



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Grado en Ingeniería Mecánica

Julio 2016

**Desarrollo de un sistema PIV (velocímetro
por imagen de partículas) didáctico**

Alumno: Antonio José Pérez Vidal

Tutores: Miguel Ardid Ramírez y Jaime Riera Guasp

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis tutores Miguel Ardid Ramírez y Jaime Riera Guasp por darme la oportunidad de realizar este Trabajo Fin de Grado, haciéndome pensar y razonar, teniendo la paciencia y ayudándome a conseguir los objetivos propuestos.

Un agradecimiento especial a José Luís Martín García Técnico del laboratorio de Física Aplicada por haberme escuchado y ayudado en todo momento. Su apoyo ha sido fundamental para la realización del presente Trabajo de Fin de Grado.

Por último, agradecer a la Universitat Politècnica de València y en especial a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño por haberme dado la oportunidad de poder formarme y realizar mis estudios de Grado en Ingeniería Mecánica con ellos.

Resumen

La velocimetría por imágenes de partículas (PIV) es una técnica en auge en los laboratorios de Física Aplicada y Mecánica de Fluidos. Gracias a su sistema permite obtener un campo de velocidades de un fluido, ya sea líquido, gaseoso o flujo multifase, con una gran precisión. En este proyecto se abordan las características de este sistema y se implementa uno propio para el uso docente del centro. Se muestran resultados y diseños del sistema además de algunos análisis de los campos de velocidades obtenidos mediante esta técnica en el laboratorio.

Abstract

Particle Image Velocimetry (PIV) is a rising technique in laboratories of Applied Physics and Fluid Mechanics. This system allows to obtain a very accurately velocity field of a specific fluid, either liquid, gas or even multiphase flow. This project presents the features of this system and an implementation of it for teaching. The system design and development are shown and some analyses of the velocity field with this system are presented as well.



ÍNDICE

Índice de figuras.....	8
Índice de tablas	10
1. CONSIDERACIONES PREVIAS	11
1.1. Introducción.....	11
1.2. Objetivo	12
1.3. Antecedentes.....	13
1.4. Limitaciones	13
2. TÉCNICA DE LA VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS (PIV).....	14
2.1. Sistema PIV.....	14
2.2. Componentes básicos	15
2.2.1. Partículas trazadoras.....	16
2.2.1.1. Propiedades fluido mecánicas	16
2.2.1.2. Tipos de partículas	19
2.2.1.3. Dispersión de la luz láser	21
2.2.2. Iluminación	22
2.2.2.1. Tipos de sistemas de iluminación.....	22
2.2.3. Óptica	25
2.2.3.1. Tipos de lentes y combinaciones.....	25
2.2.4. Sistema de registro	30
2.2.4.1. Óptica del registro	30
2.2.4.2. Tipos de sistemas de registro	32
2.3. Procesado de imágenes	35
2.3.1. Correlación cruzada	36
2.3.2. Auto-correlación	37
2.4. Post-procesado	38
3. SISTEMA PIV DOCENTE	39
3.1. Introducción al experimento	39
3.2. Instalación	40
3.2.1. Recipiente del flujo.....	40
3.2.2. Bomba.....	41



3.2.3. Láser y óptica.....	43
3.2.4. Cámara de alta velocidad.....	44
3.2.5. Partículas trazadoras	47
3.3. Procedimiento experimental	48
3.3.1. Iluminación	49
3.3.2. Administración de partículas	50
3.3.3. Registro de imágenes.....	51
3.3.3.1. Velocidad de grabación.....	51
3.3.3.2. Apertura del obturador	52
3.3.4. Procesado de imágenes.....	55
4.3.4.1. Base derivada	55
4.3.4.2. Base espacial	56
4.3.4.2.1. Discretización de la imagen patrón	56
4.3.4.2.2. Búsqueda de la ventana en la imagen.....	57
4.3.4.2.3. Obtención del campo de desplazamientos en píxeles	58
3.3.5. Software.....	58
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	62
4.1. Calibrado del tamaño de ventana	62
4.2. Análisis y resultados.....	64
5. CONCLUSIONES	68
6. BIBLIOGRAFÍA	69
7. ANEXOS.....	71
7.1. Anexo 1. Especificaciones técnicas de la bomba.....	71
7.2. Anexo 2. Especificaciones técnicas de la cámara de alta velocidad.....	72
7.3. Anexo 3. Especificaciones técnicas de la lente LM12HC	73
7.4. Anexo 4. Especificaciones técnicas de la lente GMHR412513MCN	74
7.5. Anexo 5. Especificaciones técnicas del láser.....	75
8. PRESUPUESTO DEL PROYECTO	78



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema básico de un sistema PIV (Fuente: http://www.seika-mt.com/product/piv-en/Principle_of_PIV.html)	15
Figura 2: Dispersión de Mie para diferentes tamaños de partículas (Fuente: Flow Measurements, K.D Jensen, Dantec Dynamics Inc)	22
Figura 3: Láser pulsado Nd:YAG con fuente de iluminación verde (Fuente: http://www.directindustry.com/prod/continuum/product-27505-1290451.html)	23
Figura 4: Esquema de un láser básico de iones de Argón (Fuente: http://www.ebme.co.uk/articles/clinical-engineering/59-medical-laser-systems)	24
Figura 5: Diagrama de arreglo de doble luz estroboscópica para PIV (Fuente: https://www.researchgate.net/publication/223323910_Schlieren_PIV_for_turbulent_flows)	24
Figura 6: Diseños de lentes divergentes y convergentes (Fuente: http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo_2_3.htm)	26
Figura 7: Esquema de la formación de un plano láser a partir de un haz (Fuente: https://www.newport.com/beam-shaping-with-cylindrical-lenses)	27
Figura 8: Configuración óptica para generación de plano láser con tres lentes cilíndricas (Fuente: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Markus Raffel)	28
Figura 9: Configuración óptica para generación de plano láser con dos lentes esféricas y una cilíndrica (Fuente: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Markus Raffel)	28
Figura 10: Configuración óptica para generación de plano láser con tres lentes cilíndricas (Fuente: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Markus Raffel)	29
Figura 11: Esquema de un sensor CCD (Fuente: http://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos)	33
Figura 12: Esquema de un sensor CMOS (Fuente: http://www.fotonostra.com/fotografia/sensores.htm)	33
Figura 13: Montaje del recipiente del experimento (Fuente: Autor)	41
Figura 14: Bomba EHEIM vista 1 (Fuente: Autor)	42
Figura 15: Filtro recolector de partículas (Fuente: Autor)	43
Figura 16: Láser monopolso (Fuente: Autor)	43
Figura 17: Cámara de alta velocidad Mikrotron (Fuente: Autor)	45
Figura 18: Cámara vista trasera (Fuente: Autor)	45
Figura 19: Lente LM12HC (Fuente: Autor)	46
Figura 20: Lente GMHR412513MCN (Fuente: Autor)	47
Figura 21: Partículas trazadoras (Fuente: Autor)	47
Figura 22: Montaje experimental (Fuente: Autor)	48
Figura 23: Esquema del montaje experimental (Fuente: Autor)	48



Figura 24: Grabación a 30 fps y tiempo de apertura del obturador de 16600 μ s y a 500 fps y 1994 μ s (Fuente: Autor)	53
Figura 25: Ventanas de división (Fuente: Autor).....	56
Figura 26: Software de correlación: Selección de fotogramas (Fuente: Autor)...	59
Figura 27: Software de correlación: Delimitación de la región de estudio (Fuente: Autor).....	60
Figura 28: Software de correlación: Resultados (Fuente: Autor).....	61
Figura 29: Componente horizontal del campo escalar con 50 ventanas (Fuente: Autor).....	62
Figura 30: Componente horizontal del campo escalar con 25 ventanas (Fuente: Autor).....	63
Figura 31: Componente horizontal del campo escalar con 6 ventanas (Fuente: Autor).....	64
Figura 32: Campo vectorial de velocidades (Fuente: Autor)	65
Figura 33: Campo escalar de velocidades (Fuente: Autor)	65
Figura 34: Componente horizontal del campo escalar (Fuente: Autor)	66
Figura 35: Componente vertical del campo escalar (Fuente: Autor)	66



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Materiales para partículas trazadoras en flujos líquidos	19
Tabla 2: Materiales para partículas trazadoras en flujos gaseosos	20
Tabla 3: Propiedades de un sistema de láser Nd:YAG para PIV	23
Tabla 4: Comparación de especificaciones entre los sensores CCD y CMOS	35
Tabla 5: Especificaciones de la bomba Compact + 50000 EHEIM	42
Tabla 6: Especificaciones técnicas de la cámara de alta velocidad CMOS Mikrotron Eo Sens	44
Tabla 7: Comparación técnica entre lentes Kowa y Goyo optical	46



1. CONSIDERACIONES PREVIAS

1.1. Introducción

El estudio de los flujos y fluidos resulta complicado ya que sus magnitudes son difíciles de controlar. Éstas influyen de diferentes formas en cualquier cuerpo al que afecte de algún modo el flujo, por lo que su estudio resulta muy interesante a la par que útil para muchas aplicaciones actuales como es la aerodinámica de cuerpos móviles (aviones, automóviles, trenes, etc.), la aerodinámica de cuerpos estáticos (puentes, edificios, etc.), la ingeniería naval, la ingeniería de fluidos, etc. Estas aplicaciones sirven para diseñar y construir cuerpos que puedan moverse a través o encima de un flujo, para mantener la integridad estructural en cuanto a cuerpos estáticos se refiere, investigar y estudiar un fluido concreto (velocidad, fuerzas, composición...), etc.

Las técnicas para poder realizar los estudios de flujos son muy diversas y se han ido desarrollando con las nuevas tecnologías llegando a establecerse sistemas realmente funcionales e importantes. En cuanto a la obtención del gradiente de velocidad dentro de un fluido (ya sea líquido o gaseoso, o incluso un líquido multifase), se encuentran varias técnicas disponibles: anemometría térmica o de hilo caliente, anemometría por láser Doppler, velocimetría global Doppler, anemometría de fase Doppler; todas ellas son técnicas no invasivas por lo que mejoran la calidad del estudio al no haber contacto directo entre los materiales en el momento de la medición.

Una técnica relativamente novedosa, importante y reconocida a día de hoy para el estudio del gradiente de velocidad del flujo de un fluido y en la cual está basado este proyecto, es la Velocimetría por Imágenes de Partículas (Particle Image Velocimetry: PIV). Esta técnica ha demostrado ser muy satisfactoria en cuanto a medidas globales de campos de velocidades con un gran nivel de precisión, y ha resultado ser una técnica de gran ayuda en el estudio de regímenes turbulentos por lo que es aplicable a muchos problemas. Aunque requiere de dominios transparentes o semitransparentes ha obtenido una gran aceptación en la mayoría de los laboratorios.

A pesar de ser una técnica satisfactoria, posee una desventaja importante en cuanto a la transmisión de datos computacionalmente, ya que existe una gran demanda de algoritmos de correlación cruzada que se utilizan para calcular los vectores de velocidad de las partículas contenidas en el flujo estudiado. Este problema contribuyó a que se retrasara el surgimiento de los sistemas en tiempo real aun cuando los inicios de esta técnica datan de 1980.

Además de la técnica principal que se va a estudiar en este proyecto, existen otros sistemas derivados que amplían las posibilidades del estudio, como son el 3D- PIV



(stereoscopic PIV) y la Holografía Digital PIV, con los que se obtienen campos de velocidad del flujo en tres dimensiones en vez de en dos dimensiones como ocurre en el sistema básico.

En este proyecto se propone un diseño elemental del sistema PIV con materiales básicos realizado expresamente para su uso en la docencia de la universidad. Se explicarán todos los aspectos referentes a la técnica, al diseño e interpretación de resultados y se explicará brevemente el código del programa utilizado para la correlación de los vectores. El objetivo de este proyecto es que los alumnos tomen un primer contacto con esta técnica y con los fundamentos y propiedades de los distintos tipos de flujos y de fluidos estudiados en ingeniería y que desarrollen y mejoren su capacidad de investigación y análisis técnico.

1.2. Objetivo

El objetivo de este proyecto es la construcción e implementación de un sistema PIV (Particle Image Velocimetry) para que pueda ser usado en la docencia del centro y que los alumnos entren en contacto con esta técnica que se encuentra en auge en los laboratorios de fluidos. Para ello se va a proceder a estudiar las características necesarias para que, con los materiales básicos en posesión del departamento de Física Aplicada, se pueda llevar a cabo esta técnica para su enseñanza intentando obtener los mejores resultados posibles. Además de la construcción y mejora de los elementos, la parte final de esta técnica depende de un programa de análisis y procesado de datos, el cual ha sido desarrollado por alumnos del centro mediante la herramienta de desarrollo de MATLAB y que con el tiempo también ha de ser renovado para adaptarse a los cambios de estructura y de registro del propio proyecto.

Todo el estudio y análisis de las mejoras del proyecto está enfocado a su uso docente y debe permanecer en constante cambio en pos de su mejora y actualización para que consiga consolidarse en las aulas y en el temario de la docencia referida a Física Aplicada, Mecánica e Ingeniería de Fluidos.



1.3. Antecedentes

Los principales motivos por los que se ha llevado a cabo este proyecto están basados en la intención de enseñar a los alumnos la existencia de la técnica PIV y su importancia a día de hoy en muchos ámbitos técnicos. El proyecto en sí parte de la base realizada por los profesores y alumnos de la asignatura de Métodos Experimentales en la Ingeniería Aeronáutica tanto en estructura como en su programa informático, por lo que en este caso se ha procedido a mejorar estos elementos tanto en estudio y en análisis como en presentación y forma.

1.4. Limitaciones

Este proyecto se lleva a cabo en conjunto con el laboratorio técnico de Física Aplicada, sin embargo, los recursos para la construcción de un sistema PIV son un poco limitados si los comparamos con los sistemas PIV de los laboratorios técnicos. No obstante, la idea de este proyecto es simplemente acercar a los alumnos a la técnica, no utilizarla para casos de necesidad real, por lo que con las herramientas de las que se dispone es más que suficiente para proporcionar un sistema PIV docente para transmitir y enseñar sus propiedades y sus aplicaciones al alumnado.

2. TÉCNICA DE LA VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS (PIV)

En este apartado se va a explicar en qué consiste exactamente la técnica de la velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Además, se va a mostrar un breve resumen del abanico de técnicas del PIV, las cuales también son populares entre los laboratorios de fluidos y que poseen particularidades específicas. En capítulos posteriores se proporcionará un desarrollo más profundo de la técnica concreta utilizada en este proyecto.

2.1. Sistema PIV

La velocimetría por imágenes de partículas (Particle Image Velocimetry, PIV) es una técnica que permite obtener un campo instantáneo de velocidades en un plano del fluido. La técnica básica del PIV consiste normalmente de un conjunto de subsistemas. El propósito final se logra añadiendo unas partículas trazadoras dentro del fluido las cuales adquieren la misma velocidad del flujo en el que se encuentran.

Un láser es previamente configurado y ubicado de modo que en conjunto con una lente y con la estructura del receptáculo en el que se encuentra el fluido, cree una fina lámina de luz en un plano determinado que incida sobre las partículas trazadoras incluidas en el flujo, de este modo iluminándolas.

Se produce entonces una dispersión de la luz del láser por las partículas, la cual es capturada por un sensor CCD o CMOS en uno o varios frames en un intervalo muy corto de tiempo conocido. Se obtienen así dos imágenes en las que se observan dos posiciones de un grupo determinado de partículas y se deduce su velocidad y su vector (de dos componentes) a partir del cociente entre desplazamiento e intervalo de tiempo. Aparte de este método también se puede utilizar una cámara de vídeo con la que se graba una secuencia y más tarde se seleccionan los fotogramas a utilizar para el estudio.

Posteriormente se realiza la evaluación de los fotogramas en un ordenador. Para ello cada fotograma se divide en pequeñas subáreas llamadas “regiones de interrogación” de las cuales se obtiene, de cada una de ellas, el vector de desplazamiento local de las partículas trazadoras mediante métodos estadísticos como son la auto-correlación y la correlación cruzada. Se asume que las regiones de interrogación se mueven homogéneamente entre los dos fotogramas en estudio.

Al emplear la técnica PIV una gran cantidad de datos, se necesita un sistema muy sofisticado de post-procesamiento para poder operar con ellos. Es por ello que cada

día se avanza más en el desarrollo de esta técnica al disponer de ordenadores más veloces y con memorias tan amplias, a la vez que ópticas con resoluciones de hasta 50 megapíxeles y tasas de refrescamiento con magnitudes de miles de fotogramas por segundo. Todo esto ayuda a que tanto el proceso de captación como el procesamiento de imágenes se pueda realizar mucho más rápido y con mejor calidad y menor error que en el pasado.

2.2. Componentes básicos

El sistema PIV está compuesto por varios subsistemas necesarios para su correcta implementación. Si bien los componentes que se van a detallar son principales y básicos para cualquier sistema PIV, éste se puede modificar añadiendo o sustituyendo alguno de los componentes para obtener variantes de la misma técnica y conseguir así diferentes análisis de un mismo flujo, por ejemplo se puede usar un láser pulsado o uno continuo, una cámara CCD o una cámara de vídeo, los medios de procesado como los algoritmos pueden ser distintos para varios sistemas, se pueden usar distintos tipos de partículas trazadoras dependiendo del medio usado, etc.

Principalmente un sistema PIV está integrado por cuatro componentes, a saber, una región transparente o semitransparente que contenga las partículas que serán objeto del estudio, una fuente de luz láser que iluminará una zona concreta de la región antes mencionada, un sistema de captación y almacenamiento con el que se recogerán los fotogramas necesarios para el análisis y un sistema de procesamiento de datos con el que se obtendrán las velocidades de las partículas.

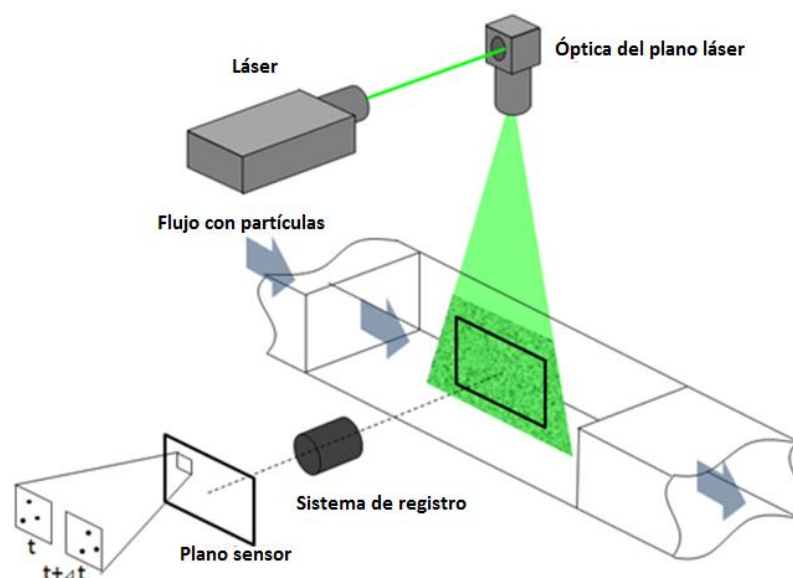


Figura 1: Esquema básico de un sistema PIV (Fuente: http://www.seika-mt.com/product/piv-en/Principle_of_PIV.html)



2.2.1. Partículas trazadoras

La técnica PIV se basa en la obtención directa de dos magnitudes fundamentales de la velocidad, la distancia y el tiempo, por otro lado, el método de medición es indirecto ya que se obtiene las velocidades de las partículas y no las del fluido en sí. Es por ello que se han de explicar e investigar las propiedades fluidomecánicas de las partículas trazadoras con el fin de no cometer errores y evitar divergencias entre fluido y movimiento de partículas.

2.2.1.1. Propiedades fluido mecánicas

A la hora de seleccionar unas partículas trazadoras que servirán para el análisis del fluido, se ha de tener en cuenta tanto sus propiedades como las del fluido. Las partículas han cumplir una serie de requisitos para que la medición pueda llevarse a cabo sin problemas. Las partículas deben poder seguir adecuadamente el flujo del fluido sin excesivo resbalamiento, deben poder dispersar correctamente la luz del láser seleccionado y/o fluorescer, y por último, debe usarse la cantidad de partículas necesaria para poder realizar el correcto análisis del flujo y obtener así buenos resultados.

El primer requerimiento es dependiente tanto de la densidad del material constituyente como del tamaño de las partículas. En la segunda condición influye, además de las partículas, el método de captación de imágenes y la potencia de la iluminación elegida; en el caso de usar partículas con poca dispersión se requerirá un láser con una mayor potencia o sistemas de registro más sensibles o incluso una mayor concentración de partículas, lo que a efectos de presupuesto y de seguridad produce un aumento significativo. En cuanto al tercer requerimiento, para obtener buenos resultados a la hora de la grabación de imágenes se necesita que la cantidad de partículas utilizadas sea uniforme y haya una concentración razonable para que puedan seguir el flujo lo mejor posible.

Para que el seguimiento del flujo sea adecuado las partículas deben tener una densidad lo más cercana posible al fluido sobre el que se va a realizar el estudio. Si se utilizan partículas trazadoras demasiado pequeñas se alcanza un error relativo debido al movimiento Browniano (Robert Brown 1927). Con el fin de realizar una mejor aproximación al error establecemos una relación entre las propiedades coloidales y el coeficiente de difusión coloidal D_i , el cual se basa en la relación entre la agitación térmica y las fuerzas viscosas. Utilizamos la siguiente ecuación para estudiar dicha relación:

$$D_i = \frac{kT}{3\pi\mu d_p} \quad (2.1)$$

donde μ es la viscosidad del fluido, T es la temperatura, d_p el radio de la partícula y k la constante de Boltzmann. Cuanto más largo sea el diámetro, menor importancia tendrá el movimiento Browniano. La desviación estándar de un desplazamiento aleatorio de una partícula viene dada por:

$$\sigma_p = \Delta x_p \approx \sqrt{2D_i \delta t} \quad (2.2)$$

Cuanto más pequeñas sean las partículas, mayor será el desplazamiento aleatorio que sufran y por lo tanto mayor será la tasa de error obtenida. Sin embargo, cuanto más grandes sean las partículas, mayor es la posibilidad de que se produzca su sedimentación en el flujo. Por lo tanto, se debe encontrar un balance en el tamaño de las partículas para que no se alcance ninguno de estos problemas que afectan al estudio del flujo.

En cuanto a la sedimentación, viene dada por la velocidad sedimentación, la cual se alcanza cuando las fuerzas de arrastre viscoso se equiparan al peso de las partículas. Esto se debe en gran parte a la influencia de fuerzas gravitacionales existentes entre la densidad del fluido ρ_f y la densidad de las partículas trazadoras ρ_p si éstas no coinciden. Estas fuerzas gravitacionales producen una velocidad de arrastre U_∞ en dirección de la gravedad. Con esta aclaración, para un estudio estándar, suponemos unas partículas trazadoras esféricas y de un diámetro $d_p \sim 1 \mu m$, que se mueven según la Ley de Stokes, y que por lo tanto se encuentran en un fluido viscoso y en régimen laminar. La velocidad U_∞ por lo tanto se constituye por:

$$U_\infty = \frac{g d_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{18\mu}, \quad (2.3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, d_p (originalmente en la fórmula aparecía como el radio, pero por simplificación de la misma se ha sustituido por el diámetro) y ρ_p son el diámetro y la densidad de las partículas, y μ con ρ_f son la viscosidad y la densidad del fluido respectivamente. Las partículas más adecuadas para el uso de esta técnica serán las que obtengan una velocidad de arrastre U_∞ despreciable comparada con el flujo real existente. Esta velocidad se puede reducir utilizando partículas de densidad parecida a la del fluido, hecho relativamente fácil de conseguir en fluidos líquidos pero complicado en cuanto a fluidos gaseosos o aire se refiere. Además, para velocidades realmente bajas del flujo será preferible

utilizar partículas con una densidad muy parecida a la del fluido para obtener mejores resultados.

Además de la velocidad de arrastre, también se puede obtener una evaluación aproximada del movimiento de las partículas mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dU_p}{dt} = K(U_f - U_p), \quad (2.4)$$

donde U_f y U_p son las velocidades del fluido y de las partículas respectivamente y K es una constante dependiente de las propiedades del fluido y de las partículas:

$$K = \frac{18\mu_f\rho_f}{d_p\rho_p} \quad (2.5)$$

Estableciendo como condición inicial que las partículas se encuentran en reposo, se integra la ecuación 2.2 y se obtiene:

$$U_p = U_f(1 - e^{-Kt}) \quad (2.6)$$

Esta ecuación explica el comportamiento que sufren las partículas trazadoras, las cuales en el momento de ser insertadas en el flujo se encuentran en reposo, es decir con velocidad nula, y por lo tanto una vez insertadas adquieren la velocidad propia del flujo.

En algunos libros de texto en vez de usar la constante K utilizan un tiempo de relajación τ_s que es la inversa de la constante, así que la expresión 2.4 se puede declarar de la siguiente forma:

$$U_p = U_f \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_s}} \right), \quad (2.7)$$

donde τ_s está formado por:

$$\tau_s = \frac{d_p^2\rho_p}{18\mu_f} \quad (2.8)$$

Este tiempo de relajación expresa el tiempo para el cuál la partícula a alcanzado un 63% de la velocidad del flujo. Por consiguiente, cuanto menor sea el diámetro y la densidad de las partículas menor será τ_s . Estas ecuaciones son funcionales en tanto que la aceleración del fluido y el arrastre de Stoke exista, si no fuera este el caso, las ecuaciones del movimiento de las partículas se vuelven mucho más complicadas. Aun así, el tiempo de relajación τ_s continúa siendo una buena medida de la tendencia de las partículas a alcanzar el equilibrio de la velocidad dentro del flujo.

2.2.1.2. Tipos de partículas

En lo que se refiere al uso de agua como fluido principal, los materiales más empleados por su buen funcionamiento a la hora de realizar los experimentos son el poliestireno y/o plásticos. No obstante, un problema importante de utilizar agua como fluido del experimento es que la mayoría de los materiales con gravedad específica cerca de 1 cuentan con un índice de refracción muy similar al del agua por lo que difícilmente serán capaces de realizar una correcta dispersión de la luz láser incidente, aunque se pueden utilizar partículas de materiales recubiertos de materiales fluorescentes como la rodamina o partículas plateadas para una mejor difracción.

En cuanto a líquidos en general se suelen utilizar materiales sólidos como polvos de aluminio, esferas de cristal huecas, PVC, nylon, poliexpan, polietileno y gránulos para revestimiento sintético. También pueden servir materiales líquidos y gaseosos como diferentes tipos de aceite y burbujas de oxígeno. Todos ellos funcionan correctamente como partículas trazadoras dependiendo del tipo de líquido que se use como fluido principal.

Tabla 1: Materiales para partículas trazadoras en flujos líquidos

Estado	Material	Diámetro medio (μm)
Sólido	Poliestireno	10 - 100
	Polvos de aluminio	2 - 7
	Esferas de cristal hueco	10 - 100
	Gránulos para revestimientos sintéticos	10 - 500
Líquido	Aceites varios	50 - 500
Gaseoso	Burbujas de oxígeno	50 - 1000

En fluidos gaseosos se usan distintos tipos de materiales, algunos de ellos son el poliestireno, micro esferas de cristal, alúmina (Al_2O_3), óxido de titanio (TiO_2), dioctil ftalato (líquido aceitoso insoluble en agua), e incluso humo, aunque el material que más éxito tiene entre los laboratorios que usan esta técnica son las gotas de aceite. Al ser muy poco densos los gases, imponen que las partículas deban ser de tamaños muy pequeños, de magnitudes de menos de $1 \mu\text{m}$.

Tabla 2: Materiales para partículas trazadoras en flujos gaseosos

Estado	Material	Diámetro medio (μm)
Sólido	Poliestireno	0.5 – 10
	Alúmina (Al_2O_3)	0.2 – 5
	Óxido de titanio (TiO_2)	0.1 - 5
	Micro esferas de cristal	0.2 - 3
	Micro globos de cristal	30 - 100
	Gránulos para revestimientos sintéticos	10 - 50
	Dioctil ftalato	1 - 10
	Humo	< 1
Líquido	Aceites varios	50 - 500
	Dioctil sebacato	50 - 1000
	Burbujas de jabón rellenas de helio	1000 - 3000

Generalmente las partículas utilizadas en la técnica de PIV suelen ser de tamaños aproximados entre 0.5 y $10 \mu\text{m}$. No se puede calcular exactamente un número general de partículas que se necesitan dentro de un experimento con PIV ya que esto depende de diversos factores como el fluido que se va a estudiar, el tipo de partículas trazadoras o el láser utilizado.

No obstante, después de muchas investigaciones y experimentos se ha llegado a determinar el número mínimo de partículas necesarias para que la técnica pueda funcionar a mayor o menor escala. Este número mínimo se ha establecido en 15 pares de imágenes por ventana de análisis (Keane, 1990), es decir, 15 partículas.



2.2.1.3. Dispersión de la luz láser

En este apartado se explicará el comportamiento dispersor de las partículas trazadoras. Puesto que la calidad de captación de imágenes en la técnica del PIV es directamente proporcional a la intensidad con que las partículas dispersan la luz incidente del láser, es necesario investigar y examinar la dispersión producida por las partículas que se van a utilizar en la técnica para poder obtener los mejores resultados posibles sin recurrir directamente al aumento de la intensidad del láser.

La luz dispersada por las partículas trazadoras es función de la relación del índice de refracción de las partículas con el medio circundante, es decir, el tamaño de las partículas, su forma y su orientación. No obstante, esto no es lo único que afecta a la dispersión de la luz, la polarización de las partículas y el ángulo de observación establecido sobre éstas son propiedades también influyentes en este fenómeno.

Para partículas con un diámetro d_p menor que la longitud de onda λ de la luz incidente del láser, se puede utilizar la teoría de dispersión de Mie. Ésta se caracteriza con el diámetro normalizado q :

$$q = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad (2.9)$$

Cuando q es mucho menor que 1 se utiliza la teoría de Rayleigh, mientras que cuando q es mucho mayor que 1 se usa la ley geométrica. Para esta última disposición se puede observar que la q local máxima aparece en la distribución angular sobre el rango de 0° a 180° .

Generalmente la luz dispersada paraxialmente (de 0° a 180°) de una onda incidente linealmente polarizada, se polariza linealmente en esa misma dirección y la eficiencia de la dispersión es independiente de la polarización, mientras que la eficiencia de la dispersión en la gran mayoría de los otros ángulos de observación depende considerablemente de la polarización de la luz incidente en las partículas.

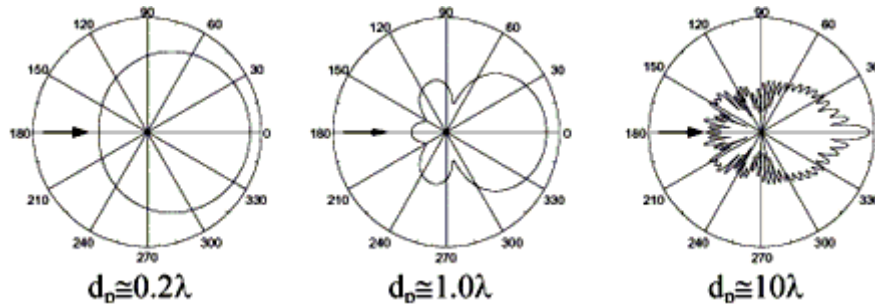


Figura 2: Dispersión de Mie para diferentes tamaños de partículas (Fuente: Flow Measurements, K.D Jensen, Dantec Dynamics Inc)

La técnica PIV utiliza la teoría de Mie ya que se encuentra en un rango intermedio donde q se aproxima a 1. Aquí se encuentra un problema muy típico de esta técnica y que supone una gran desventaja a la hora de realizar el registro del estudio y es que gran parte de la luz se dispersa hacia delante con lo que con la configuración habitual de 90° respecto a la luz incidente del láser se pierde mucha intensidad de la dispersión, por lo que urge el uso de láseres más potentes y por lo tanto el presupuesto del experimento aumenta considerablemente.

2.2.2. Iluminación

En la técnica PIV es necesario tener una iluminación adecuada que produzca una buena dispersión ya que básicamente es lo que se va a registrar para realizar posteriormente el análisis computacional donde se obtendrán los resultados oportunos del estudio. Es por ello que en este apartado se comentará brevemente sobre los tipos de sistemas de iluminación más usados en la técnica PIV.

2.2.2.1. Tipos de sistemas de iluminación

El sistema de iluminación más común en la técnica PIV es el láser. Como bien es sabido, el láser es básicamente un sistema que amplifica la luz mediante emisiones estimuladas de radiación, produciendo así un haz que conserva un tamaño reducido en su paso por el vacío a largas distancias y que puede concentrar dicha emisión en un rango espectral bastante estrecho. Puede ser tanto continuo como pulsado, aunque los más utilizados dentro de la técnica PIV son los segundos. En cuanto a láseres continuos, los más comunes son los de Helio-Neón y los de iones de argón (más potentes que los primeros), ambos con potencias de unos pocos vatios. Dentro de los láseres pulsados, el tipo de láser con mayor éxito en los laboratorios de PIV es el Nd:YAG, el cual puede alcanzar pulsos de entre 100 mJ y 500 mJ con frecuencias de repetición de decenas de Hertzios.

Tabla 3: Propiedades de un sistema de láser Nd:YAG para PIV

Tasa de repetición	10 – 100 Hz
Energía de pulso por cada uno de dos pulsos	150 – 450 mJ
Duración del pulso	3 – 12 ns
Espera entre pulsos	0 – 10 ms
Temperaturas	15 – 35°C
Voltaje requerido	220 – 240 V, 50 Hz
Divergencia	5 mrad
Resolución	5 ps
Desviación de la colinealidad de los haces del láser	< 0.1 mm / m
Diámetro del haz en la salida del láser	9 mm
Refrigeración	10 – 25°C
Estabilidad de energía	< 5 %
Estabilidad de apunte del haz	100 μ rad

La predilección por los láseres pulsados que se observa en la gran mayoría de los laboratorios de PIV radica en la gran capacidad de apoyo que ofrecen éstos a la hora de capturar el movimiento de las partículas. Al poseer un tiempo muy corto de duración de los pulsos, las partículas que traspasan el plano láser creado mediante la óptica en el momento de la captura de imágenes, aparecerán congeladas y con una gran nitidez en los archivos que se obtengan a través del sistema de registro.

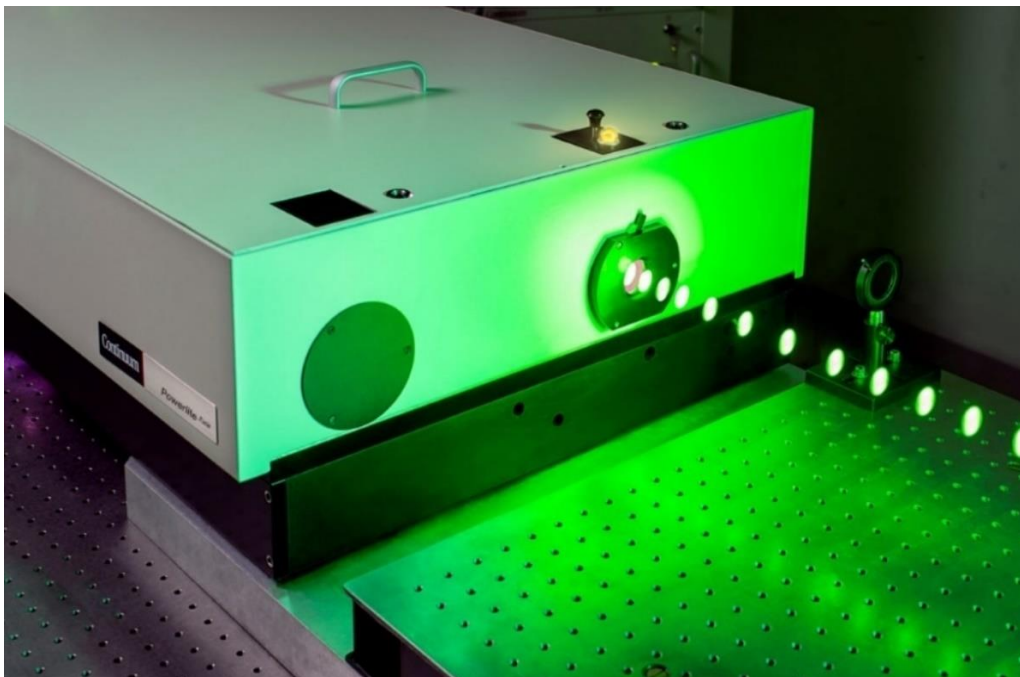


Figura 3: Láser pulsado Nd:YAG con fuente de iluminación verde (Fuente: <http://www.directindustry.com/prod/continuum/product-27505-1290451.html>)

Aunque los láseres pulsados se encuentren en mayor demanda, es cierto que también son más caros que los continuos y la elección final del láser depende exclusivamente del presupuesto que se disponga para desarrollar el estudio oportuno. Es por ello que en ocasiones en las que se pretende realizar un experimento con un bajo presupuesto, no queda más remedio que utilizar componentes de menor calidad. No obstante, aun estando limitado el láser por cuestión económica, es posible efectuar pulsos con un láser continuo realizando cortes en el haz o mediante un ajuste de espejos que deriven la luz al rotar, lo que a su vez produce un plano de luz láser por barrido.

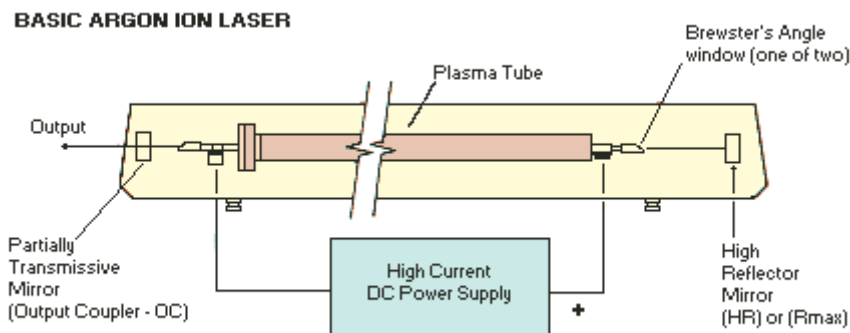


Figura 4: Esquema de un láser básico de iones de Argón (Fuente: <http://www.ebme.co.uk/articles/clinical-engineering/59-medical-laser-systems>)

Además de los dos tipos de láseres mencionados en los apartados anteriores, también existe la posibilidad de utilizar como sistema de iluminación luz blanca. Evidentemente utilizar este tipo de luz conlleva a dificultades a la hora de realizar mediciones, puesto que esta fuente de iluminación está limitada con una extensión finita y además no puede ser colimada tan bien como la luz monocromática de los láseres, por lo que indiscutiblemente posee ciertas desventajas. Sin embargo, el uso de lámparas de Xenón con cámaras CCD resulta en una buena combinación ya que tienen una sensibilidad espectral muy parecida.

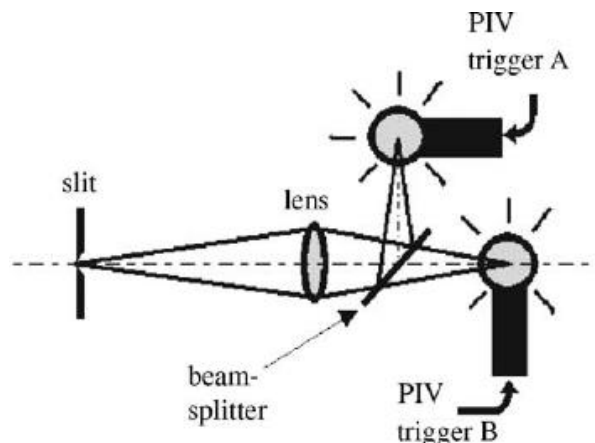


Figura 5: Diagrama de arreglo de doble luz estroboscópica para PIV (Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/223323910> Schlieren PIV for turbulent flows)



Una forma de realizar un experimento utilizando la luz blanca, siempre en términos de PIV, sería colocar dos lámparas flash conectadas entre sí por cables de fibra óptica para poder conseguir dos pulsos separados. Si las salidas de las fibras se realizan en línea, la generación de una lámina de luz se reduce significativamente, ya que no se necesita óptica para abrir ningún haz. Si bien utilizar una fuente de iluminación láser comprende una posición aventajada, la luz blanca además de ser considerablemente más barata, también cuenta con la ventaja de que no se necesitan todos los requerimientos de seguridad que se imponen a los láseres.

2.2.3. Óptica

Hasta ahora hemos estudiado dos componentes principales y muy importantes dentro de la técnica PIV, sin los cuales ésta no se podría realizar, por lo que son realmente esenciales. Sin embargo, existe un componente que quizá no sea tan trascendental como los anteriores ya descritos, pero que aun así, desempeña un papel muy importante dentro del sistema.

La óptica puede estructurarse de muchas formas distintas dependiendo de los requisitos demandados en el experimento a realizar. No obstante, aun siendo viable una infinidad de posibles configuraciones, el objetivo de la óptica siempre es el mismo en todos los casos: abrir el haz del láser y/o dirigir el haz de luz en una dirección concreta, siempre y cuando se use un láser; como ya se ha explicado anteriormente si se emplea luz blanca como principal sistema de iluminación, no tiene sentido el uso de la óptica para abrir el haz de luz puesto que ya se encuentra abierto, aunque sí se podría usar la óptica para dirigir el haz pero esto le restaría bastante intensidad al foco de iluminación, el cual ya está limitado por sí solo.

Una vez esclarecido el objetivo principal para el cual se le va dar uso a la óptica configurada, procedemos a conocer los tipos de óptica que hay dentro de la técnica PIV y su trasfondo teórico-práctico.

2.2.3.1. Tipos de lentes y combinaciones

Básicamente existen dos tipos de lentes que se utilizan en la técnica PIV: las esféricas y las cilíndricas. El uso en conjunto de ambos tipos de lentes o de varias lentes de un tipo (sobre todo las cilíndricas) es una buena opción para conseguir el mejor plano láser posible con la finalidad de obtener mejores resultados en la dispersión de las partículas trazadoras durante el registro de imágenes.

Dentro de los dos tipos de lentes, se encuentran las lentes divergentes, que separan los rayos entre sí, y las convergentes, que los acercan. Su comportamiento depende

de su forma, del material conque están construidas y del medio que las rodea. En general, las convergentes son más gruesas por el centro y las divergentes, por los bordes. Como ejemplo de lentes convergentes cabe citar las lupas y las de los aparatos de proyección y las usadas en la corrección del astigmatismo y la vista cansada, mientras que para la corrección de la miopía se emplean lentes divergentes. Su uso combinado proporciona el plano láser que se necesita en el sistema PIV. En la figura 2.7 se pueden observar distintos diseños de lentes donde hay de ambos tipos:

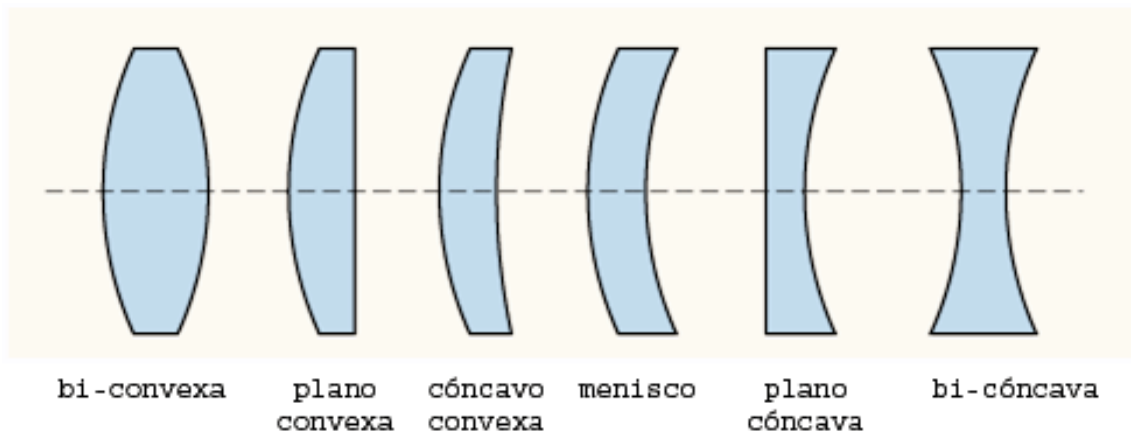


Figura 6: Diseños de lentes divergentes y convergentes (Fuente: http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo2_3.htm)

El uso de lentes cilíndricas es el más extendido entre los laboratorios de PIV ya que proporcionan la ayuda necesaria para la generación de un buen plano láser. Supongamos que disponemos de una lente cilíndrica plano-cóncava. La formación del plano láser vendrá determinada por el radio del láser r_0 , el cuál incide en la lente cuya distancia focal es f . El haz del láser se expandirá con un medio ángulo θ de $\frac{r_0}{f}$ desde su fuente colocada a una distancia f detrás de la lente. En una distancia z más allá de la lente encontraremos una línea con un espesor $2r_0$ (todo esto ignorando la expansión del haz Gaussiano para no entrar en términos más complejos que no son necesarios) y con una longitud de:

$$L = 2 \left(\frac{r_0}{f} \right) (z + f) \quad (2.10)$$

La figura 6 ilustra esta explicación para que la comprensión sea más sencilla (tanto las distancias como el tamaño del haz están exagerados para una mejor visualización):

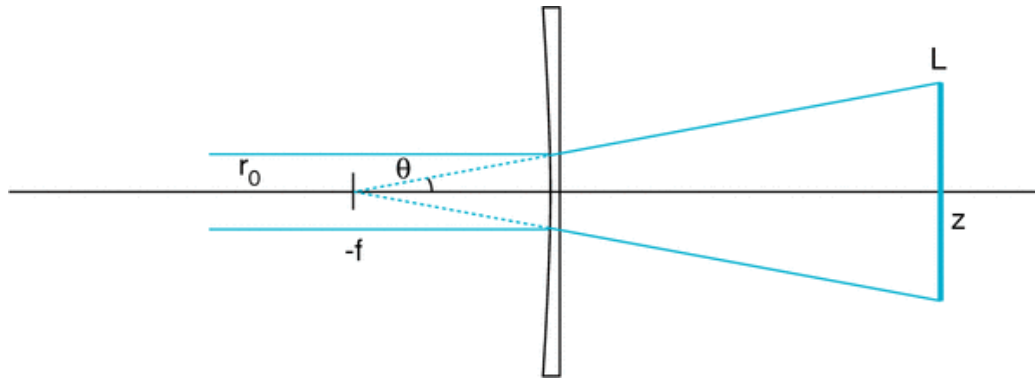


Figura 7: Esquema de la formación de un plano láser a partir de un haz (Fuente: <https://www.newport.com/beam-shaping-with-cylindrical-lenses>)

Naturalmente la combinación de varias lentes vendrá determinada por el tipo de láser que se vaya a utilizar, por ejemplo, si durante un estudio de flujos con PIV se usa un láser de iones de argón es posible utilizar tan sólo una lente cilíndrica para generar un plano láser adecuado para el estudio ya que el láser no dispone de una gran intensidad y si se usaran más lentes perdería gran parte de ella. Por otro lado si se va a utilizar un láser Nd:YAG, conviene realizar una combinación de varias lentes cilíndricas de distinto diseño para poder lograr obtener planos láseres muy delgados y con gran intensidad. Utilizar más de una lente es necesario para enfocar el haz de luz hacia un espesor adecuado, por eso es tan importante emplear combinaciones de varias lentes cuando se dispone de láseres potentes, para poder sacar su máximo partido.

En cuanto a las combinaciones posibles, para esclarecer un poco las posibilidades, a continuación se va describir varios ejemplos extraídos de M. Raffel 1998.

En la siguiente figura se expone una combinación de tres lentes cilíndricas, la primera es una lente divergente, la segunda una lente convergente y la tercera una lente bi-convexa:

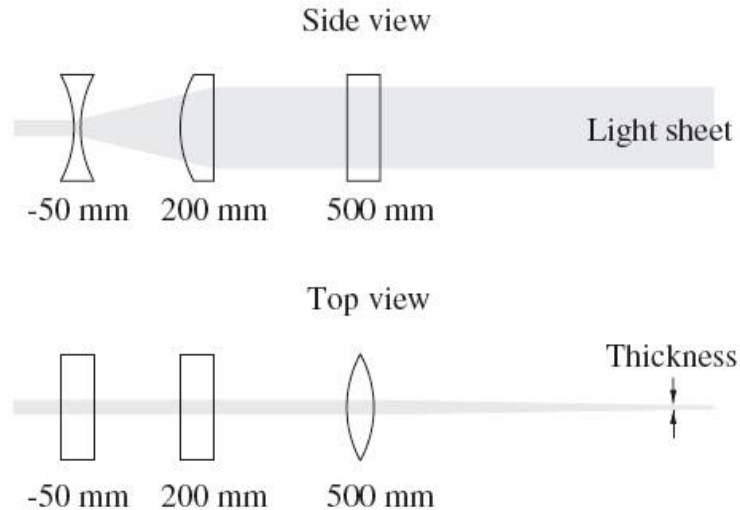


Figura 8: Configuración óptica para generación de plano láser con tres lentes cilíndricas (Fuente: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Markus Raffel)

En esta disposición se coloca una lente divergente en la primera posición debido a que se pretende evitar las líneas focales ya que el aire cercano al punto focal se ionizaría, siempre y cuando se usen láseres potentes. Normalmente las líneas focales no ionizan el aire, pero las partículas de polvo alrededor de la zona pueden quemarse si el área no está bien cubierta o protegida. Estos problemas pueden cambiar las propiedades del haz y estropear el estudio. El mínimo espesor vendrá dado por la divergencia del haz y la distancia focal de la lente bi-cóncava.

En la próxima ilustración se dispone una combinación de tres lentes, dos esféricas a ambos extremos y una lente cilíndrica en el centro:

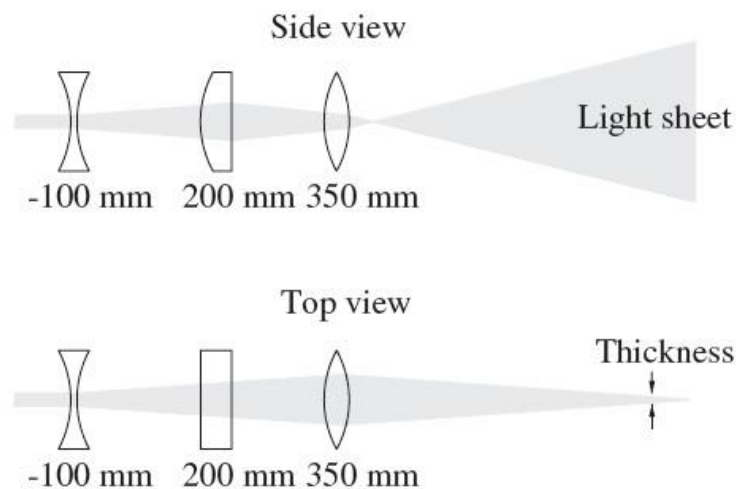


Figura 9: Configuración óptica para generación de plano láser con dos lentes esféricas y una cilíndrica (Fuente: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Markus Raffel)

Esta combinación de ambos tipos de lentes hace que el sistema sea más versátil y puesto que las lentes esféricas son más fáciles de fabricar, es más sencillo obtenerlas y su costo no es tan elevado. La altura del plano láser es controlada por la distancia focal de la lente cilíndrica que se encuentra en el medio. Se podría usar una lente divergente, pero puesto que la distancia focal tiene una extensión relativamente larga, esta configuración puede usarse para láseres pulsados también. El ajuste del espesor se puede realizar fácilmente mediante el cambio de las lentes esféricas entre ellas.

Generalmente el empleo de lentes esféricas no permite que el espesor y altura del plano láser se puedan cambiar independientemente. No obstante esto se puede lograr mediante la siguiente configuración, la cual además, permite la generación de planos láser más pequeños que el diámetro del haz y que por lo tanto son ya delgados justo al pasar por la última lente, lo que proporciona un plano láser que se mantiene constantemente pequeño:

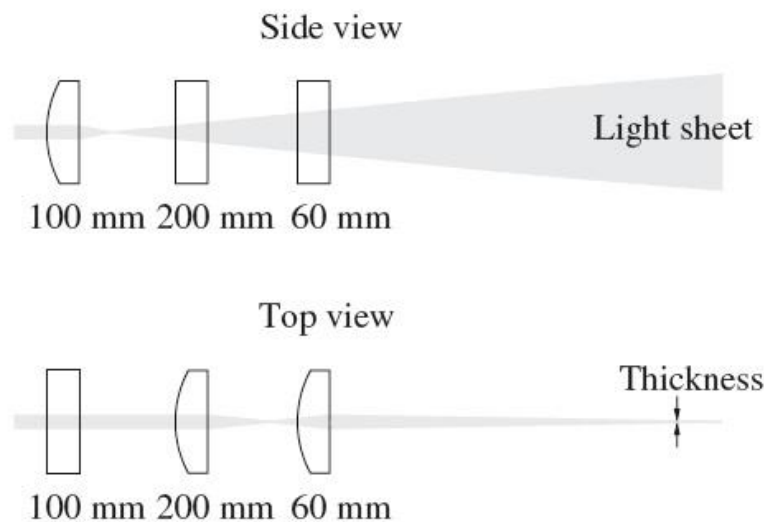


Figura 10: Configuración óptica para generación de plano láser con tres lentes cilíndricas (Fuente: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Markus Raffel)

No obstante la energía por unidad de área de esta configuración es alta, por lo tanto la región crítica que se encuentra cerca de la línea focal debe ser cubierta para evitar riesgos posibles. Esto podría evitarse si se colocara una lente cilíndrica divergente en primer lugar, sin embargo la disposición expuesta tiene la ventaja de que puede realizar el registro de imágenes con el plano láser a una cierta distancia de sistema de captación sin que se alteren sus propiedades.

Estas configuraciones pueden ser usadas para la realización de experimentos con sistemas PIV para mejorar los datos obtenidos durante las mediciones y perfectamente pueden ser variadas para encontrar la disposición que más se adecúe al entorno de trabajo.

2.2.4. Sistema de registro

Para obtener un buen resultado durante un experimento preparado usando el sistema PIV, aparte de disponer de las partículas trazadoras adecuadas al fluido en el que se van a distribuir y una buena iluminación, es necesario configurar un sistema de registro apropiado en conjunto con los materiales que se poseen. El sistema de registro es la parte de la técnica PIV que se encarga de documentar la dispersión de las partículas trazadoras en imágenes, las cuales serán procesadas posteriormente con el programa oportuno.

2.2.4.1. Óptica del registro

Antes de hablar de los tipos de sistema de registro, es conveniente comentar primero la óptica teórica que hay detrás del registro de imágenes, es decir, una breve explicación de cómo se forman y captan las imágenes en el plano del sensor del sistema de registro. El tamaño de la imagen que se forma en la lente del sensor varía del tamaño real de esa imagen capturada, puesto que el sistema de registro se encuentra a una distancia prudente de la zona de acción de las partículas con el plano láser para no interferir y desbaratar así el ensayo. Principalmente existen dos efectos fundamentales que se deben tener en cuenta a la hora de estudiar estas propiedades: el efecto de difracción y el efecto geométrico.

El efecto geométrico está basado en el aumento de la imagen en la lente del sistema de registro, el cual viene dado por M , y que está determinado por las distancias al plano objeto d_o y al plano imagen d_i , por lo que se obtiene:

$$d_o = (1 + M^{-1})f, \quad (2.11)$$

$$d_i = (1 + M)f, \quad (2.12)$$

$$M = \frac{d_i}{d_o}, \quad (2.13)$$

donde f es la distancia focal de la lente. Con esto se obtiene el efecto geométrico que está compuesto por el aumento de la imagen y el diámetro original (en este caso hablamos de las partículas trazadoras, que es lo que se quiere registrar) por lo que se obtiene Md_p . Una vez obtenida la consideración del efecto geométrico no hay que olvidarse del efecto de difracción que es muy importante ya que se da comúnmente en trabajos con capturas de imágenes. Este efecto está determinado por la función de Airy ya que equivale en el plano de imagen a la imagen de un punto en el plano de objetos y el diámetro de su disco es considerado la medida mínima del diámetro de una partícula en el plano imagen. Este diámetro mínimo d_a viene dado por:

$$d_a = 2.44(1 + M) \frac{f}{D} \lambda, \quad (2.14)$$

donde D es la apertura de la lente y λ la longitud de onda del láser. Si combinamos el término geométrico con la consideración del efecto de difracción obtendremos el diámetro efectivo de la imagen de una partícula:

$$d_e = (M^2 d_p^2 + d_a^2)^{-1/2} \quad (2.15)$$

Un último término a tener en cuenta es la profundidad de campo, la cual debe tener un espesor mayor que el plano de imágenes ya que es la región donde las partículas son captadas con un enfoque correcto y por lo tanto si su espesor fuera más pequeño se obtendrían imágenes de partículas completamente desenfocadas. Este espesor de la profundidad de campo δ_z se traduce en:

$$\delta_z = 4(1 + M^{-1})^2 \left(\frac{f}{D}\right)^2 \lambda \quad (2.16)$$

Estos términos mencionados son los que influyen a la hora de registrar las imágenes de la dispersión del plano láser por las partículas trazadoras. Para poder crear un plano láser es necesario usar combinaciones de varios tipos de lentes para abrir el haz y mantenerlo en un plano fino y potente. Este tema lo trataremos en apartados posteriores, donde se comentarán los tipos de lentes y se mostrarán algunos ejemplos de combinaciones posibles con sus ventajas y desventajas.



2.2.4.2. Tipos de sistemas de registro

Una vez vista la parte teórica de la óptica existente en los sistemas de registro en el momento de captar las imágenes necesarias, ya podemos entrar en el ámbito de los tipos de sistemas de registro más comunes que se utilizan hoy en día en los laboratorios para esta técnica.

Al principio el sistema de registro más común era las cámaras fotográficas, lógicamente por otra parte ya que esta técnica está implantada en los laboratorios desde hace más de tres décadas, pero hoy en día ese sistema está obsoleto y ha sido sustituido obviamente por las cámaras digitales. Dentro del gran abanico de posibilidades existentes en cuanto a cámaras digitales se refiere, hay dos tipos concretos que son los que más éxito tienen en los laboratorios de sistemas PIV, las cámaras digitales CCD, las cuales deben su nombre al sensor que llevan incorporado, que en este caso el sensor es un Dispositivo de Carga Acoplada (Charged-Coupled Device); y las cámaras digitales CMOS cuyo sensor es un Semiconductor Complementario de Óxido Metálico (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Ambos tipos de sensores están formados en su esencia por semiconductores de metal-óxido (MOS) y están distribuidos en forma de matriz. Su función es la de acumular una carga eléctrica en cada una de las celdas de esta matriz. Estas celdas constituyen los píxeles. La carga eléctrica almacenada en cada píxel, dependerá en todo momento de la cantidad de luz que incida sobre el mismo, por lo tanto cuanto más luz incida sobre el píxel, mayor será la carga que este adquiera.

El sensor CCD convierte las cargas de las celdas de la matriz en voltajes y entrega una señal analógica en la salida, que será posteriormente digitalizada por la cámara. En el mismo sensor se hace una lectura de cada uno de los valores correspondientes a cada una de las celdas y un convertidor analógico-digital traduce estos valores obtenidos en forma de datos. La estructura interna del sensor es muy simple, pero existe el inconveniente de la necesidad de un chip adicional que se encargue del tratamiento de la información proporcionada por el sensor, lo que se traduce en un gasto mayor y equipos más grandes.

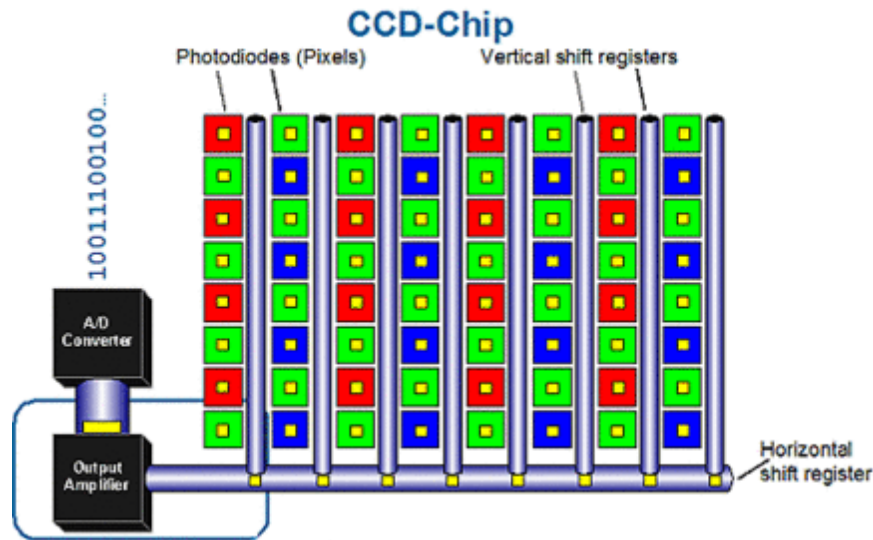


Figura 11: Esquema de un sensor CCD (Fuente: <http://www.xatakafoto.com/cameras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>)

En el caso del CMOS cada celda es independiente. La diferencia principal es que la digitalización de los píxeles se realiza internamente en unos transistores que lleva cada celda, por lo que todo el trabajo se lleva a cabo dentro del sensor y no es necesario un chip externo encargado de esta función. Este modo de efectuar la lectura de la imagen es más flexible, puesto que cada pixel se lee de manera individual. Con esto se consigue reducir costes y obtener equipos más pequeños.

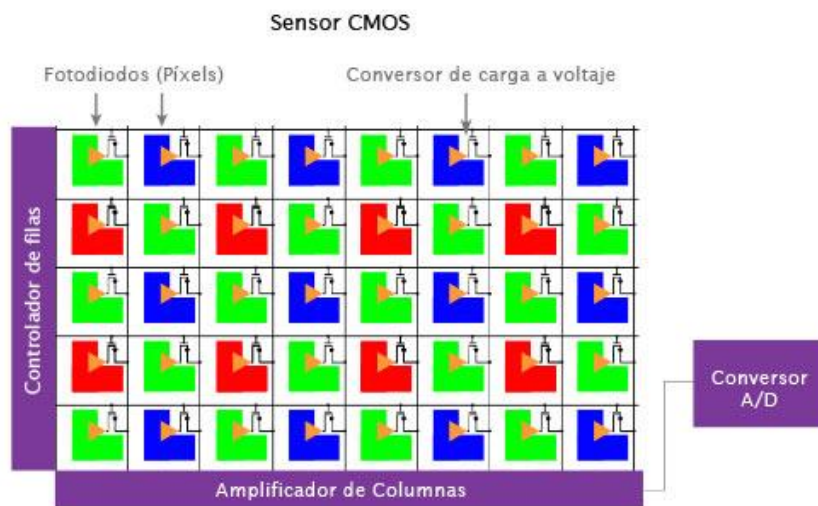


Figura 12: Esquema de un sensor CMOS (Fuente: <http://www.fotonostra.com/fotografia/sensores.htm>)

Además de las diferencias de precio y de funcionamiento interno, existen otros aspectos funcionales en los que también difieren y que son importantes conocer



para poder elegir el equipo que mejor se ajuste al objetivo en que se centra el estudio. Uno de los aspectos en que difieren los sensores es el rango dinámico el cual es el coeficiente entre la saturación de los píxeles y el umbral por debajo del cual no captan señal. En este caso el CCD, al ser menos sensible, los extremos de luz los tolera mucho mejor.

En cuanto al ruido los sensores CCD tienen también un funcionamiento mejor a los sensores CMOS. Esto es debido a que el procesado de la señal se lleva a cabo en un chip externo, el cual puede optimizarse mejor para realizar esta función. En cambio, en el CMOS, al realizarse todo el proceso de la señal dentro del mismo sensor, los resultados serán peores, puesto que disponen de un menor espacio para colocar los foto-diodos encargados de recoger la luz.

Otro aspecto es la respuesta uniforme. Ésta es el resultado que se espera de un píxel sometido al mismo nivel de excitación que los demás, y que éste no presente cambios apreciables en la señal obtenida. En este aspecto, el que un sensor CMOS esté constituido por píxeles individuales, le hace más propenso a sufrir fallos. En el CCD, al ser toda la matriz de píxeles uniforme, tiene un mejor comportamiento. Aún así, la adición de circuitos con realimentación permite subsanar este problema en los CMOS.

Otro aspecto interesante de observar es la responsividad, la cual corresponde al nivel de señal que es capaz de ofrecer el sensor por cada unidad de energía óptica incidente. Puesto que es importante disponer de una responsividad elevada, se necesita que con poca cantidad de luz pueda obtenerse una señal aceptable. Esto supone una ventaja para los sensores CMOS respecto a los sensores CCD y es que son más sensibles a la luz, por lo que en condiciones pobres de iluminación se comportan mucho mejor. Esto se debe principalmente a que los amplificadores de señal se encuentran en la propia celda. Además, el sistema de construcción CMOS permite una alta amplificación con un bajo consumo, mientras que en CCD la amplificación al ser externa al sensor supone un consumo más elevado

En cuanto a la velocidad, el CMOS tiene un funcionamiento mucho más elevado que el CCD debido a que todo el procesado se realiza dentro del propio sensor, ofreciendo mayor velocidad.

Otro aspecto en el que los sensores CMOS tienen una mejor consideración que los CCD es en el blooming. Este fenómeno se produce cuando un píxel se satura por la luz que incide sobre él y a continuación empieza a saturar a los que están a su alrededor. Aunque este defecto puede subsanarse mediante algunos arreglos en la construcción, en el caso de los CMOS no es necesario aplicar medidas especiales ya que no poseen este problema.

Tabla 4: Comparación de especificaciones entre los sensores CCD y CMOS

	CCD	CMOS
Sensor de imagen	1090K color CCD 1/3"	CMOS ¼ MT9V125
Iluminación mínima	0.01 Lux	0.5 Lux
Píxeles efectivos	728x582 Full HD	628x582
Líneas de TV	520	420
Ángulo de visión de las lentes	170°	120 – 150°
Material de las lentes	Vidrio	Plástico
Grado de protección	IP67	IP67
Señal del sistema	NTCS/PAL	NTCS/PAL
Velocidad de disparo	1/50 (PAL), 1/60(NTCS)	1/50 (PAL), 1/60(NTCS)
Voltaje	12V	12V
AGC y BLC	Auto	Auto
Potencia	< 1 W	< 1 W
Temperatura	-30 – 80°	-30 – 80°
Ruido	Moderado	Moderado
Fotografía nocturna	Justo	Bueno
Modo ráfaga	Pobre	Bueno

Aunque existen ciertas diferencias entre los dos tipos de sensores, realmente ambos son buenas opciones en cuanto al trabajo con un sistema PIV se refiere. Actualmente se mantiene una preferencia sobre las cámaras digitales con sensores CCD, sin embargo, los sensores CMOS van adquiriendo mejoras notables en poco tiempo por lo que probablemente acabe por sustituir a los sensores CCD, igual que éstos hicieron con su predecesora la cámara fotográfica.

2.3. Procesado de imágenes

Una vez se han establecido y preparado todos los componentes principales necesarios para llevar a cabo una prueba de campo de la técnica PIV, tan sólo queda llevar a cabo la parte final (y no por ello la menos complicada) de esta técnica. Los datos adquiridos por el sistema de registro deben ser procesados mediante un sistema de procesamiento (el cual normalmente es un ordenador) para así lograr obtener las velocidades de las partículas incluidas en el flujo, así como su dirección y sentido, obteniendo finalmente la velocidad local del propio flujo.

Para llevar a cabo el procesado de imágenes existe un método que comúnmente es el más utilizado para esta técnica, la correlación. Se pueden utilizar dos variantes de este método, la correlación cruzada si el procesado se realiza sobre dos imágenes, o la autocorrelación si el procesado se realiza sobre una.

El método de la correlación es muy práctico en su uso, ya que no se aplica sobre cada partícula una a una para obtener su velocidad propia, cosa que podría considerarse costosa y tediosa por la gran cantidad de partículas que se encuentran en el flujo, si no que funciona comparando el desplazamiento de un grupo de partículas a lo largo del tiempo y obteniendo el vector de desplazamiento de cada grupo. Para ello el fotograma obtenido se divide en diferentes áreas cuadradas llamadas regiones de interrogación, donde en cada una de las cuales se encuentran grupos de partículas que serán estudiados y procesados mediante la función de correlación, uno a uno y secuencialmente.

2.3.1. Correlación cruzada

Este método consiste en registrar de la cámara dos cuadros con imágenes de un pulso (dos imágenes monopulso) asociada a cada uno y cada vez en coordinación con un pulso de láser. Manteniendo cada cuadro así la imagen iluminada por un pulso láser. Para realizar esta operación es necesaria una sincronización entre la cámara y el láser.

La función de correlación aplicada entre dos patrones de intensidad $A(i, j)$ y $B(i, j)$ existentes en las ventanas de análisis 1 y 2, las cuales son la misma ventana de interrogación, pero en distintos instantes de tiempo, se formula de la siguiente manera:

$$R_{AB}(x, y) = \iint_{v_i} A(i, j)B(i + x, j + y) didj \quad (2.17)$$

Y en forma discreta como:

$$R_{AB}(x, y) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} A(i, j)B(i + x, j + y) \quad (2.18)$$

Esta función de correlación es bastante complicada de llevar a cabo en cuanto a cálculo se refiere. Para simplificar el trabajo de cálculo de la función se utiliza el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esto requiere que los patrones sean cuadrados. La operación de correlación se puede expresar entonces del siguiente modo:

$$R_{AB}(x, y) = F^{-1}[F[A(i, j)] F^*[B(i, j)]] \quad (2.19)$$

Este proceso no deja ambigüedades en la dirección del movimiento y permite detectar incluso desplazamientos nulos por no estar presente el pico de auto-correlación. Una ventaja frente a la auto-correlación es la mayor tolerancia a ruidos en la imagen.

2.3.2. Auto-correlación

Este método utilizado para el procesado de imágenes, es una variante particular de la correlación puesto que todo el proceso se realiza en el mismo fotograma. Se puede conseguir esto al dejar abierto el obturador de la cámara cuando se realizan dos pulsos de láser consecutivos. Este método de grabación ese denomina simple-fotograma/doble-pulso.

Teniendo un patrón de intensidades $I(i, j)$, la función de auto-correlación $C(x, y)$ se define en la ventana de interrogación como:

$$C(x, y) = \iint_{v_i} I(i, j)I(i + x, j + y)didj \quad (2.20)$$

Al utilizar la definición en un entorno digital, ésta se transforma en una doble sumatoria discreta. Para calcular la función de auto-correlación para la imagen digital, se puede utilizar la Transformada Rápida de Fourier bidimensional (FFT-2D), siempre y cuando las dimensiones sean las adecuadas. Las dimensiones requeridas son que sea cuadrada y que sus lados una potencia de 2.

La operación de correlación se denota utilizando el símbolo \otimes y la operación de convolución por $*$. Estas dos operaciones se relacionan entre ellas por definición del siguiente modo:

$$C(x, y) = I(i, j) \otimes I(i, j) = I(i, j) * I(-i, -j) \quad (2.21)$$

Denotando $F[]$ a la Transformada de Fourier, por el teorema de convolución:

$$F[C(x, y)] = F[I(i, j)] F^*[I(i, j)] = |F[I(i, j)]|^2 \Rightarrow C(x, y) = F^{-1}[|F[I(i, j)]|^2] \quad (2.22)$$



En un mapa de auto-correlación normalmente aparecen tres picos destacados. Uno en la posición central, el cual se denomina pico de auto-correlación y coincide obviamente con correlacionar un desplazamiento nulo entre los patrones de ese único cuadro. A su alrededor aparecen habitualmente dos picos menores posicionados a la misma distancia del pico central cuyas alturas suelen ser muy parecidas y que reflejan información del verdadero desplazamiento de las partículas. Su generación es completamente lógica debido a la simetría del problema de auto-correlación. Aunque es obvio que no reflejan cuál es el sentido del movimiento, sí que muestran sin embargo la magnitud y la dirección. Esta desventaja puede evitarse si el sentido preferente del flujo del experimento es conocido o utilizando estrategias experimentales. Además de esto, cabe destacar la imposibilidad de medir desplazamientos nulos o muy pequeños por la presencia del pico de auto-correlación que en general tiene el diámetro de la partícula.

En la actualidad se prefiere utilizar el análisis de imágenes por correlación cruzada ya que ofrece ciertas ventajas ante la auto-correlación, como la ausencia del pico de la auto-correlación, la señal del pico de desplazamiento se duplica, la ambigüedad direccional causada por los dos picos simétricos en la auto-correlación desaparece y hay una mejora en la relación señal-ruido.

2.4. Post-procesado

Una vez obtenidos los datos necesarios para la obtención de los desplazamientos de las partículas trazadoras, se calcula dicha velocidad por medio del software de procesamiento utilizado.

Con la velocidad hallada, dependiendo del software usado, se pueden realizar varias acciones como el cálculo de magnitudes derivadas, la sustitución de huecos producidos por un error de análisis, magnitudes estadísticas, etc.

Para poder ver las tendencias del flujo y las magnitudes de las velocidades de las partículas, el software muestra los resultados normalmente mediante mallas de vectores de velocidad.



3. SISTEMA PIV DOCENTE

En base a la técnica PIV anteriormente descrita y estudiada, se ha construido con materiales proporcionados por la universidad, un sistema PIV para usar en la docencia impartida en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño. El objetivo principal de la construcción de este sistema y en el que se basa este proyecto es el acercamiento de los alumnos a esta técnica sin tener que recurrir a construcciones de laboratorio costosas y despertar su interés en la física y la tecnología de los fluidos.

Como ya se ha podido observar, la técnica PIV está compuesta por varios subsistemas necesarios para su funcionamiento. Para construir este sistema PIV docente se ha preferido intentar utilizar materiales baratos y fáciles de obtener. No obstante, algunos elementos como son el láser, las partículas o la bomba que impulsa y origina el movimiento del flujo es completamente necesario obtenerlos mediante su compra ya que no es posible fabricarlos desde cero (esto costaría mucho más), aunque para reducir el gasto del sistema se han buscado dichos componentes a un precio asequible para la calidad que ofrecen, siempre apostando por obtener buenos resultados.

En los subsiguientes apartados se detallarán y se describirán los distintos equipos que componen la instalación experimental del sistema PIV, se describirá el montaje de los diversos elementos necesarios para su funcionamiento correcto y por último se presentará el programa desarrollado para el procesado de las imágenes y se procederá con una breve explicación de su interfaz.

3.1. Introducción al experimento

Antes de poder realizar cualquier medida experimental se procedió con la construcción del sistema. Para ello, la construcción final se implementó sobre una estructura ya desarrollada anteriormente por un grupo de estudiantes del Grado en Ingeniería Aeroespacial. Básicamente la base estaba formada por una bomba que impulsaba el fluido y su recipiente, además de una cámara oscura diseñada a partir de una estructura de cartón para eliminar la luz procedente de la habitación y/o del exterior.

La estructura restante encargada de sujetar el láser y la óptica y además encauzarla hacia el flujo de recipiente fue diseñada y construida mediante un sistema de barras de hierro y enganches propios de cualquier laboratorio y orientada debidamente para el correcto funcionamiento del sistema.



Para el sistema de registro se optó por grabar en video el flujo con una cámara CMOS de alta velocidad. Una vez hecho el video, con el programa pertinente se registran dos fotogramas elegidos por el usuario y se hace la correlación a partir de ellos. Este método es bastante efectivo, obteniéndose buenos resultados, además de que resulta más barato para el presupuesto total, ya que por ejemplo no se necesitan láseres de dos pulsos que son más caros y además no hace falta sincronizar la cámara con el láser con lo que se ahorra tiempo de preparación también.

3.2. Instalación

Como componentes de la instalación del sistema PIV docente, se encuentran:

- Recipiente del flujo
- Bomba
- Láser y óptica
- Cámara de alta velocidad
- Partículas trazadoras

3.2.1. Recipiente del flujo

El recipiente originalmente está formado por 5 planchas de metacrilato que constituyen básicamente el recipiente en sí. Tres planchas son de 20.75 x 153.00 x 0.80 cm y dos son de 20.75 x 11.80 x 0.80 cm con una entrada cilíndrica de 2.80 cm de diámetro situada a 10.25 cm de la base y centrada. Por estos orificios es por donde se colocan los tubos que van conectados a la bomba y por los que pasa el fluido en movimiento. El recipiente no posee una sexta plancha en la parte superior dejando así una abertura por la cual incidirá la luz del láser en las partículas trazadoras. También se añadió un cilindro de metal para observar el flujo a su alrededor. Para evitar acumulación de partículas de polvo u otros materiales, se procede a tapar la abertura superior con una lámina de plástico fino.

Como se puede observar en la siguiente figura la instalación está formada por materiales fácilmente localizables en laboratorios universitarios medianamente especializados.



Figura 13: Montaje del recipiente del experimento (Fuente: Autor)

Además de la estructura principal ya creada, posteriormente se implementó una compuerta de metacrilato que sellaba el paso del fluido por una sección del recipiente. Esto se hizo así para ahorrar en el uso de partículas ya que la zona de estudio se encuentra solamente en una franja reducida del recipiente al principio del mismo. La compuerta tiene unas dimensiones de 8.20 x 20.25 x 0.50 cm, también posee un orificio circular de dimensiones 2.80 cm de diámetro en el cual se encuentra ensamblado el tubo extractor de la bomba. Se añadió además dos pequeños carriles de 1.50 x 20.75 x 0.8 cm a los lados internos del recipiente para una sencilla colocación y extracción de la compuerta. Aún con la intención de reducir la zona de estudio para el ahorro de partículas, el resultado no fue el esperado ya que el flujo no tenía el tiempo de recorrido suficiente para estabilizarse, produciéndose turbulencias en el momento del registro de imágenes, por lo que finalmente fue sustraída

3.2.2. Bomba

La bomba que se utiliza para conseguir el movimiento del flujo pertenece a la marca EHEIM. Concretamente se trata del modelo Compact + 5000. Es una bomba usada principalmente para el bombeo de agua en acuarios, pero para el tipo de fluido y las dimensiones del recipiente que lo va a contener es suficiente. Sus especificaciones técnicas se exponen a continuación:

Tabla 5: Especificaciones de la bomba Compact + 50000 EHEIM

Bomba de alimentación por hora	2500 – 5000 l
Altura de elevación máxima	3 m
Potencia	78 W
Dimensiones	138 x 82 x 126 mm
Manguera \varnothing	26 mm
Frecuencia	50 Hz
Tensión	230 V



Figura 14: Bomba EHEIM vista 1 (Fuente: Autor)

Además del circuito de mangueras que sirve para conectar la bomba con el recipiente, se ha instalado otro circuito alternativo en el que el fluido antes de llegar a la bomba pasa por un filtro para recoger las partículas.



Figura 15: Filtro recolector de partículas (Fuente: Autor)

3.2.3. Láser y óptica

En el experimento se utiliza un puntero láser LED continuo. Este sirve para crear, con la ayuda de la lente, un plano láser por el cual pasará el flujo con las respectivas partículas dopantes y por lo tanto provocará que las partículas sean iluminadas. El láser pertenece a la marca Global Laser, siendo éste el modelo Laserlyte-Flex 635/5. Sus especificaciones técnicas se encuentran en el anexo 5.



Figura 16: Láser monopolso (Fuente: Autor)

En cuanto a la óptica se ha optado una combinación entre una lente plano-cóncava y una lente plano-convexa. La lente previamente abre el haz del láser, el cuál apunta en dirección al espejo, para después ser desviado por el mismo en vertical para dirigir el plano láser hacia el recipiente del experimento. Se probaron combinaciones entre lentes plano-convexas y lentes plano-cóncavas, entre lentes y espejo, incluso lentes solas. Finalmente, los mejores resultados se obtuvieron con la combinación final ya descrita, por lo que se mantuvo así.

Tanto el láser como la lente y el espejo se han estructurado mediante el uso de soportes de barras metálicas. Se han construido dos soportes, uno para el láser y la lente y otro soporte que se encuentra de forma vertical sobre la zona de estudio del recipiente y que sujeta el espejo circular con un ángulo de 45°.

3.2.4. Cámara de alta velocidad

La cámara usada en el experimento es una Mikrotron Eo Sens MC 1362. Es una cámara de alta velocidad con un número elevado de fotogramas por segundo y con un sensor CMOS. Con ella se registra el movimiento de las partículas trazadoras que atraviesan el plano láser pudiendo así establecer una correlación entre los distintos fotogramas y calcular la velocidad del flujo en movimiento. En la tabla siguiente pueden verse las especificaciones concretas:

Tabla 6: Especificaciones técnicas de la cámara de alta velocidad CMOS Mikrotron Eo Sens

Tipo de cámara	Área
Tipo de sensor	CMOS
Tamaño del sensor	1”
Resolución	3 MP
Interfaz	Camera link
Color/Mono	Monocromático
Frames por segundo	> 300
Voltaje	8 – 24 V



Figura 17: Cámara de alta velocidad Mikrotron (Fuente: Autor)



Figura 18: Cámara vista trasera (Fuente: Autor)

Además de la cámara en sí, se usaron dos lentes para aumentar la calidad del registro para poder obtener así mejores resultados. La primera lente es el modelo LM12HC de la empresa Kowa Company Ltd., mientras que la segunda es el modelo GMHR412513MCN perteneciente a la compañía Goyo optical Inc. Sus especificaciones se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 7: Comparación técnica entre lentes Kowa y Goyo optical

	LM12HC	GMHR412513MCN
Distancia focal	12.5 mm	12.5 mm
Rango de iris	F1.4 - 16	F1.3 – 16
Ángulo de vista (H x V)	55.6° x 42.5°	54.5° x 41.9°
Dimensión (D x L)	Ø43 x 52 mm	Ø49 x 57 mm
Peso	150 g	160 g



Figura 19: Lente LM12HC (Fuente: Autor)



Figura 20: Lente GMHR412513MCN (Fuente: Autor)

3.2.5. Partículas trazadoras

Estas partículas se utilizan para conocer la velocidad del flujo. Éstas se adaptan al fluido y reflejan la luz del láser incidente sobre ellas, lo cual es captado por la cámara de alta velocidad. El material del que están hechas es la poliamida y tienen un tamaño de $100\ \mu\text{m}$. Tienen una densidad parecida a la del agua destilada ($0.99\ \text{g}/\text{cm}^3$) lo que es primordial para este experimento.

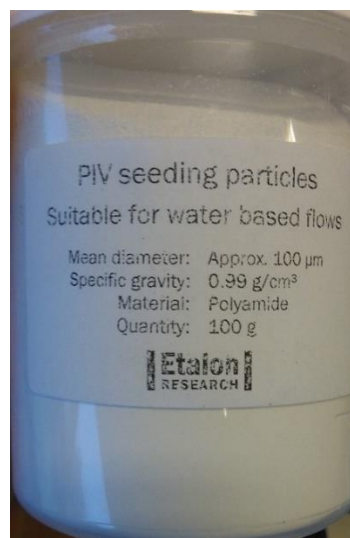


Figura 21: Partículas trazadoras (Fuente: Autor)

3.3. Procedimiento experimental

A continuación, se va a proceder con la descripción del montaje experimental que se ha implementado y el método para poder obtener las imágenes registradas por la cámara de alta velocidad.

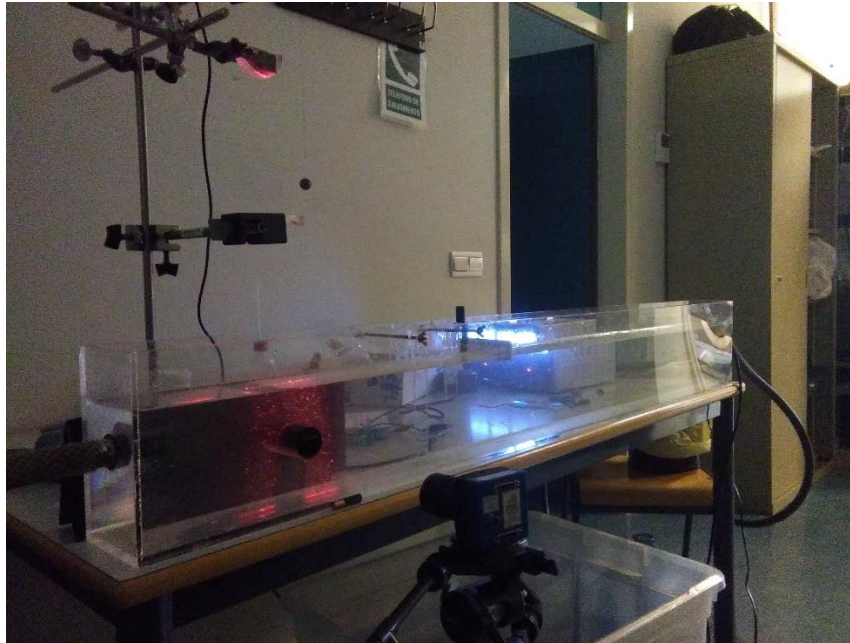


Figura 22: Montaje experimental (Fuente: Autor)

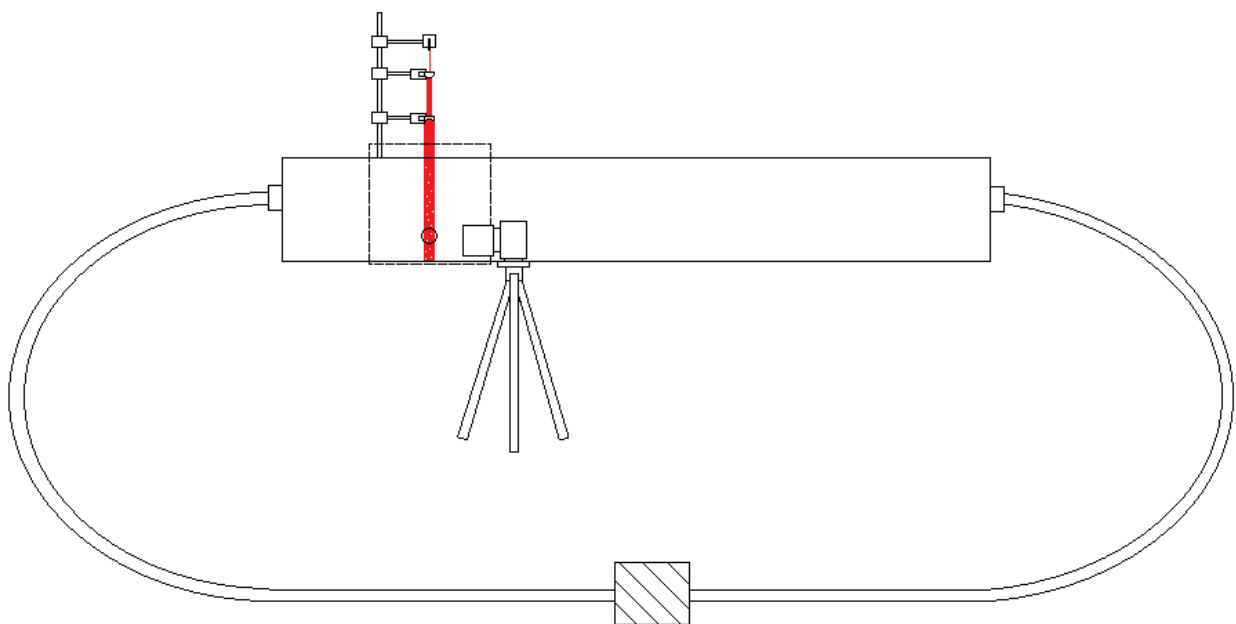


Figura 23: Esquema del montaje experimental (Fuente: Autor)

3.3.1. Iluminación

Para comenzar se coloca en un soporte horizontal el puntero láser junto con la lente plano-cóncava a “” cm del mismo. El soporte se encuentra encima del recipiente, para conseguir así un buen plano láser dentro del mismo.

De este modo se consigue crear una región iluminada mediante un plano que atraviesa la corriente del agua. Esta región consta de cierto espesor, por lo que se recomienda reducirlo haciendo uso de una combinación entre una lente plano-convexa y una lente plano-cóncava, colocada de manera transversal al haz y a la lente anterior. Esto es debido a que la condición de flujo buscada es totalmente bidimensional, por lo que, si el espesor no es lo suficientemente pequeño, se engloba una región prismática en lugar de un solo rectángulo.

No obstante, después de realizar varias pruebas y teniendo en cuenta el escaso número de partículas que pasan por la región de interés, se decidió mantener el espesor transversal original del haz láser y no reducirlo, suponiendo que las partículas que pasan por esta región lo hacen sin velocidad transversal. Al final se debe conseguir un plano de movimiento caracterizado por unas dimensiones de 10x10 cm y 1 mm de espesor.

Por su parte, como la separación entre las lentes y dicha superficie es del orden de una distancia focal de la lente, la separación entre el montaje de las lentes y el plano debe ser tanto mayor cuanto mayor sea la distancia focal (en valor absoluto). Como la lente empleada presenta una distancia focal muy grande, es necesario situarla muy lejos de la zona a medir.

Otro aspecto importante, relacionado con el siguiente apartado es dónde colocar la región de interés a lo largo del conducto de agua. Obviamente, si el flujo fuera ideal, este aspecto no importaría, ya que el flujo estaría desarrollado y las características del mismo no dependerían de la coordenada longitudinal. En cambio, en este caso existe el problema de que las partículas flotan y la bomba genera turbulencias. Por este motivo, si se establece la región de interés hacia el final del conducto, se observa que todas las partículas se hallan ya en la superficie. Por el contrario, si la zona cercana a la boquilla es iluminada, el flujo será muy turbulento, por lo que las partículas no seguirán ningún patrón que permita validar el método PIV. Lo óptimo, por tanto, es escoger una región intermedia cualquiera y buscar un método de inyección que permita que en esta región las partículas no hayan subido ya a la superficie. Además de estas especificaciones, como ya se ha comentado antes se redujo la zona activa del recipiente mediante la instalación de una compuerta para poder así aprovechar mejor el uso de las partículas trazadoras siempre teniendo en cuenta que la zona de iluminación estuviera en un punto intermedio para que las partículas no fueran perturbadas y acortando el recipiente



los justo para que el gasto de partículas no fuera excesivo y que el flujo tuviera tiempo de establecerse y ser uniforme.

3.3.2. Administración de partículas

Una vez estudiado el sistema de iluminación, el siguiente paso es describir el método de inserción de las partículas trazadoras que van a ser iluminadas y registradas. Entre el material dispuesto para realizar el experimento, no se dispone de ningún utensilio o instrumento para este fin.

Básicamente existen dos posibilidades con el material del que se dispone, una es insertar las partículas directamente en la región de interés, la otra es aprovechar la recirculación del fluido para que las partículas recirculen junto con él y así obtengan la misma velocidad y movimiento que éste cuando salgan por la entrada.

La primera posibilidad presenta la ventaja de conseguir un buen número de partículas en la región de interés. Además, como el proceso se lleva a cabo manualmente, se puede propiciar que las partículas atraviesen longitudinalmente esta región y no pasen por los laterales donde no incide el láser.

El principal inconveniente de este método es que se esté perturbando el flujo haciendo que la distribución de velocidades varíe respecto a la de flujo libre. Por tanto, ya no se estará cumpliendo uno de los objetivos propuestos al principio, es decir, comparar los resultados con los correspondientes a un flujo uniforme desarrollado.

Asimismo, estos métodos conllevan un problema no previsto en un primer momento. La experimentación demostró que las partículas tienden a adherirse a los utensilios con los que se inyectaban, de modo que no todas las partículas tomadas del recipiente acababan agregándose al flujo.

Los métodos estudiados en este caso son: inserción de las partículas mediante una cuchara, con lo que se puede controlar mejor la cantidad de partículas a agregar; inyección de las partículas con una jeringuilla mediante una mezcla del fluido con las partículas.

En cuanto a la segunda posibilidad, para evitar perturbar el flujo en la región de medida, se probó a hacer recircular las partículas por el circuito de tuberías. Por tanto, si se colocara la región de interés en la entrada de agua al canal, se tendría un flujo con partículas sin ser perturbado. El principal problema de este método es la turbulencia que aparece en esta región. El agua entra al canal por una pequeña sección, por lo que se debe acoplar al resto del flujo instantáneamente, generando un campo de velocidades que no se conoce teóricamente y que, por lo observado, tiene un alto grado de turbulencia. Estas dos características del flujo hacen que, por un lado, no podamos validar los resultados obtenidos y, por otro lado, que el



flujo no sea bidimensional, y las partículas entren y salgan de la región de medida transversalmente, siendo imposible establecer una correlación.

Finalmente se optó por el método de inyección mediante jeringuilla ya que así se puede conseguir llenar la zona de una gran cantidad de partículas y como el fluido utilizado es agua destilada cuya densidad es parecida a la de las partículas, éstas no flotan a la superficie (al menos no en una gran proporción) y la longitud estimada de la sección del recipiente para trabajar es suficiente para que se establezca el flujo y sea uniforme.

3.3.3. Registro de imágenes

Habiéndose establecido una región de interés, el siguiente paso es la descripción de la toma de imágenes con la cámara de alta velocidad.

En primer lugar, es necesario proporcionar suficiente oscuridad al experimento. Este hecho es vital para obtener un buen contraste entre las partículas, que reflejan la luz láser, y el agua, que no la refleja.

Una vez conseguido esto, la cámara de alta velocidad ha de ser colocada tan cerca como sea posible de la región iluminada. No obstante, no se puede colocar pegada al cristal porque no permite enfocar a una distancia tan pequeña. Por lo tanto, se escoge una distancia aceptable y se ajusta el objetivo para así enfocar bien la región por donde circularán las partículas.

Con el enfoque óptico ya establecido, el siguiente paso es estudiar los parámetros que van a influir en el registro de imágenes mediante la cámara de alta velocidad.

3.3.3.1. Velocidad de grabación

Como ya se ha indicado, el método del PIV consiste en obtener la velocidad de las partículas a partir de dos instantes separados por muy poco tiempo. Este objetivo puede conseguirse de dos formas distintas dependiendo del láser empleado:

➤ Utilizando un láser de doble pulso:

Estos láseres emiten luz a pulsos muy intensos separados del orden de microsegundos de modo que, en una sola instantánea, con el tiempo de



apertura del obturador suficiente, se obtienen dos distribuciones de partículas muy juntas en una sola instantánea. Éste es el método más empleado comercialmente, debido a su fiabilidad y corto espaciado temporal. La velocidad de las partículas se obtendría como la relación entre el incremento espacial de su posición y el intervalo entre pulsos.

➤ Utilizando un láser continuo:

En este caso el láser emite un haz ininterrumpido. Para obtener la velocidad se graba un pequeño vídeo del cual se seleccionan dos fotogramas consecutivos, que pueden estar separados del orden de mili segundos. Por tanto, la velocidad de las partículas se obtiene dividiendo la diferencia de posición entre el tiempo transcurrido entre los fotogramas. Este método presenta la ventaja de requerir láseres de menor potencia.

Este último es el método empleado en este proyecto, debido a que se utiliza una cámara de alta velocidad y el experimento se realiza a bajas velocidades, por lo que no es necesario un láser de doble pulso. Por tanto, será importante tener en cuenta la velocidad de grabación de la cámara, es decir, el número de fotogramas que toma por segundo. Si la velocidad del flujo es elevada y se selecciona un valor pequeño de fotogramas por segundo, como puede ser 100 fps, se obtendrá un vídeo en el que las partículas aparecen y desaparecen, sin poder hacer seguimiento de las mismas. Si por el contrario se realiza el experimento con velocidades bajas, al ser el movimiento lento no es necesario grabar con valores elevados de fotogramas por segundo, siendo suficiente valores entre 60 y 100 fps.

3.3.3.2. Apertura del obturador

El tiempo de apertura del obturador de la cámara de alta velocidad es un factor muy importante y que se debe tener en cuenta como la velocidad de grabación.

Un tiempo alto de apertura asegura que la cámara capta toda la luz del ambiente, ya que abre y cierra el objetivo el tiempo suficiente para que entre toda la iluminación. Por el contrario, un valor muy bajo apenas dejará pasar luz y tan sólo se obtendrá una imagen totalmente negra.

Por este motivo, a priori, puede parecer que un tiempo elevado de apertura será el que mejores resultados proporcionará. En cambio, esta configuración deja entrar

demasiada cantidad de luz, por lo que para el software de correlación resultará más complicado distinguir qué es partícula y qué no lo es.

Hay que reducir este parámetro ya que existe un tiempo intermedio en el que la cámara puede capturar un fondo de luz debido al reflejo de partículas de polvo disueltas en el fluido y que también refleja la luz láser. Este polvo, al tener propiedades distintas que el agua, a diferencia de las partículas trazadoras, no proporcionará resultados válidos, ya que no sigue el flujo del agua. Por suerte, si se reduce lo suficiente el tiempo de apertura este fenómeno consigue evitarse, ya que las partículas trazadoras están diseñadas para que reflejen mucha más luz que el polvo convencional.

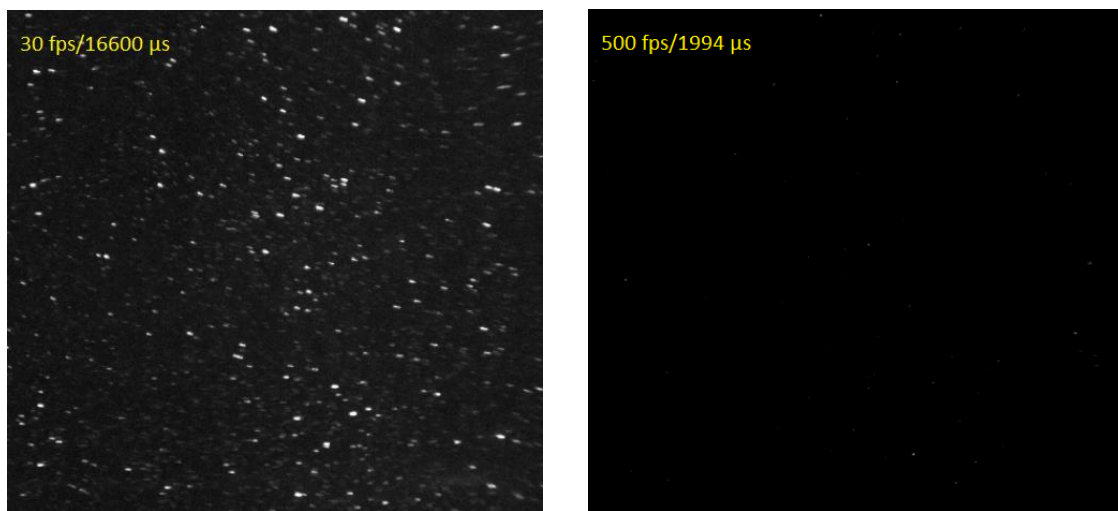


Figura 24: Grabación a 30 fps y tiempo de apertura del obturador de 16600 μ s y a 500 fps y 1994 μ s (Fuente: Autor)

Por tanto, resulta más conveniente reducir el tiempo hasta aquel en el que distinguimos claramente qué es partícula y qué no lo es. No obstante, como todas las partículas no reflejan igual la luz (unas pueden estar en el centro de la luz láser y otras prácticamente en la periferia), al reducir mucho este tiempo estamos perdiendo información, por lo que un valor muy bajo impide conseguir suficientes partículas en la región de interés.

Se puede resumir los inconvenientes que se pueden crear y que hay que evitar a toda costa a la hora de registrar imágenes, tanto con la velocidad de grabación como con la apertura del obturador:

➤ Velocidad de grabación:

- Si es muy baja, las partículas aparecen y desaparecen en dos fotogramas consecutivos, siendo imposible establecer una correlación.



- Si es muy alta, el tiempo de apertura del obturador está limitado a un valor máximo, lo cual hace que no entre suficiente luz y todas las imágenes salgan oscuras. Asimismo, los archivos generados se hacen muy pesados.

➤ Tiempo de apertura del obturador:

- Si es muy alto, deja entrar mucha luz, por lo que no se puede distinguir qué es partícula y qué no.
- Si es muy bajo no deja entrar suficiente luz y no se puede observar nada.

Por lo tanto, se necesita una velocidad de grabación lo suficientemente alta pero con un tiempo de apertura del obturador suficientemente grande para captar los reflejos de las partículas trazadoras. Para establecer la configuración necesaria para que esto se pueda llevar a cabo, se requiere seguir unos pasos concretos.

Primero es necesario calibrar el enfoque de la cámara a la distancia mínima posible de las partículas. Para ello, con una velocidad de grabación baja se abre el obturador el tiempo máximo permitido por la cámara. Entrando toda la luz, la imagen obtenida será como una fotografía normal. Con esto, se va enfocando la región de estudio de las partículas con el dial del objetivo.

El siguiente paso es el de reducir el tiempo de apertura limitando así la luz que capta la cámara. Esto debe realizarse hasta que lo único que se observe en la imagen sean las partículas. Si en ésta existe una diferencia de tamaño y forma entre las partículas significa que se está capturando polvo en la imagen, por lo que se debe continuar disminuyendo el tiempo de apertura para que esto no suceda.

Una vez con el enfoque establecido y seleccionado el tiempo de apertura correcto, ya se puede utilizar una velocidad de grabación alta. Se puede observar que el tiempo de apertura máximo del obturador va disminuyendo, lo cual es lógico, ya que cada vez se toman imágenes con mayor velocidad y no es posible abrir el obturador más tiempo que el que se tarda en tomar una imagen. Con esta observación, se ha de buscar una velocidad de grabación que coincida con el tiempo de apertura que se había seleccionado anteriormente.

Los valores obtenidos son muy sensibles a las condiciones ambientales, la posición de la cámara, la potencia del láser, la velocidad del flujo, etc. por lo que pueden variar incluso a lo largo de una misma sesión de toma de imágenes. En este



experimento se ha utilizado una estructura de cartón y una lona negra opaca para lograr la mayor oscuridad posible. Unos valores orientativos con baja velocidad de flujo son velocidad de grabación de 100 fps y tiempo de apertura de obturador de 9994 μ s.

3.3.4. Procesado de imágenes

Con el vídeo de las partículas trazadoras pasando con la corriente del flujo a través de la zona de interés, tan sólo queda procesar el vídeo para así obtener el campo de velocidades. Para ello se debe proceder al tratamiento de las imágenes mediante dos métodos, la base derivada y la base espacial.

4.3.4.1. Base derivada

Este método consiste en utilizar la definición de velocidad instantánea como base:

$$v = \frac{dx}{dt} \approx \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Este tratamiento será más correcto cuanto más pequeño sea el incremento del tiempo. Es por esto por lo que el incremento espacial ha de ser calculado mediante dos fotogramas que se encuentren en un intervalo de tiempo muy reducido, llegando al orden de milisegundos.

Además de la razón ya explicada anteriormente por la que se deduce que el incremento del tiempo debe ser reducido, existe otra causa más para establecer este criterio. Esta razón es la precisión necesaria en el momento de medir el incremento del espacio. Para esto, los dos fotogramas utilizados deben estar estrechamente correlacionados, lo que significa que deben tener unos patrones de partículas los más parecidos posibles, pero sin llegar a ser iguales para que haya un desplazamiento mínimo y que se eviten indeterminaciones.

Dicho esto, el mejor método para poder conseguir una buena precisión de la velocidad es utilizar una cámara de alta velocidad que sea capaz de obtener fotogramas en intervalos de tiempo muy cortos.

4.3.4.2. Base espacial

La segunda parte del tratamiento de las imágenes consiste en localizar dentro de los mismos fotogramas congregaciones de partículas que formen un conjunto fluido, lo que se traduce en un sistema cerrado en el que ni sale ni entra masa. Se supone pues que este conjunto de partículas experimenta una traslación e incluso una rotación en el período de tiempo que existe entre los dos fotogramas seleccionados, sin embargo, nunca debe sufrir una deformación en su volumen, por lo que es fácilmente identificable en sendos fotogramas.

Para proceder con el análisis se aplica la teoría de la correlación cruzada siguiendo estos cuatro pasos: discretización de la imagen patrón, búsqueda de la ventana en la imagen, obtención del campo de desplazamientos en píxeles.

4.3.4.2.1. Discretización de la imagen patrón

Para comenzar hay que dividir los fotogramas en un número de ventanas determinado en las cuáles se encontrarían los conjuntos de partículas que van a ser correlacionados. Por lo tanto, el número de ventanas a imponer vendrá determinado por estas agrupaciones.

Según la bibliografía, se estima que debe haber entre 20 y 30 partículas por ventana, ocupando de 1,5 a 5 píxeles. Esto conlleva a establecer un tamaño de ventana de 30 x 30 a 100 x 100 píxeles. No obstante, estos ajustes orientativos están basados en un laboratorio especializado de PIV, por lo que en este proyecto no es tan sencillo imponerlos ya que la cantidad de partículas es menor y además tanto el método de registro como las condiciones del entorno no son equiparables y son influyentes a la hora de obtener los fotogramas. Por lo tanto, las dimensiones de las ventanas de análisis dependerán del vídeo obtenido y habrá que escogerlas cuidadosamente para que se ajusten lo mejor posible a las condiciones presentes.

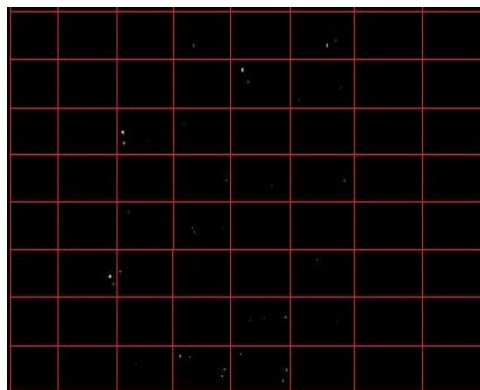


Figura 25: Ventanas de división (Fuente: Autor)

Hay que tener en cuenta que siendo imposible realizar una correlación para partículas individualmente y por lo tanto obteniendo los vectores de velocidad de los grupos de partículas, cuanto más pequeñas sean las ventanas de interrogación, habrá un número mayor de puntos óptimos para obtener su desplazamiento.

No obstante, tanto si se disminuyen como si se aumentan las ventanas se ha de llevar sumo cuidado, puesto que no es bueno ni un exceso ni un defecto. Si se disminuye demasiado la ventana se pueden traspasar partículas de un mismo volumen a otro lo que induciría a un error en la correlación y si se aumenta demasiado la ventana se puede deformar el conjunto en sí ya que existe una mayor diversidad de partículas que podrían tener distintas velocidades, además de que la precisión de la correlación en los resultados sería mucho más baja al correlacionarse menos puntos.

4.3.4.2.2. Búsqueda de la ventana en la imagen

El siguiente paso consiste en localizar las ventanas en los fotogramas. Para ello primero se establece un número concreto de ventanas en las que se va a dividir el fotograma. Una vez seleccionado, se le atribuye a cada ventana una ubicación característica (x_v , y_v) estableciéndose esta en su píxel central.

Una vez establecidas las posiciones de cada ventana, se procede a realizar la búsqueda de todas ellas, una a una, en el segundo fotograma. Esto se realiza mediante la función de correlación normalizada en 2D que se implementa en el entorno de desarrollo de MATLAB usando la rutina interna `normxcorr2`. Esta función puede llegar tomar valores entre -1 y 1, donde 1 es la correlación perfecta. La función de correlación usa la siguiente fórmula:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x-u, y-v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0.5}} \quad (3.2)$$

El resultado será una función de dos variables, puesto que al buscar cada ventana en el segundo fotograma, el programa devuelve un resultado para cada posible posición de la ventana (u , v). Los sumatorios en $t(x, y)$ recorren todos los valores de la ventana, mientras que el sumatorio en $f(x, y)$ recorren todos los colores del fotograma. La función $\bar{f}_{u, v}$ es la media de los valores de la imagen sobre los que se sitúa la ventana para cada posición (u , v).

Con la función de distribución 2D se obtiene una superficie de correlación en la cual el máximo se encuentra en la posición (x_m, y_m) y que establece la posición más probable en la que se encuentra la ventana buscada en el segundo fotograma. Este proceso se repite para cada una de las ventanas que se escojan.

4.3.4.2.3. Obtención del campo de desplazamientos en píxeles

Para obtener el vector desplazamiento de las partículas el paso a seguir es restar las posiciones m y v . Este vector vendrá dado en unidades de píxeles de cada ventana y estará asociado al máximo obtenido en la función de distribución (x_m, y_m) de la ventana.

$$\Delta r = (x_m, y_m) - (x_v, y_v) \quad (3.3)$$

Con esto se obtiene el vector de desplazamiento de una ventana. Repitiendo este proceso para cada ventana resulta en la obtención del campo vectorial. Una vez obtenidos los vectores de desplazamiento, para conseguir los vectores de velocidad tan sólo hay que dividirlos entre el intervalo de tiempo entre cada fotograma aplicando así la definición de velocidad.

3.3.5. Software

El software de procesado ha sido realizado por Carlos Guirado Navarro, alumno del Grado en Ingeniería Aeroespacial de la ETSID, durante la realización de su Trabajo Final de Grado. El programa ha sido realizado en el entorno de desarrollo de MATLAB y se encarga de realizar todos los pasos antes mencionados para obtener el campo de velocidades. La rutina de correlación de MATLAB `corr.m` es la que el programa utiliza para realizar la correlación. El software se divide en tres interfaces, la primera para seleccionar los fotogramas, la segunda para ajustar el área de estudio y la tercera donde aparecen los resultados. Las interfaces son muy simples para facilitar su uso. Los pasos a seguir con el programa son los siguientes:

- 1) Se ejecuta el script `cargarvideopiv.m` para que aparezca la interfaz del programa. Aparece entonces la sección del programa que sirve para cargar el

vídeo y para seleccionar los fotogramas. Esta sección da información acerca del número de fotogramas del vídeo, de su duración, del número de fotogramas por segundo, el nombre del vídeo y el espacio de tiempo entre los fotogramas seleccionados. Se procede entonces del siguiente modo:

- a) Una vez se ha cargado la interfaz, se selecciona el vídeo a analizar mediante la pestaña *Cargar Vídeo*.
- b) Con el vídeo cargado el siguiente paso es seleccionar los dos fotogramas que se van a usar para obtener el campo de velocidades. Para ello se presiona la pestaña *play/pause* y el vídeo se pondrá en marcha. Cuando se haya seleccionado el momento exacto que se quiere analizar se vuelve a presionar la misma pestaña para que se pare el vídeo en el mismo. Se guarda el fotograma concreto mediante la pestaña *Captura 1*.
- c) Para obtener el segundo fotograma, se puede volver a presionar la pestaña *play/pause* dos veces rápidamente para obtener el fotograma en un espacio de tiempo lo más reducido posible o directamente se puede pasar al siguiente fotograma mediante la flecha de dirección de la barra de recorrido del vídeo. Una vez seleccionado el fotograma se guarda mediante la pestaña *Captura 2*.
- d) Para finalizar con esta parte del programa tan sólo hay que presionar el botón de la flecha verde grande para que se cargue la siguiente sección.



Figura 26: Software de correlación: Selección de fotogramas (Fuente: Autor)

- 2) La segunda interfaz del programa está provista de las pestañas de *quitar ruido*, *escala de grises*, e incluso se pueden cargar dos fotogramas que no pertenezcan al vídeo o que se hayan guardado previamente mediante las pestañas *Cargar imagen 1* y *Cargar imagen 2*, con lo que no sería necesario en ese caso pasar por la primera interfaz. Además, muestra los fps, el incremento de tiempo y se puede seleccionar el alto y ancho de la zona que se va a estudiar y el número de ventanas en que se va a dividir. Los pasos a realizar son los siguientes:
- Antes de empezar a recortar la imagen, se debe considerar la existencia de ruido en la misma. En el caso de existir, se debe presionar la pestaña *quitar ruido* para que sea eliminado. En caso contrario este paso se puede obviar.
 - El siguiente paso es delimitar la zona de estudio necesaria. Para ello se debe seleccionar una altura y una anchura para la ventana escribiendo los valores en los recuadros de *ancho* y *alto*. Con el tamaño de ventana establecido, se debe posicionar el recuadro formado justo en la zona deseada, para ello están los recuadros de *xmin* e *ymin*. Una vez ya se ha cercado la zona de estudio se presiona el botón con el dibujo de las tijeras para que se fije.
 - El segundo fotograma debe tener los mismos parámetros de ventana, siempre y cuando el desplazamiento de partículas no sea demasiado elevado. En ese caso se debería mover la zona de estudio la distancia necesaria para que los grupos de partículas se encuentren dentro de la zona delimitada.
 - Por último, se selecciona un valor para el número de ventanas en que se va a dividir la zona de estudio en el recuadro *Número Ventanas* y se presiona el botón de la flecha verde grande para pasar a la siguiente sección.

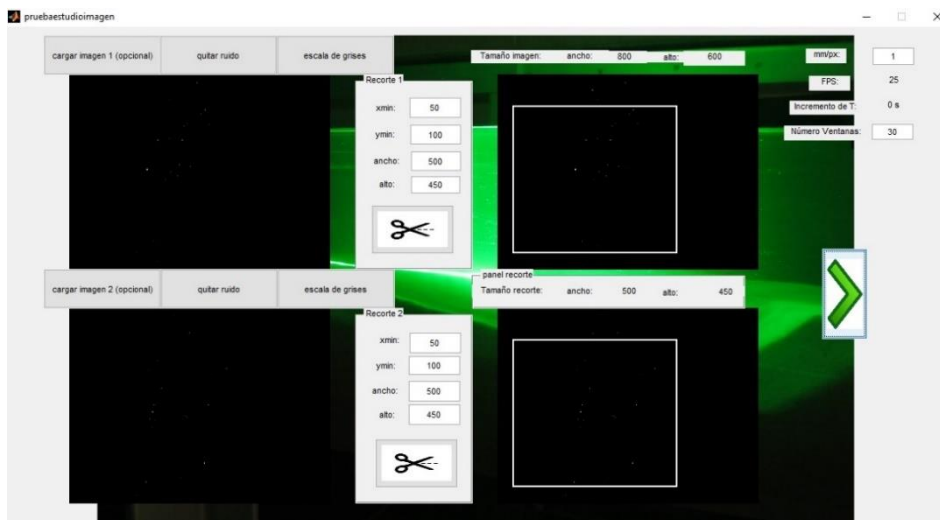


Figura 27: Software de correlación: Delimitación de la región de estudio (Fuente: Autor)

- 3) La última interfaz revela los resultados obtenidos de la correlación. En ella aparecen las siguientes opciones:
- a) Visualizar el campo de vectorial.
 - b) Visualizar el campo escalar de velocidades, en módulo y en dirección horizontal y vertical.
 - c) Mostrar la imagen con el campo, sólo la imagen o sólo el campo.
 - d) Mostrar la imagen en una ventana extra para editar y/o exportar.
 - e) Colocando el ratón encima de un vector aparece su velocidad en un recuadro abajo a la derecha.

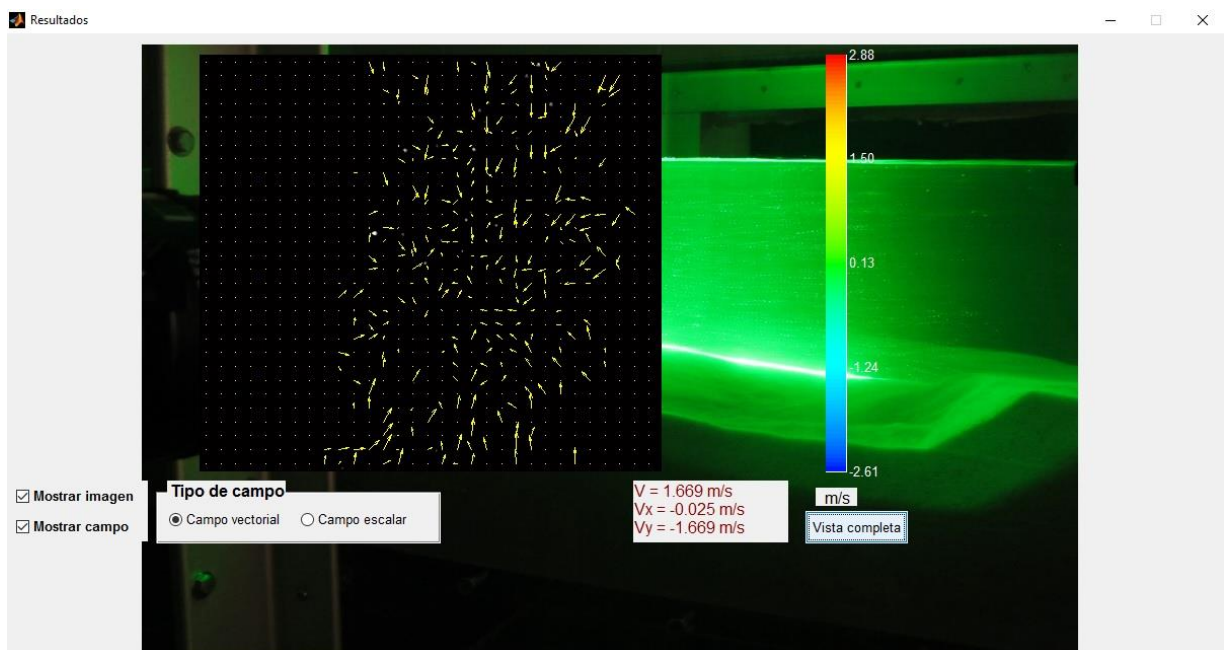


Figura 28: Software de correlación: Resultados (Fuente: Autor)

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este apartado se va a proceder con el análisis de las imágenes capturadas y con la exposición de los resultados obtenidos para una sesión del experimento. Para ello se van a realizar dos análisis concretos: un análisis del tamaño de ventana y un análisis cuantitativo de resultados.

4.1. Calibrado del tamaño de ventana

Para comenzar es necesario establecer un tamaño de ventana óptimo para poder obtener unos resultados coherentes. Para ello se debe analizar los resultados variando el número de ventanas en las que se van a dividir los fotogramas. Como ya se ha mencionado antes, cuantas menos ventanas haya (lo que se traduce en un mayor tamaño de éstas) más probabilidades hay de que se deforme el conjunto de partículas, y cuantas más ventanas haya (menor tamaño de las mismas) más probabilidades hay de que se traspasen los conjuntos de partículas de una ventana a otra.

En la siguiente figura aparece un gran número de ventanas con tamaños muy pequeños, exactamente el número de ventanas es de 50:

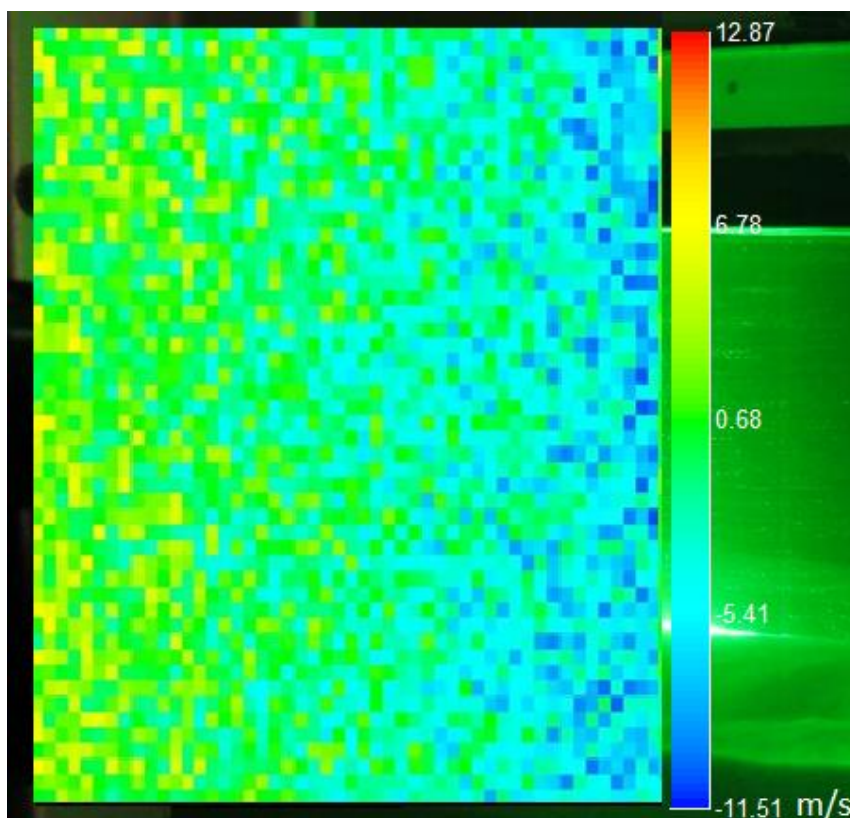


Figura 29: Componente horizontal del campo escalar con 50 ventanas (Fuente: Autor)

La imagen corresponde a la componente horizontal del campo de velocidades. Como puede observarse, hay un gran número de ventanas de color azul, lo que indica una velocidad negativa. Esto se traduce en que las partículas se están moviendo de derecha a izquierda, lo que corresponde con el sentido del flujo. No obstante, la magnitud de las velocidades es del orden de 12 m/s, unos valores demasiado elevados para la capacidad de la bomba, por lo tanto, los resultados en cuanto a magnitud de velocidad no son coherentes.

En la siguiente imagen el número de ventanas es menor, exactamente 25, por lo que tienen un tamaño mayor que la imagen anteriormente mostrada:

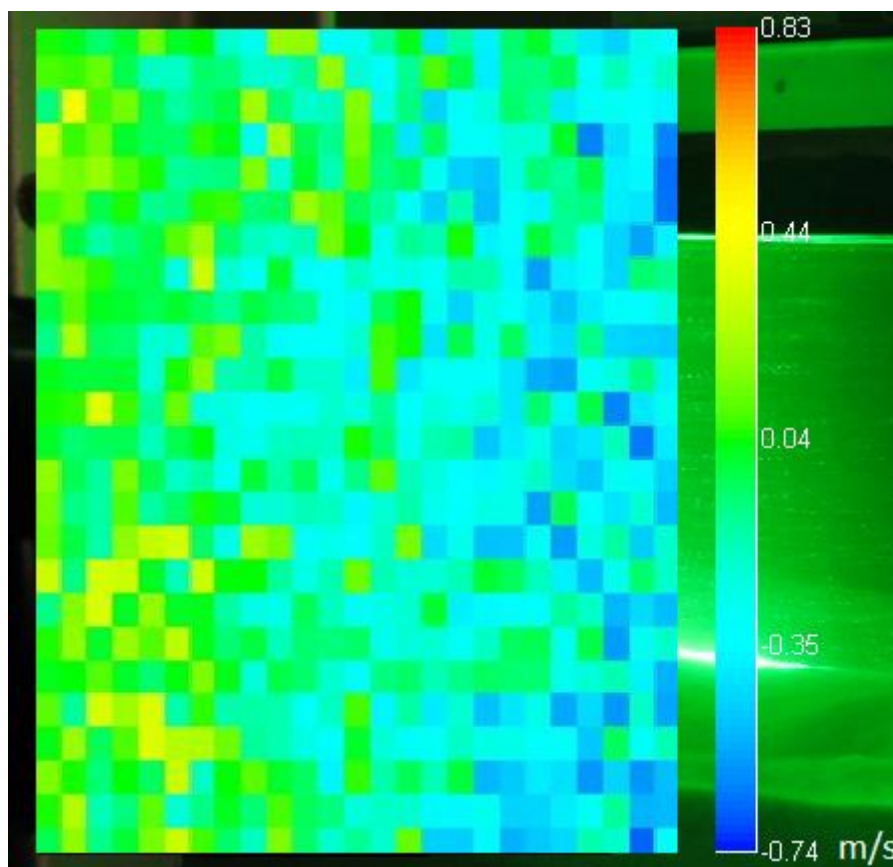


Figura 30: Componente horizontal del campo escalar con 25 ventanas (Fuente: Autor)

Aquí los resultados son mucho más satisfactorios, ya que además de obtener una región uniforme de velocidad, las magnitudes de las velocidades se encuentran entre 0.1 y 0.9 m/s, correspondiendo a una velocidad normal del flujo.

Por último, se procede a tomar una medida con un número de ventanas muy bajo, exactamente 6, provocando un tamaño de ventana demasiado grande:

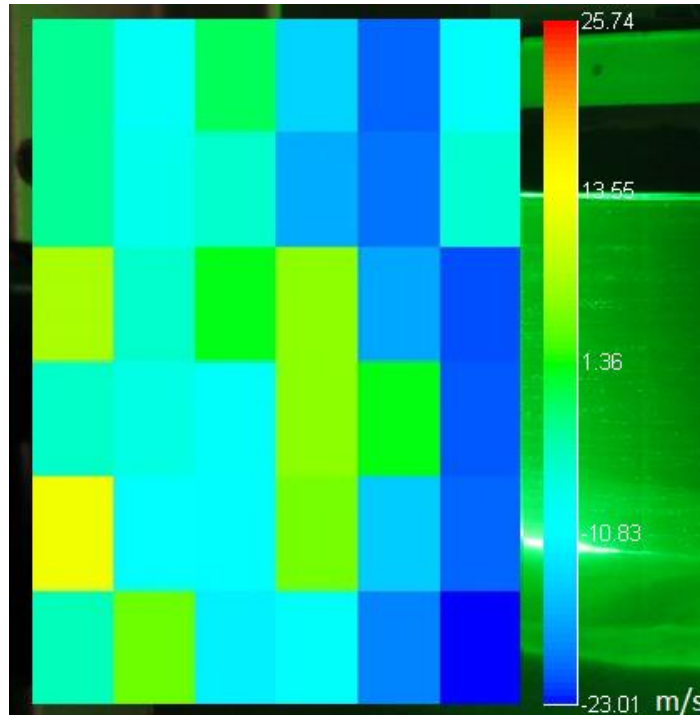


Figura 31: Componente horizontal del campo escalar con 6 ventanas (Fuente: Autor)

Aquí se puede observar que evidentemente, los resultados no son los deseados y es complicado interpretarlos. Con este número de ventanas, se correlacionan pocos puntos y cada ventana parece tener una velocidad completamente distinta.

4.2. Análisis y resultados

Con un número de ventanas de 25, un tiempo entre fotogramas entre 200 y 300 ms, grabando a 60 fps y con una velocidad del flujo entre 0.1 y 0.6 m/s se pueden obtener buenos resultados. Como se puede observar en la siguiente imagen, el tamaño de las flechas de dirección es muy parecido entre las partículas, lo que quiere decir que la gran mayoría tienen magnitudes de velocidad muy similares si no la mismas. El hueco que se observa en el centro de la imagen corresponde al cilindro colocado para observar la progresión de las partículas a su alrededor.

Aunque en la imagen se puede observar que algunas partículas van en sentido contrario, la gran mayoría de las partículas sigue el sentido correcto de derecha a izquierda. Estos desvíos de las partículas se deben a que al acercarse las mismas al cilindro, siguen su superficie tanto por arriba como por abajo con lo que a la izquierda del mismo acaban encontrándose unas con otras formando unas pequeñas turbulencias que hace que algunas partículas cambien de sentido.

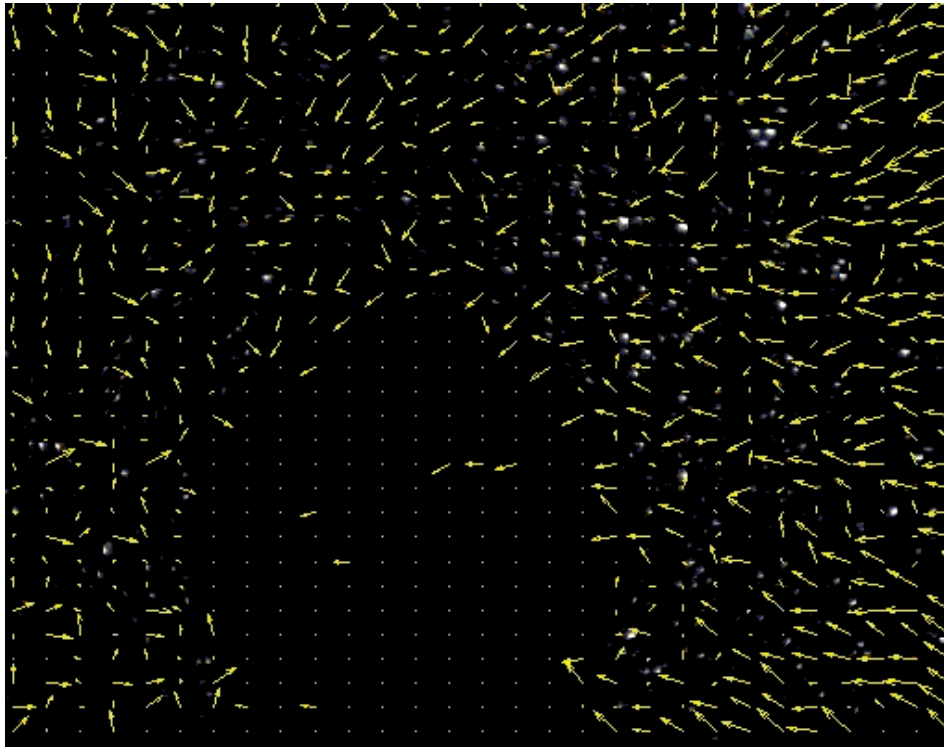


Figura 32: Campo vectorial de velocidades (Fuente: Autor)

Analizando la magnitud del campo escalar se puede reforzar lo ya constatado anteriormente. Las magnitudes son muy parecidas y entran dentro del rango de 0.1 a 0.6 m/s que es el rango de velocidad estimado para el flujo.

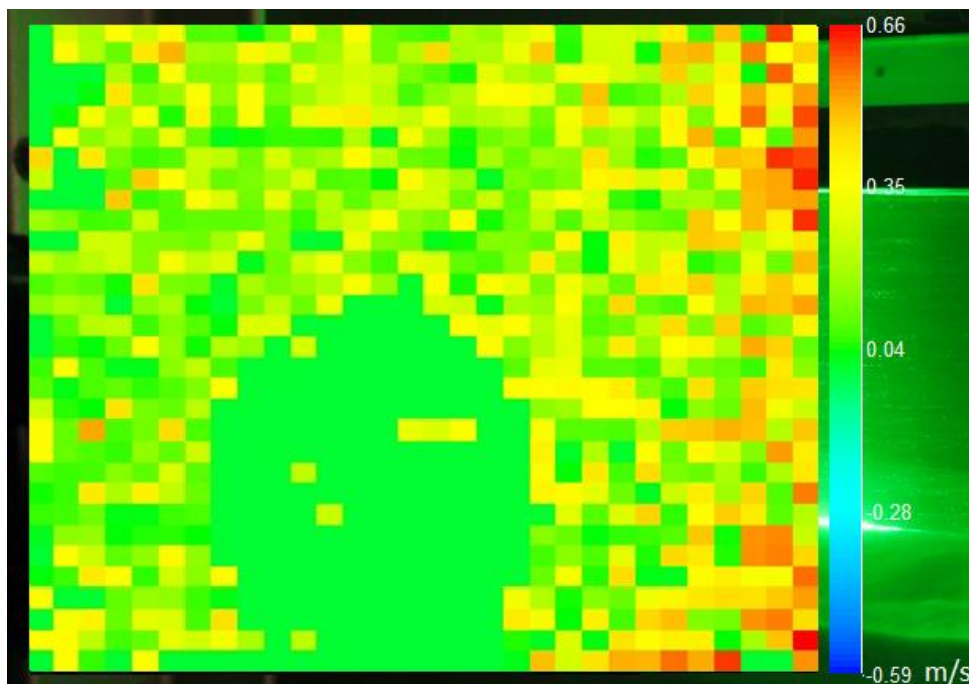


Figura 33: Campo escalar de velocidades (Fuente: Autor)

Si observamos la componente horizontal del campo escalar obtenemos a la derecha de la imagen ventanas coloreadas de azul y a la izquierda de amarillo, por lo que las partículas siguen la dirección correcta del flujo.

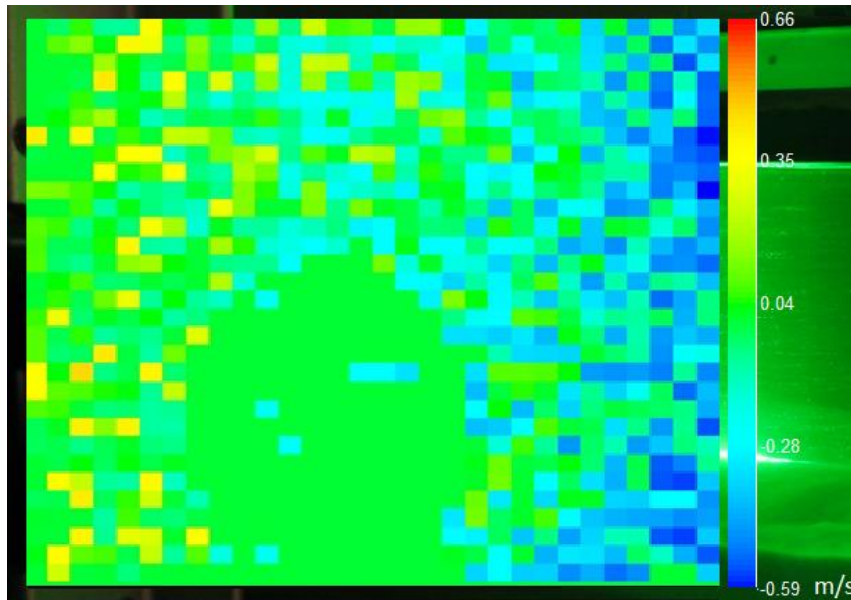


Figura 34: Componente horizontal del campo escalar (Fuente: Autor)

En cuanto a la componente vertical del campo escalar de vectores, puede despreciarse si se considera que los colores verdes de la imagen indican el flujo sin movimiento, y comparando con la componente horizontal, los colores azules y amarillos que sí que indican movimiento, son mucho más suaves. Puesto que la escala de colores es exactamente las misma en ambas proyecciones, es posible comparar ambas tonalidades de los colores cuantitativamente.

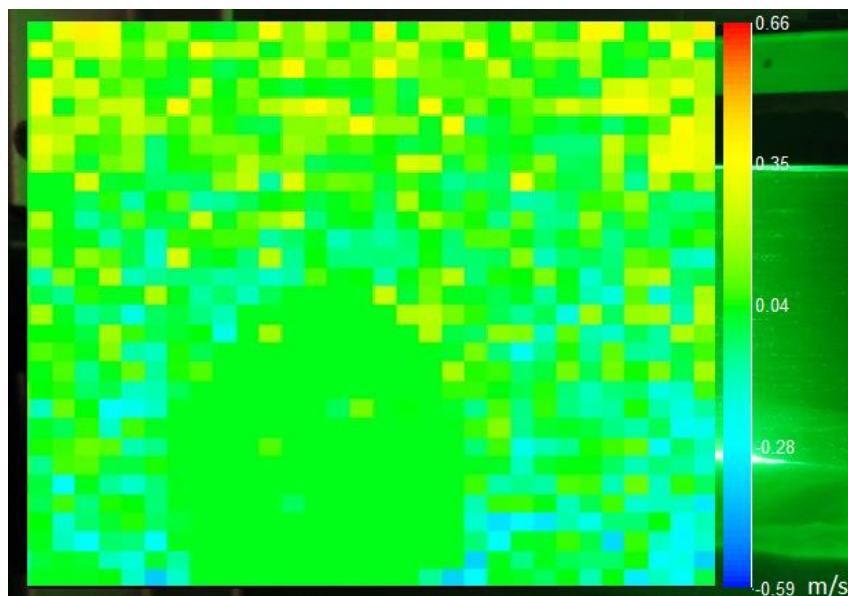


Figura 35: Componente vertical del campo escalar (Fuente: Autor)



Si bien el funcionamiento no es equivalente a un sistema PIV que se pudiera encontrar en laboratorios especializados, es justo decir que el funcionamiento de la instalación y del sistema PIV implementado obtiene unos resultados satisfactorios para el ámbito de uso para el cual está planificado.



5. CONCLUSIONES

La técnica PIV es una técnica importante en la ingeniería de fluidos ya que profundiza en la investigación de los flujos y fluidos. Esta técnica hace posible la medida de la velocidad instantánea en un punto de una corriente de un fluido a partir de imágenes de partículas trazadoras que han sido iluminadas.

El objetivo de este proyecto ha sido investigar sobre la técnica y desarrollar la misma para posibilitar su uso en la docencia. Para comparar los resultados con la realidad el estudio se ha hecho a partir de un flujo cuya velocidad ha sido estimada anteriormente.

El experimento ha consistido básicamente en construir la instalación del sistema y probar su funcionamiento para establecer que su funcionalidad es la adecuada. Esto se ha llevado a cabo administrando partículas trazadoras dentro de un flujo de agua destilada en un tanque de metacrilato en el que se ha creado un flujo de poca velocidad, registrando después el movimiento de éstas y obteniendo su velocidad. La velocidad se ha obtenido mediante un software informático que se ha encargado de correlacionar las imágenes del movimiento de las partículas.

La construcción e implementación de este proyecto ha sido un referente para aprender y ampliar el conocimiento sobre el funcionamiento de la técnica PIV. Los resultados obtenidos han sido bastante positivos y coherentes, tanto en la comparación de las velocidades del flujo como en la visualización de los patrones de movimiento que sufre el fluido. Por lo tanto, la funcionalidad del sistema es la correcta y el desarrollo de la instalación es el adecuado.



6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Web de Idesa Petroquímica: <http://www.idesapetroquimica.com/>
- [2] Web de Etalon Research: <http://www.etalonresearch.com/>
- [3] Markus Raffel, Christian E. Willert, Steve T. Wereley, Jürgen Kompenhans, Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998 – 2007, 2nd Edition, Springer.
- [4] Wolfgang Merzkirch, Flow Visualization, 2nd Edition, 1987, Academic Press.
- [5] Rafael Bardera Mora, Tesis Doctoral: Aplicación del PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica, Madrid, 2005.
- [6] José Miguel Iriarte Muñoz, Velocimetría PIV en tiempo real basada en lógica programable FPGA, San Carlos de Bariloche, Junio 2008.
- [7] Jacqueline O'Connor, Thesis: Response of a swirl-stabilized flame to transverse acoustic excitation, Georgia Institute of Technology, May 2012.
- [8] Mohsen Jahanmiri, Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.
- [9] Nihal Ertürk Düzgün, Particle image velocimetry applications in complex flow systems, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Junio 2012.
- [10] Especificaciones técnicas de la bomba, Web de Eheim: https://www.eheim.com/resources/product//42/downloads/10/EHEIM_pump_compact_5000_spare_parts_GB.pdf
- [11] Especificaciones técnicas del láser, Web de Global Laser Tech: <http://www.global-lasertech.co.uk/our-products/alignment-laser/laserlyte-flex-system/>
- [12] Especificaciones técnicas de la cámara de alta velocidad, Web de Mikrotron: http://www.mikrotron.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/mikrotron_motio_nblitz_eosens_mini2_dsh.pdf
- [13] Especificaciones técnicas de la lente GMHR412513MCN, Web de Goyo Optical: www.goyooptical.com/products/industrial/GMHR412513MCN.pdf



- [14] Especificaciones técnicas de la lente LM12HC, Web de Kowa Europe:
<http://www.kowa-europe.com/lenses/en/data/LM12HC.pdf>
- [15] Referencia figura 1: Esquema PIV; Web de Seika-mt: http://www.seika-mt.com/product/piv-en/Principle_of_PIV.html
- [16] Referencia figura 2: Dispersión de Mie; Flow Measurements, K.D Jensen, Dantec Dynamics Inc., 200 Williams Dr; Ramsey, NJ 07446; USA;
- [17] Referencia figura 3: Láser Nd:YAG; Web de Direct Industry:
<http://www.directindustry.com/prod/continuum/product-27505-1290451.html>
- [18] Referencia figura 4: Láser de iones de Argón; Web de Ebme:
<http://www.ebme.co.uk/articles/clinical-engineering/59-medical-laser-systems>
- [19] Referencia figura 5: Luz estroboscópica; Web de Research Gate:
https://www.researchgate.net/publication/223323910_Schlieren_PIV_for_turbulent_flows
- [20] Referencia figura 6: Diseños de lentes; Web de Medic:
http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo_2_3.htm
- [21] Referencia figura 7: Formación de un plano láser; Web Newport:
<https://www.newport.com/beam-shaping-with-cylindrical-lenses>
- [22] Referencia figuras 8, 9 y 10: Configuración óptica de lentes; Markus Raffel, Christian E. Willert, Steve T. Wereley, Jürgen Kompenhans, Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998 – 2007, 2nd Edition, Springer.
- [23] Referencia figura 11: Esquema sensor CCD; Web de Xakafoto:
<http://www.xakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>
- [24] Referencia figura 12: Esquema sensor CMOS; Web de Fotonostra:
<http://www.fotonostra.com/fotografia/sensores.htm>

7. ANEXOS

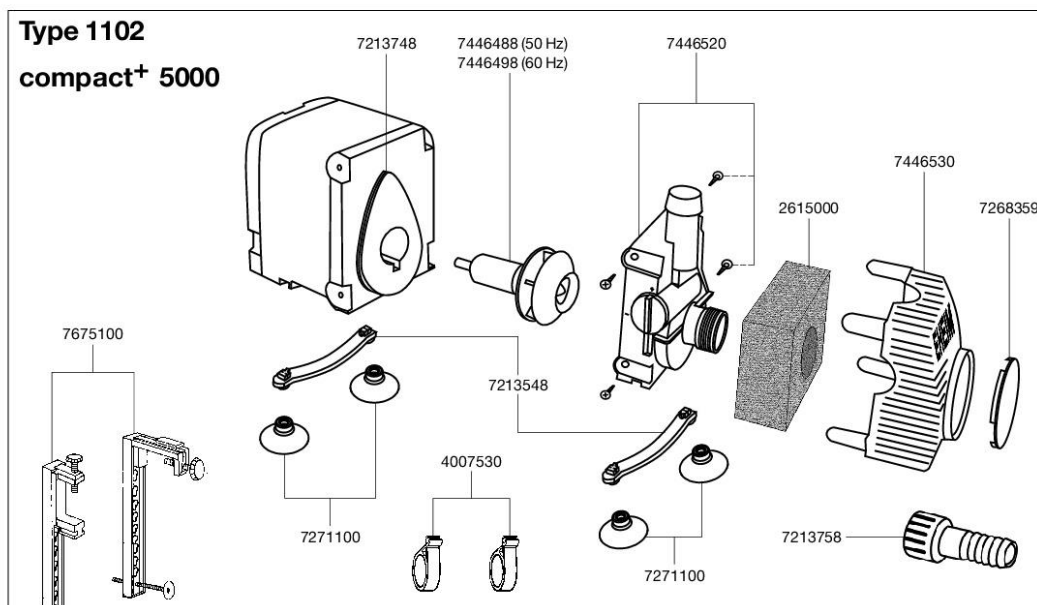
7.1. Anexo 1. Especificaciones técnicas de la bomba

1102 Pump compact+ 5000

EHEIM
compact+



Spare parts. Subject to change without prior notice.



Order no.	Spare part	1102
2615000	Coarse foam (2 pieces)	_____
4007530	Hose clamp (2 pieces)	_____
7213548	Attachment sleeves (2 pieces)	_____
7213758	Threaded connector suction side	_____
7213748	Sealing ring (2 pieces)	_____
7268359	Sealing cover	_____
7271100	Suction cup (4 pieces)	_____
7446488	Impeller (50 Hz) for compact+ 5000, Type 1102	_____
7446498	Impeller (60 Hz) for compact+ 5000, Type 1102	_____

Order no.	Spare part	1102
7446520	Pump housing complete with sealing ring and 4 screws for compact+ 5000, Type 1102	_____
7446530	Intake screen with sealing cover	_____
7675100	Holding brackets	_____

7.2. Anexo 2. Especificaciones técnicas de la cámara de alta velocidad

MotionBLITZ EoSens® mini2

Burst Trigger Mode (Post-Trigger)

The Burst Trigger Mode makes it possible to divide the memory into several thousand image bursts. For every event a defined number of frames will be stored. This makes it easier to record sequences of events.

Dynamic Range Adjustment

The camera's Dynamic Range Adjustment feature makes it possible to widen the CMOS sensor's dynamic range for high contrast scenes. Thus, the camera provides clear details even at extreme contrasts.

Maximum Performance at Minimum Form Factor

MotionBLITZ EoSens® mini2 comes up with a small form factor. The small footprint of approx. 63 x 64.5 mm (C-Mount version) allows for easy handling, even in cramped conditions.

Flexible and Easy to Use

The camera's Gigabit Ethernet interface allows to operate multiple cameras from any standard Notebook/PC over a distance of up to 100 m.

A Great Variety of Options

Color version, F-Mount front, ImageBLITZ® Automatic Trigger, Multi Sequence Mode, side placed connectors, cooling option and Hi-G version are optionally available.

Standard Equipment

- Burst Trigger Mode
- FPN Correction
- Dynamic Range Adjustment
- 1.5 s onboard Ring Buffer
- C-Mount front
- Rearside placed connectors
- Power supply
- Operator software
- Ethernet cable 3 m

Optional Extensions

- Ring Buffer extension up to 3 s recording time at full resolution and full speed
- ImageBLITZ® Automatic Trigger
- Multi Sequence Mode
- Color version
- F-Mount front
- Hi-G 100 g shock, 10 g vibration
- Cooling option
- Side placed connectors

Resolution and corresponding frame rate

1,696 x 1,710	523 fps
1,280 x 1,024	1,155 fps
1,280 x 720	1,640 fps
1,024 x 1,024	1,410 fps
640 x 480	4,460 fps
512 x 512	5,010 fps
320 x 240	14,770 fps
128 x 128	43,540 fps

Technical Data

(More detailed specifications are available on request)

MotionBLITZ EoSens® mini2	
Sensor	CMOS sensor 1,696 (H) x 1,710 (V) pixel active area 19.27 mm (diagonal), 13.57 (H) x 13.68 (V) mm, 8-bit monochrome or RGB-color with BAYER-filter
Pixel size	8 x 8 µm with micro lenses
Light sensitivity	1,200 ASA monochrome, 1,000 ASA RGB-color, monochrome 25 V/lux-s
Image speed	1 – 523 fps at full 1,696 (H) x 1,710 (V) resolution, more than 200,000 fps at reduced resolution
Recording time	3 s at full resolution and full speed, extended recording times at reduced resolution and/or frame rate
Compression	double recording time through reduction of color depth to 4-bit = 16 greysteps
Shutter	global electronic shutter from 2 µs to 1 s, in 2 µs steps
Sensor dynamic	up to 90 dB using Dynamic Range Adjustment
Spectral bandwidth	400 – 900 nm
Amplification	Digital Gain 1, 1.5 & 2
System design	scalable and network-compatible with standard PCs or Notebooks, synchronous processing of multiple cameras
Camera size	63 x 63 x 64.5 mm (C-Mount) 63 x 63 x 94 mm (F-Mount option)
Weight	280 g, without lens
Camera body temperature	+5 ... 35 °C (without cooling option) +5 ... 45 °C (with cooling option)
Lens mount	C-Mount or F-Mount
Power supply	10 – 30 V DC external power supply or from internal battery
Power consumption	7.5 W max.
Software	MotionBLITZ® Director2 operator software for Windows® XP / 7 / 8
Frame storage	BMP, JPG, TIFF, AVI, DNG, PNG and REC (MIKROTRON proprietary raw) file format
Camera-PC interface	Gigabit Ethernet interface
Trigger	triggering with external signal/switch, MotionBLITZ® Director2 software or ImageBLITZ® Automatic Trigger
Synchronisation	in- and output to synchronise multiple cameras or trigger any external devices (5V TTL), alternative ARM output (recording state)
Digital input	4-bit with Optocouplers, inserted in each image
Plug position	rearside placed, optional side placed

fps = frames per second

MIKROTRON GmbH

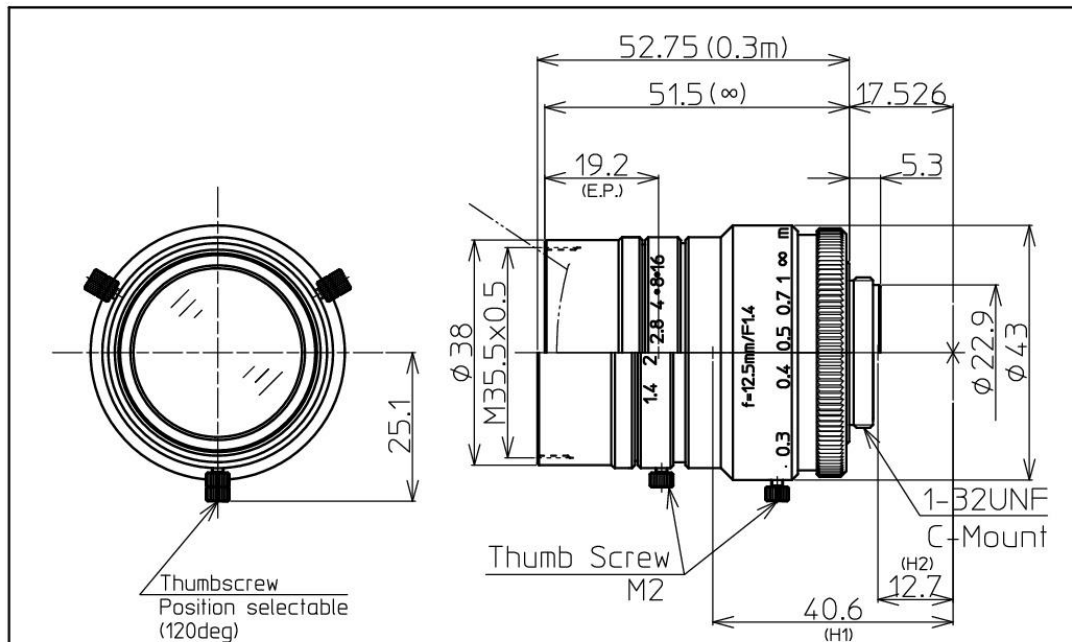
MIKROTRON is a renowned manufacturer of small and robust high-speed cameras on the international industrial image processing market. Due to their outstanding performance characteristics the cameras are perfectly suited for usage in industrial and scientific applications, as well as in sports analysis, advertisements or documentaries.

Germany
Landshuter Str. 20-22
D-85716 Unterschleißheim
Phone: +49(0)89-726342-00
E-Mail: info@mikrotron.de
Web: www.mikrotron.de

North America
12172 Caddy Row, Ste. 100
San Diego, CA 92128 - USA
Phone: +1(0)858-521-0496
E-Mail: steve.ferrell@mikrotron.de
Web: www.mikrotron.de/en



7.3. Anexo 3. Especificaciones técnicas de la lente LM12HC



	1"	1.4/12.5mm C	1"	2/3"	1/1.8"
FOCAL LENGTH	f=12.5mm				
MAX. DIAMETER (RATIO)	F=1:1.4~16				
PICTURE SIZE	9.6x12.8mm		6.6x8.8mm		5.4x7.2mm
ANGLE	VER. ANGLE	42.5°	29.5°		24.2°
	HOR. ANGLE	55.6°	39.1°		32.1°
	DIA. ANGLE	67.6°	48.3°		39.9°
DISTORTION (TV)	-1.58%				
SHOOTING RANGE AT MINIMUM FOCUS DISTANCE	VER.	243.5mm	165.2mm		134.6mm
	HOR.	330.6mm	222.4mm		180.6mm
	DIA.	420.6mm	281.3mm		227.7mm
MINIMUM FOCUS DISTANCE	0.3m				
FLANGE BACK	17.526mm in air				
BACK FOCUS	12.6mm in air				
FILTER SCREW SIZE	M35.5x0.5				
FRONT/REAR EFFECTIVE DIA.	FRONT ϕ 28.1mm		REAR ϕ 17.5mm		
MOUNT	C-MOUNT				
EXIT PUPIL	-45.9mm				
TEMPERATURE RANGE	-10~+50°C				
STORAGE TEMPERATURE RANGE	-20~+60°C				
RESOLUTION CENTER/CORNER	CENTER 120lp/mm		CORNER 80lp/mm		
WEIGHT	160 g				

NOTE: Specifications and availability are subject to change without notice

注) 本仕様については、予告なしに変更する場合があります。



		尺度	1/1	工場番号	HR976NCN-3H
		機種名	1" F1.4 f=12.5mm		
2015.7.30	正面図追加	機種番	LM12HC		
2014.12.25	更新				
2013.4.15	作成年月日				

7.4. Anexo 4. Especificaciones técnicas de la lente GMHR412513MCN

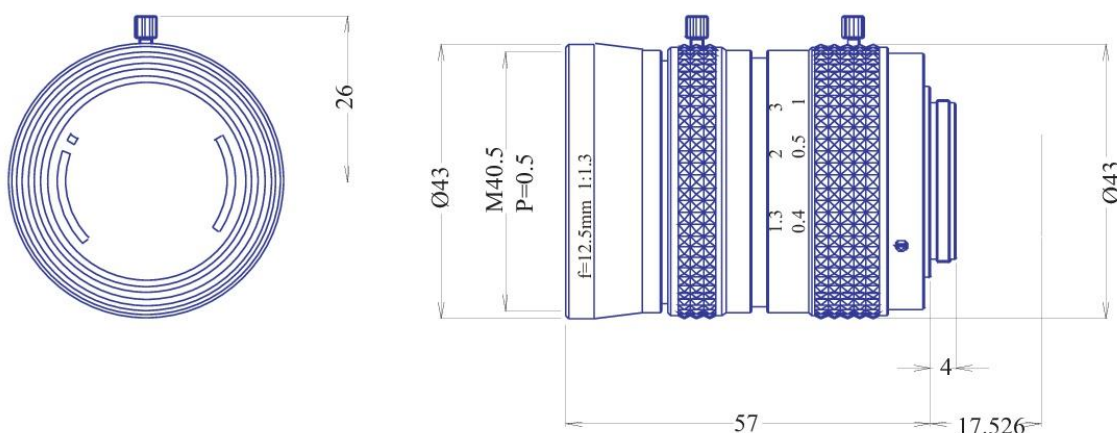
0905

GOYO OPTICAL INC.

Industrial Lens

1inch Format High Resolution Lenses

Item No. GMHR412513MCN



ITEM NO.	GMHR412513MCN
Focal Length	12.5 (mm)
Iris Range	F1.3 - 16
Angle of View (Hx V x D) 1"	54.5° x 41.9° x 65.4°
MOD	0.23 (m)
Filter Thread	M=40.5 , P=0.5
Dimention (D x L)	Ø49 x 57 (mm)
Weight	160 (g)

GOYO OPTICAL Inc.,

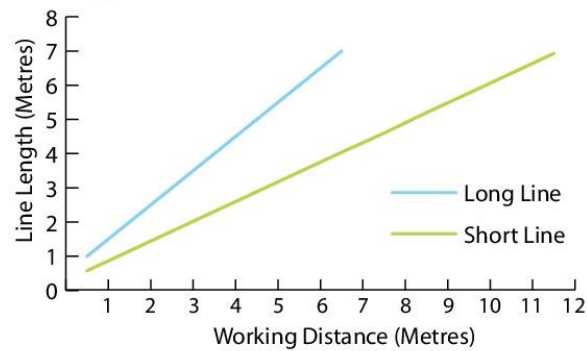
3-8-31 HAMASAKI, ASAKA, SAITAMA 351-0033, JAPAN,
 TEL:+81-48-474-2235 FAX:+81-48-474-7373
<http://www.goyooptical.com> E-MAIL:info@goyooptical.com

GOYO OPTICAL Inc.,

7.5. Anexo 5. Especificaciones técnicas del láser

Line Length Table.

The graph below shows the typical line length achieved at a range of working distances for both the short (60°) and long (90°) line laser.



Specifications.

Mechanical Information	
Dimensions (mm)	15 x 37 (Without line optics) 11 x 42 (With line/cross optics)
Housing	Black Anodised Aluminium
Isolated Body	Yes
Optical Information	
Diode Power (mW)	5
Wavelength (nm)	635 or 650*
Intensity Distribution	
Dot	Gaussian
Short Line	Homogeneous
Long Line	Homogeneous
Small Cross	DOE
Large Cross	Homogeneous
Long Line + Dot	Gaussian
Focus Range	6mm to infinity
Delivery Set Focus	300mm (user adjustable)
Environmental Information	
Operating Case Temperature (°C)	-10 to +45
Storage Temperature (°C)	-10 to +85
Operating Humidity (%RH)	90 (non condensing)
MTTF @ 25°C (hrs)	>25,000*
Electrical Specifications	
Cable Length	1500mm
Connector Type	DC Jack
Reverse Polarity Protection	Yes

NOTES
*Varies with laser model
All specifications are typical @ 25°C

Fan Angle & Working Distance

The size of the fan angle (or spread of the beam) will determine how long the line is. When viewed from the same distance and at 90 degrees to the surface a line with a fan angle of 60 degrees will be longer than a line of 30 degrees. The Laserlyte-Flex can be fitted as standard as standard with line optics with a fan angle of 60 and 90 degrees, cross optics with fan angle of 8 degree and 60 degrees and a line+dot optic with a fan angle of 100 degrees.

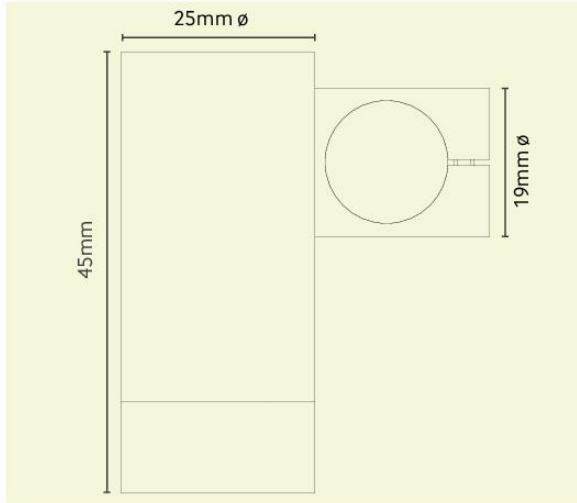
Fan Angle (Degrees)	Distance to Object (mm)	Line Length (mm)
30	100	54
60	100	115

As a guide to relationship between working distance, line length and fan angle please see table below.

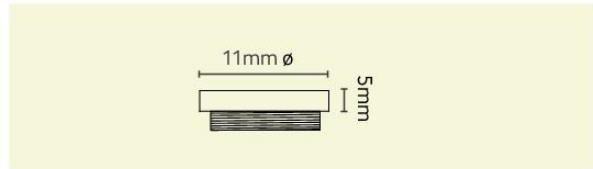
		Fan Angle (Degrees)			
		9°	60°	90°	100°
Distance From Object (mm)	250	39	289	500	596
	500	79	577	1000	1192
	750	118	866	1500	1788
	1000	157	1155	2000	2384
	1250	197	1443	2500	2979
	1500	236	1732	3000	3575
	1750	275	2021	3500	4171
	2000	315	2309	4000	4767
	2250	354	2598	4500	5363
	2500	394	2887	5000	5959
	2750	433	3175	5500	6555
	3000	472	3464	6000	7151
		Line Length (mm)			

Mechanical Drawings.

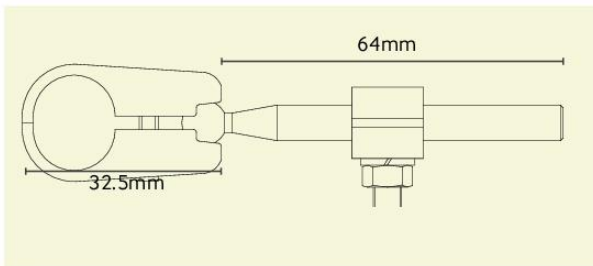
Heavy Duty Mounting Clamp



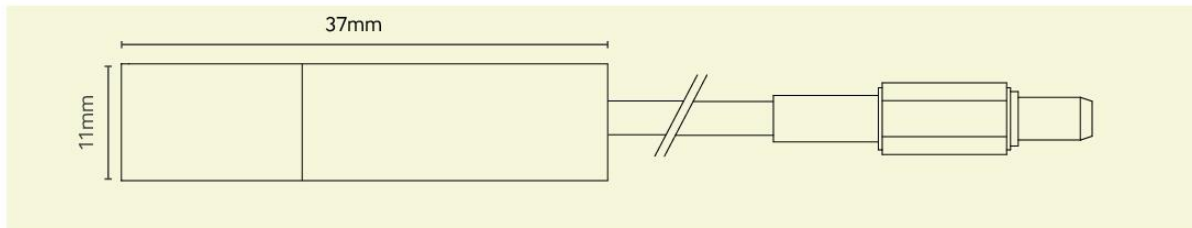
Line/Cross Optics



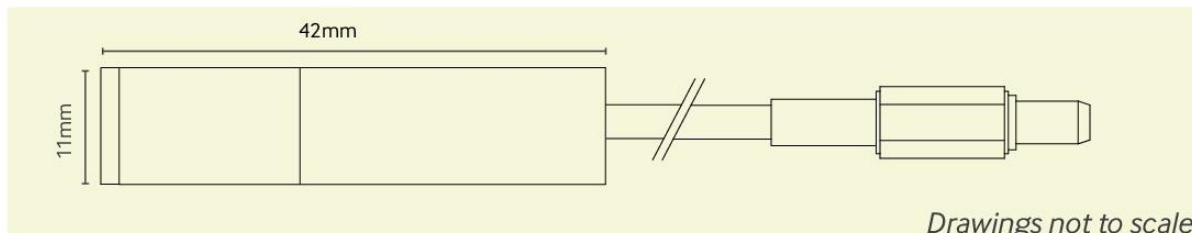
MK1 - Mounting Kit



Laserlyte-Flex Without Line/Cross Optics



Laserlyte-Flex With Line/Cross Optics



Drawings not to scale

Please Note: Global Laser reserve the right to change descriptions and specifications without notice.



For further information about any of our products please contact your local distributor or you can contact Global Laser in the UK. Your Local Distributor is:

T: +44 (0)1495 212213
F: +44 (0)1495 214004
E: sales@globallasertech.com
www.globallasertech.com

Global Laser Ltd, Cwmtillery Industrial Estate
Abertillery, Gwent NP13 1LZ UK



8. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Nº	Descripción	Precio/hora	Horas	Coste
1	Desplazamiento y adquisición de datos	20 €	18	360.00 €
2	Análisis y modificación de estructuras	20 €	10	200.00 €
3	Redacción de la memoria del proyecto	20 €	50	1000.00 €
4	Búsqueda de información	20 €	20	400.00 €
5	Partículas trazadoras (2 botes 100 g)	-	-	1000.00 €
6	Bomba Compact + 5000 EHEIM	-	-	110.95 €
7	Láser Laserlyte-Flex 635/5 Global Laser	-	-	126.23 €
8	Cámara Mikrotron Eo Sens MC 1362	-	-	6000.00 €
9	Lente LM12HC	-	-	460.00 €
10	Metacrilato	-	-	100.00 €
11	Lona negra	-	-	4.50 €
			TOTAL (iva INCL) =	9761.68 €