat'];
archivovorticy=[ruta 'vorticy.mat'];
archivokabs=[ruta 'Kabs.mat'];
load(archivomatrixvectorx);
load(archivomatrixvectory);
load(archivopxtrasla);
load(archivopytrasla);
load(archivovorticy);
load(archivokabs);

[yval, xval, im]=size(vorticy);

dvort=0.015;

px_vortmax=zeros(im, 1);

```

```
py_vortmax=zeros(im,1);
px_vortmin=zeros(im,1);
py_vortmin=zeros(im,1);

% maximos y minimos de vorticidad
% verificar signo de la vorticidad

for ii=1:100
[C,I]=max(vorticy(:,:,ii));
[C2,I2]=max(C);
I1=I(I2);
px_vortmax(ii,:)=pxtrasla(I1,I2);
py_vortmax(ii,:)=pytrasla(I1,I2);
clear I I1 I2 C
[C,I]=min(vorticy(:,:,ii));
[C2,I2]=min(C);
I1=I(I2);
px_vortmin(ii,1)=pxtrasla(I1,I2);
py_vortmin(ii,:)=pytrasla(I1,I2);
clear I I1 I2 C
end

dx=pxtrasla(1,2)-pxtrasla(1,1);
dy=pytrasla(2,1)-pytrasla(1,1);

%acotar region para maxima curv

mask_vortex=zeros(yval,xval,im);
mask2_vortex=zeros(yval,xval,im);

for ii=1:im
for m=1:yval
for n=1:xval

if pxtrasla(m,n)>=(px_vortmax(ii,:)-dvort/2)&&
pxtrasla(m,n)<=(px_vortmax(ii,)+dvort/2)&&

pytrasla(m,n)<=(py_vortmax(ii,)+dvort/2)&&
pytrasla(m,n) >= (py_vortmax(ii,)-dvort/2)
```

```

mask_vortex(m,n,ii)=1;

    end

    if pxtrasla(m,n)>=(px_vortmin(ii,:)-dvort/2)&&
pxtrasla(m,n)<=(px_vortmin(ii,:)+dvort/2)&&

pytrasla(m,n)<=(py_vortmin(ii,:)+dvort/2)&&
pytrasla(m,n) >=(py_vortmin(ii,:)-dvort/2)

    mask2_vortex(m,n,ii)=1;
    end

    end
end
end

K_vortmax=Kabs.*mask_vortex;
K_vortmin=Kabs.*mask2_vortex;

px_K_vortmax=zeros(im,1);
py_K_vortmax=zeros(im,1);
px_K_vortmin=zeros(im,1);
py_K_vortmin=zeros(im,1);

% maximos de K

for ii=1:im
[C,I]=max(K_vortmax(:, :, ii));
[C2,I2]=max(C);
I1=I(I2);
px_K_vortmax(ii,:)=pxtrasla(I1,I2);
py_K_vortmax(ii,:)=pytrasla(I1,I2);
clear I I1 I2 C
[C,I]=max(K_vortmin(:, :, ii));
[C2,I2]=max(C);
I1=I(I2);
px_K_vortmin(ii,:)=pxtrasla(I1,I2);
py_K_vortmin(ii,:)=pytrasla(I1,I2);
clear I I1 I2 C

```

```
end

D0=0.0194

%Graficar trayectoria de vortice
for ii=1:im
figure(1)
hold on
plot(px_K_vortmax(ii,:)/D0,py_K_vortmax(ii,:)/D0,
'k+', 'markersize',5)
plot(px_K_vortmin2(ii,:)/D0,py_K_vortmin(ii,:)/D0,
'k+', 'markersize',5)
plot(px_K_vortmax(ii,:)/D0,py_K_vortmax(ii,:)/D0,
'ko', 'markersize',5)
plot(px_K_vortmin2(ii,:)/D0,py_K_vortmin(ii,:)/D0,
'ko', 'markersize',5)

xlabel('x / D_0', 'fontsize',14, 'fontweight', 'b')
ylabel('y / D_0', 'fontsize',14, 'fontweight', 'b')
set(gca, 'fontsize',14)
axis([-1.8 1.8 0 3.2])
set(gca, 'YDir', 'reverse')
set(gca, 'YAxisLocation', 'left')
set(gca, 'XAxisLocation', 'top')
end

px_K_vortmax2=-px_K_vortmax;

%Diametro de vortice

Dv=px_K_vortmax2+px_K_vortmin2;

py_Kprom=(py_K_vortmax+py_K_vortmin)/2;

save('py_Kprom.mat', 'py_Kprom')

%Grafica Diametro de vortice

for ii=1:im
figure(2)
```

```

hold on
plot(py_Kprom(ii,:),D0,Dv(ii,)/D0,
'ko','markersize',6)
plot(py_Kprom(ii,:),D0,Dv(ii,)/D0,
'k+','markersize',5)
xlabel('y / D_0','fontsize',14,'fontweight','b')
ylabel('D_v / D_0','fontsize',14,'fontweight','b')
set(gca,'fontsize',12)
axis([0 3.2 1.4 3.3])
end

py_K_trasla0=zeros(im,1);
py_K_trasla=zeros(im,1);
py_K_trasla1=zeros(im,1);

time=0.04; %[seg] %
desp=4;

%velocidad de piston
Up=94.89; %[mm/seg] %
treal=time*desp;

f1000=1000;

%velocidad de traslacion
for ii=1:im-20
py_K_trasla0(ii,:)=-py_Kprom(ii+4,)+py_Kprom(ii,);
py_K_trasla(ii,)=py_K_trasla0(ii,)*f1000;
py_K_trasla1(ii,)=py_K_trasla(ii,)/treal;
end

vy=py_K_trasla1/Up;

%Grafica vel traslacion

for ii=1:im
figure(3)
hold on
plot(py_Kprom(ii,)/D0,vy(ii,)) ,

```

```
'ko', 'markersize', 6)
plot(py_Kprom(ii,:), D0, vy(ii,:),
'k+', 'markersize', 5)
xlabel('y / D_0', 'fontsize', 14, 'fontweight', 'b')
ylabel('U_v / U_p', 'fontsize', 14, 'fontweight', 'b')
set(gca, 'fontsize', 12)
axis([0 3.2 0 0.7])
end
```

B.7. Circulación

```
clear all

%ruta de archivos .mat
ruta='C:\Users\Usuario\Desktop\FABIAN_plif\';

%cargar archivos
archivomatrixvectorx=[ruta 'matrixvectorx.mat'];
archivomatrixvector=[ruta 'matrixvector.mat'];
archivopxtrasla=[ruta 'pxtrasla.mat'];
archivopytrasla=[ruta 'pytrasla.mat'];
archivovorticy=[ruta 'vorticy.mat'];
archivokabs=[ruta 'Kabs.mat'];
archivoq=[ruta 'quo.mat'];
archivopykprom=[ruta 'py_Kprom.mat'];
load(archivomatrixvectorx);
load(archivomatrixvector);
load(archivopxtrasla);
load(archivopytrasla);
load(archivovorticy);
load(archivokabs);
load(archivoq);
load(archivopykprom);

[yval, xval, im]=size(Kabs);
```

```

D0=19.4;%[mm]
Up=94.89;%[mm/seg]%
UpD0=Up*D0;

cir=zeros(yval,xval,im);
cir01=zeros(im,1);

circFinal=zeros(im,1);

%circulacion

for ii=1:im
    for m=1:yval
        for n=1:xval
            if quo(m,n,ii)>0.01 && pxtrasla(m,n)<0
                cir(m,n,ii)=vorticy(m,n,ii);
            else
                cir(m,n,ii)=0;
            end
        end
        cir01(ii,:)=sum(sum(cir(:,:,ii)));
        circFinal(ii,:)=cir01(ii,:)/UpD0;
    end
end
end

d0=0.0194
%Graficar circulacion
for ii=:im
    figure(4)
    hold on
    plot(py_Kprom(ii,:)/d0,circFinal(ii,:),
        'ko','markersize',6)
    plot(py_Kprom(ii,:)/d0,circFinal(ii,:),
        'k+','markersize',5)
    xlabel('y / D_0','fontsize',14,'b')
    ylabel('\Gamma_max / D_0*U_p','fontsize',14,'fontweight','b')
    set(gca,'fontsize',12)
    axis([0 3.2 0 0.9])
end

```

B.8. R^2 , error de calibración e incertidumbres

```
clear all

%ruta de archivos .mat
ruta='C:\Users\Usuario\Desktop\FABIAN_plif\';

%cargar archivos
archivomatincert=[ruta 'incertidum.mat'];
archivopxxd=[ruta 'pxadim.mat'];
archivopyyd=[ruta 'pyadim.mat'];
archivoords=[ruta 'ords.mat'];
archivopens=[ruta 'pends.mat'];
archivoxdata=[ruta 'xdata.mat'];
archivoydata=[ruta 'ydata.mat'];

load(archivomatincert);
load(archivopxxd);
load(archivopyyd);
load(archivoords);
load(archivopens);
load(archivoxdata);
load(archivoydata);

[yvaln , xvaln , imval]=size(matriztemp2);

%incertidum(:, :, 1)= imagen sin reflejo
%incertidum(:, :, 2)= imagen con reflejo

[yi , xi , imi]=size(incertidum);

I= (incertidum(:, :, 1) - mincertidum(:, :, 2))
./ mincertidum(:, :, 2)

Iporcent=I*100
```

```
%Graficar Incertudumbres
figure(5)
meshz(pxadim, pyadim, Ipercent)
box off
grid on
axis([-4 1 0 3 0 85])
hidden on
colormap(hot)
xlabel('x / D_0', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b')
ylabel('y / D_0', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b')
zlabel('I(%)', 'fontsize', 16)
set(gca, 'fontsize', 16)
set(gca, 'YDir', 'reverse')
```

```
%Coeficiente de determinacion
```

```
yfit0=zeros(yvaln, xvaln);
yfit=zeros(yvaln, xvaln);
yresid=zeros(yvaln, xvaln);
SSresid=zeros(yvaln, xvaln);
SStotal=zeros(yvaln, xvaln);
rsq=zeros(yvaln, xvaln);

for m=1:yvaln
    for n=1:xvaln
        yfit=polyval(p, xdata);
        yfit(m,n)=xdata*(pends(m,n));
        yfit(m,n)=yfit0(m,n)+ords(m,n);
        yresid(m,n)=ydata-0;
        SSresid(m,n)=sum(yresid(m,n).^2);
        SStotal(m,n)=(length(ydata)-1) * var(ydata);
        rsq = 1 - SSresid(m,n)/(SStotal(m,n));
    end
end
end
```

```
%Graficar R2
figure(6)
meshz(pxadim, pyadim, rsq)
```

```
box off
grid on
axis([-4 1 0 3 0 1])
hidden on
colormap(Autumn)
xlabel('x / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
ylabel('y / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
zlabel('R^2','fontsize',16)
set(gca,'fontsize',16)
set(gca,'YDir','reverse')

%Error de calibracion

ErrC=(1-rsq)*100;

%Graficar Error de calibracion
figure(7)
meshz(pxadim,pyadim,rsq)
box off
grid on
axis([-4 1 0 3 0 65])
hidden on
colormap(copper)
xlabel('x / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
ylabel('y / D_0','fontsize',16,'fontweight','b')
zlabel('R^2','fontsize',16)
set(gca,'fontsize',16)
set(gca,'YDir','reverse')
```