



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Estudio mediante PIV del flujo a bajos números de Reynolds en una unión

Autor:

Angulo Robina, Irene

Tutor:

**Castro Ruiz, Francisco
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, Julio del 2018.

A todos los que han confiado en mí; a mi familia y a mis amigos; a los que están y a los que no.

Gracias al departamento por darme la oportunidad de realizar este proyecto y a las personas que me han acompañado durante su desarrollo.

Resumen

El presente proyecto trata del análisis del patrón de flujo de la mezcla de dos corrientes laminares. Se trata de un trabajo experimental en el que el análisis se lleva a cabo gracias a la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV). Los resultados que se obtienen en este estudio servirán para validar un modelo numérico en un proyecto futuro.

El proyecto se engloba dentro del marco de los micromezcladores pasivos de fluidos incompresibles de tipo Y. El funcionamiento de este micromezclador se imita mediante un modelo con dos entradas que forman un ángulo de 45° entre sí y una salida alineada con una de las entradas.

Diferentes relaciones entre los dos caudales de entrada y tres números de Reynolds del conducto de salida permiten caracterizar un amplio abanico de situaciones de funcionamiento del micromezclador. Las conclusiones son resultado de las diversas comparaciones entre las situaciones analizadas.

Palabras clave: Micromezclador, mezcla de dos corrientes, patrón de flujo, PIV, flujo laminar

Abstract

The present project portrays the flow pattern analysis of the mixture of two laminar flows. The analysis considered in this experimental project is implemented thanks to the technique of Particle Image Velocimetry (PIV). The results obtained will serve to validate a numerical model in a future project.

The project is included among the study of Y type passive micromixers of incompressible fluids. A model in which the inputs forms 45° angle and the output is aligned with one of the inputs imitates the operation of this type of micromixer. Different relations between the two input flow rates and three Reynolds numbers of the output pipe illustrate a wide range of the operating situations of the micromixer. Therefore, the conclusions are the result of the comparison between the different situations.

Key words: Micromixer, mixture of two flows, flow pattern, PIV, laminar flow.

Índice de la memoria

1	Introducción, antecedentes y objetivos	9
1.1	Características del flujo	9
1.2	Micromezcladores.....	10
1.3	Objetivos y descripción de la memoria.....	12
2	Sistema PIV	15
2.1	Principio de funcionamiento	15
2.2	Proceso para el desarrollo de la técnica PIV.....	16
2.2.1	Partículas trazadoras	17
2.2.2	Iluminación	19
2.2.3	Sistema de registro	19
2.2.4	Procesado y análisis de las imágenes	19
3	Descripción de la instalación experimental	23
3.1	Descripción de la instalación hidráulica.....	24
3.1.1	Fluido.....	24
3.1.2	Partículas trazadoras	24
3.1.3	Circuito hidráulico	26
3.1.4	Válvulas de esfera	27
3.1.5	Válvulas de aguja	28
3.1.6	Depósito de descarga	29
3.1.7	Bomba hidráulica de engranajes	29
3.1.8	Modelo	32
3.2	Dispositivos de medida	33
3.2.1	Fuente láser.....	33
3.2.2	Cámara oscura	34
3.2.3	Guillotina	35
3.2.4	Cámara digital	35
3.2.5	Sincronizador.....	36
3.2.6	Unidad de procesado	37
3.3	Dispositivos auxiliares	37
3.3.1	Caudalímetro de ultrasonidos	37

3.3.2	Sensores de presión.....	39
3.3.3	Softwares.....	41
4	Metodología experimental.....	45
4.1	Preparación previa de la instalación.....	45
4.1.1	Puesta a punto de la instalación hidráulica.....	46
4.1.2	Ajuste del sistema láser y guillotina.....	50
4.1.3	Ajuste de la cámara digital.....	52
4.1.4	Ajuste de paralelismo.....	55
4.1.5	Calibración del caudalímetro y la bomba.....	57
4.2	Medidas.....	59
4.2.1	Zonas de medida.....	60
4.2.2	Medidas realizadas.....	61
4.2.3	Ajuste del tiempo entre disparos.....	63
4.2.4	Adquisición de las imágenes con el programa y calibración.....	64
4.3	Procesado de las imágenes.....	65
4.3.1	Generación de la máscara.....	65
4.3.2	Eliminación del mínimo.....	67
4.3.3	Correlación promediada.....	67
4.3.4	Importancia del tratamiento de las imágenes.....	68
5	Análisis de los resultados.....	73
5.1	Análisis del comportamiento de un mezclador.....	75
5.1.1	Consideraciones iniciales.....	75
5.1.2	Influencia de la relación de caudales para un mismo Reynolds.....	79
5.1.3	Influencia del Reynolds para una misma relación de caudales.....	86
5.1.4	Consideraciones respecto a una bifurcación.....	94
5.2	Análisis del comportamiento de un flujo incidiendo en un conducto.....	94
5.2.1	Análisis del torbellino superior.....	94
5.2.2	Análisis del torbellino inferior.....	96
5.2.3	Análisis en distintos planos paralelos.....	99
6	Conclusiones y líneas futuras.....	105
6.1	Conclusiones acerca del funcionamiento de un mezclador.....	105

6.2 Conclusiones del análisis de torbellinos	106
6.3 Líneas futuras	107
Bibliografía	111

Índice de símbolos

- D: Diámetro de cada uno de los conductos que se especifican mediante los subíndices 1, 2 y 3.
- K: Pérdidas de carga que ofrecen los conductos. Con los subíndices 2 ó 3 se especifica el conducto al que van referidas dichas pérdidas.
- m: Masa. El subíndice indica el fluido al que va referida la masa.
- Q: Caudal en ml/min. Con los subíndices 1, 2 ó 3 se especifica el caudal de cada uno de los conductos.
- r*: Relación de velocidades. (Se define en la ecuación 5.7)
- r: Relación de caudal. (Se define en la ecuación 4.10)
- Re: Número de Reynolds. Con los subíndices 1, 2 ó 3 se refiere al Reynolds de cada uno de los conductos 1, 2 ó 3, respectivamente.
- V: Volumen. Se indica con un subíndice el fluido al que se refiere.
- $V_{adimens}$: Velocidad adimensionalizada respecto a la velocidad media del conducto principal. (Se define en la ecuación 5.8)
- V_m : Velocidad media en m/s en cada uno de los conductos.
- X: Posición del desplazador.
- ρ : Densidad. Con el subíndice se indica a que fluido va referido.

Capítulo 1. Introducción, antecedentes y objetivos

Índice del capítulo 1

1	Introducción, antecedentes y objetivos	9
1.1	Características del flujo	9
1.2	Micromezcladores.....	10
1.3	Objetivos y descripción de la memoria.....	12

1 Introducción, antecedentes y objetivos

El presente proyecto se enmarca en el análisis de campos de velocidad de fluidos que circulan por el interior de conductos. El análisis se realiza sobre el patrón de flujo del mezclado de dos corrientes de flujo incompresible en un conducto. Se trata de un estudio experimental basado en la utilización de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV). Estos resultados se utilizarán en un trabajo futuro para la validación de un modelo numérico.

Desde su aparición, los modelos numéricos han sido una gran herramienta para la ingeniería a la hora de realizar todo tipo de análisis. Son especialmente útiles a la hora de realizar análisis no intrusivos, sin embargo, tienen la necesidad de acompañarse de resultados experimentales que validen su veracidad.

En trabajos anteriores¹ desarrollados por el departamento de fluidodinámica se ha estudiado el patrón de flujo en bifurcaciones de arterias coronarias. En ellos, los conductos trataban asemejarse a arterias para reproducir lo más fielmente posible el comportamiento fluidodinámico de una región del sistema circulatorio humano. Este proyecto se aparta del marco general de estudios realizados hasta la fecha, al corresponder el flujo a una unión. Así pues, el proyecto se enmarca dentro del estudio del funcionamiento de micromezcladores de flujo laminar.

1.1 Características del flujo

Considerando que el número de Reynolds con el que el fluido circula por el interior de los conductos es pequeño, el flujo que se tiene en este experimento es laminar. Se conoce que el campo de velocidades de un flujo laminar que circula por el interior de un conducto sigue un perfil de velocidades de Hagen Poiseuille, figura 1.1. El perfil de velocidades parabólico viene provocado por la viscosidad del fluido que hace que la velocidad en las paredes sea nula mientras que en el centro adquiere la máxima velocidad.

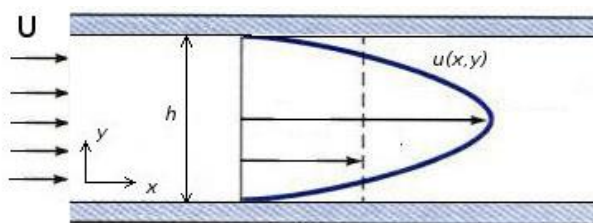


Figura. 1.1 Perfil de velocidad de una corriente de Hagen - Poiseuille.
Fuente: <https://cfdconopenfoam.wordpress.com/category/tutoriales>

¹ Bibliografía. García C. Pedro (2015), Alberto (2015)

Las paredes de los conductos ofrecen resistencia al avance del fluido que circula por su interior. Esta resistencia se ve influida por el diámetro del conducto, la longitud de los conductos y la viscosidad del fluido, y puede calcularse a partir de las presiones en dos secciones mediante la ec. 1.1.

$$K = \frac{P1-P2}{Q} \quad \text{ec. 1.1}$$

1.2 Micromezcladores²

Los micromezcladores son muy utilizados en el ámbito de la industria química. El mezclado de dos corrientes se define como el proceso físico que busca la obtención de una distribución uniforme de las propiedades del flujo resultante. Así pues, un micromezclador es un dispositivo en el que se favorece el mezclado de fluidos que circulan por conductos de pequeño tamaño (del orden de mm). Generalmente se mezclan dos corrientes de diferente naturaleza. En este proyecto se mezclan dos corrientes con las mismas propiedades químicas, en las que se busca analizar el patrón de flujo que resulta de la interacción de ambas.

Los micromezcladores suelen trabajar con flujos laminares, tal y como es el caso de los flujos del presente proyecto, por lo que el mezclado se debe a los mecanismos de difusión y convección. La gran variedad de micromezcladores del mercado se debe a los diferentes procesos fluidodinámicos en los que se basa la generación de la mezcla de los fluidos. En la figura 1.2 se tienen algunos de los micromezcladores que pueden encontrarse en el mercado entre los que se recuadra uno similar al estudiado en este proyecto.

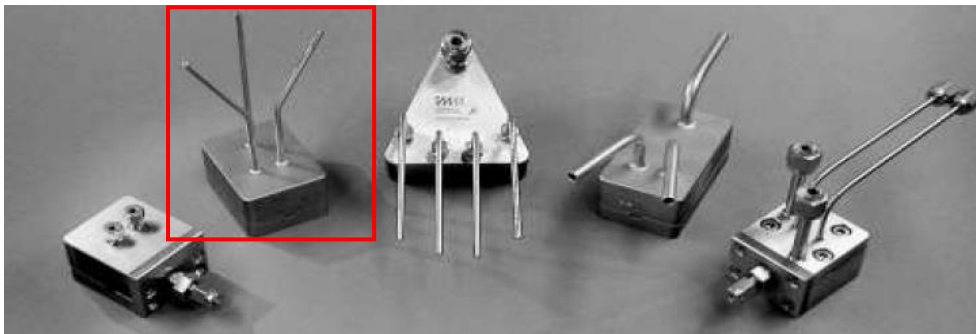


Figura. 1.2 Tipos de micromezcladores disponibles en el mercado. Fuente: Bastida Yañez O., et al. (2009)

Los micromezcladores se clasifican dentro de dos grandes grupos: activos y pasivos. Los pasivos son los que no utilizan una fuente externa para favorecer el mezclado de los flujos, sino que se basan en conceptos fluidodinámicos. Dado que el micromezclador de este proyecto se encuentra dentro de este

² Hessel, V.; Löwe, H.; Schönfeld, F. (2004)

grupo, será el grupo que se tratará a continuación. Los mezcladores pasivos se clasifican según el sistema de mezclado que utilicen, y entre otros, se encuentran:

- Mezcladores de tipo Y y T. En un mezclador del tipo T ambas corrientes de entrada son perpendiculares a la corriente de la mezcla resultante, mientras que en el caso de uno del tipo Y, el ángulo entre las dos corrientes de entrada puede ser cualquiera, aunque usualmente suelen formar 45°.
- Configuración de flujo multilaminar.
- Bifurcación y recombinación del flujo.
- Configuración de placas de orificios múltiples.
- Mezclado caótico.
- Colisión de corrientes.

En este proyecto se analiza la mezcla resultante de un micromezclador del tipo Y en el que las corrientes de entrada forman un ángulo de 45° entre sí y el flujo de salida está alineado con una de ellas.

Una característica importante de los micromezcladores es la eficiencia de mezclado, que viene dada por la ec. 1.2³. En ella σ es la desviación estándar de la concentración en una zona del conducto. Cuando se tiene que por las dos entradas tienen el mismo caudal, la desviación estándar máxima es de 0.5, en caso contrario hay que calcularla. La desviación estándar puede calcularse gracias a los datos recogidos en un experimento en el que se mide la concentración de tinte azul en una imagen. Así la desviación estándar viene dada por la ec. 1.3³ en la que N es el número de píxeles de la zona de la imagen considerada, C_i es la concentración de tinte azul que se considera en un pixel y C_m es la concentración media dentro del área considerado.

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{0.5}} \quad \text{ec. 1.2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - C_m)^2} \quad \text{ec. 1.3}$$

Para un micromezclador estándar los valores aceptables de la eficiencia de micromezclado se encuentran entre el 80% y el 100%.

En un mezclador también es importante conocer la longitud de mezclado, es decir, la longitud de conducto que necesita la mezcla para ser completamente homogénea. Esta distancia es equivalente al tiempo de mezclado y está relacionado con los procesos de difusión.

³ Fuente: Viktorrov, V.; Mahmud M.; Visconte C. (2015)

1.3 Objetivos y descripción de la memoria

El objetivo principal del presente proyecto es caracterizar con detalle el patrón de flujo de la mezcla de dos corrientes que forman un ángulo de 45° entre sí, y donde el conducto de salida está alineado con una de las entradas.

Para caracterizar el patrón de flujo se realiza un análisis a diferentes números de Reynolds y relaciones de caudal de cara a establecer un abanico de patrones de flujo diferentes, que servirán en un futuro para validar correctamente el modelo numérico.

Un objetivo complementario es encontrar las similitudes y diferencias entre los patrones de flujo de diferentes situaciones que están definidas por el número de Reynolds y la relación de caudal. Para ello se realizan comparaciones entre las medidas realizadas.

Se desea evaluar la distancia de mezclado. Los mezcladores necesitan una distancia determinada desde que comienza la unión de las dos corrientes hasta que estas se han mezclado completamente y se tiene una mezcla en la que sus propiedades son uniformes.

La presente memoria se encuentra dividida en 6 capítulos. En el segundo capítulo se explica en profundidad la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) utilizada; en qué consiste y cuáles son sus fundamentos. En el capítulo tres se expone una descripción detallada de la instalación experimental utilizada para el desarrollo del trabajo. En el cuarto capítulo se expone la metodología necesaria que hay que llevar a cabo para realizar las medidas. El quinto capítulo contiene el análisis de los resultados obtenidos. En el sexto capítulo se incluyen las conclusiones a las que se han llegado a partir de los resultados y el análisis realizado.

El presente proyecto cuenta también con dos anejos en los que se encuentra la información complementaria que se ha considerado apropiada para complementar la memoria. El Anejo 1 contiene la totalidad de las medidas realizadas con los datos de procesado de las imágenes. A su vez incluye todos los datos de presiones y caudales. Las medidas se encuentran ordenadas por zonas de medida (apartado 4.2.1) y número de Reynolds. En el Anejo 2 se incluyen las imágenes del Anejo 1 ordenadas según el número de Reynolds con las vistas colocadas consecutivamente siguiendo el sentido del flujo a fin de ofrecer una visión global del patrón de flujo dentro de toda el área del modelo considerada. Además, se encuentran todas las medidas correspondientes al análisis de torbellinos. Todos estos datos complementan los que se muestran en el capítulo 5.

Capítulo 2. Técnica PIV

Índice capítulo 2

2	Sistema PIV	15
2.1	Principio de funcionamiento	15
2.2	Proceso para el desarrollo de la técnica de PIV	16
2.2.1	Partículas trazadoras	17
2.2.2	Iluminación	19
2.2.3	Sistema de registro	19
2.2.4	Procesado y análisis de las imágenes	19

2 Sistema PIV⁴

La técnica de velocimetría de imágenes de partículas es habitualmente conocida como PIV de sus siglas en inglés (Particle Image Velocimetry). Mediante la aplicación de esta técnica se puede determinar el campo instantáneo de velocidades en una región plana del fluido. Es por lo tanto en esencia, una técnica bidimensional, aunque tiene algunas variantes que permiten tratamientos tridimensionales.

Mediante un láser pulsado y una óptica apropiada se forma una fina lámina de luz que ilumina las partículas trazadoras contenidas en el fluido al atravesarlo. Las partículas reflejan esa luz por lo que se puede registrar su posición mediante una cámara.

2.1 Principio de funcionamiento

Al fluido del que se quiere estudiar su campo de velocidad, se le añade una cantidad determinada de las partículas trazadoras. Una adecuada concentración de las mismas es fundamental para la obtención de unos buenos resultados. La Velocimetría de Imágenes de Partículas se basa en la medida de la velocidad estas partículas trazadoras que transporta el fluido. Se considera que la velocidad de las partículas es la misma que lleva el fluido así que determinando la velocidad de las partículas, se tiene también la del fluido. Una cámara digital sincronizada con el láser recoge pares de fotografías consecutivas, en las que quedan registradas la posición de las partículas iluminadas.

El láser es pulsado dos veces, conociéndose el tiempo de separación entre ambos pulsos, de forma que se iluminan las partículas de un plano de fluido en esos dos instantes y realizándose una fotografía en cada uno. Con estas dos fotografías quedan registradas dos posiciones distintas de las partículas, por lo que se conoce el desplazamiento que ha recorrido la partícula y el tiempo que ha tardado en recorrerlo, que se corresponde con el intervalo entre pulsos del láser. Mediante estos dos datos se puede obtener la velocidad que lleva dicha partícula. Para el análisis de las imágenes recogidas es necesario utilizar un software específico, que en este caso se trata del software que proporciona la marca Dynamics, *DynamicStudio*. Lo explicado anteriormente se ilustra en la figura 2.1 donde puede verse un esquema típico de la técnica PIV.

⁴ Bardera Mora R. (2006)

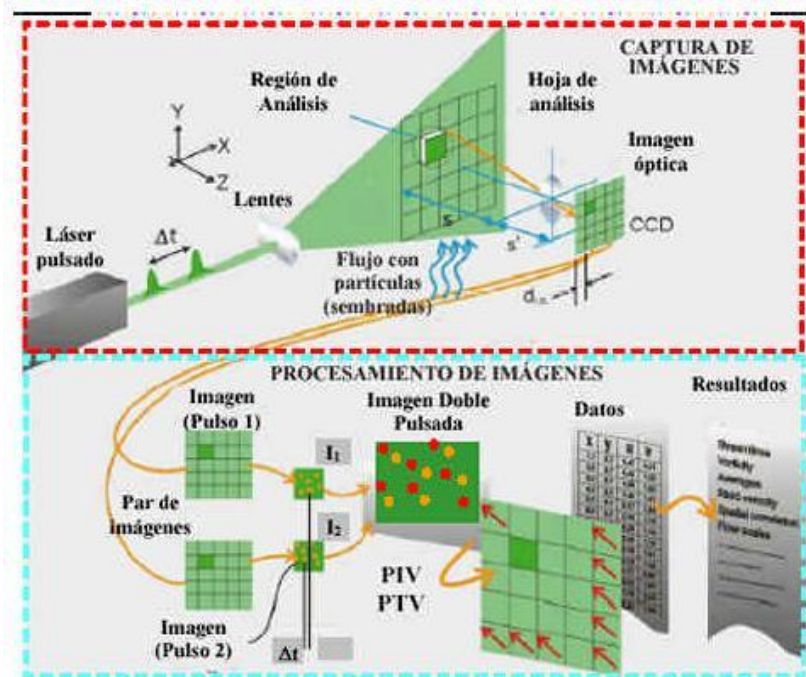


Figura. 2.1 Esquema del funcionamiento de la técnica de PIV
 Fuente: Díaz Delgado, C.; García Aragón, J.A.; Salinas Tapia, H.; (2008)

El principio básico de esta técnica se basa en que la velocidad de las partículas es la misma que la velocidad que lleva el fluido; por lo que ésta se puede calcular fácilmente como la distancia recorrida dividida entre el tiempo que se ha tardado en recorrer esa distancia, como determina la ec. 3.1.

$$\vec{u}(\vec{X}, t) = \frac{\overline{\Delta\vec{X}}(\vec{X}, t)}{\Delta t} \quad \text{ec. 3.1}$$

2.2 Proceso para el desarrollo de la técnica PIV

La técnica de PIV desarrollada con los años y que ha desembocado en la tecnología utilizada actualmente consta de los elementos que se detallan a continuación.

- Partículas trazadoras
- Sistema de iluminación
- Sistema de registro
- Análisis de las imágenes
- Post - procesado de las medidas

La técnica de PIV se divide en dos etapas principales: la adquisición de imágenes y el procesado y análisis de dichas imágenes. En la adquisición de imágenes se consideran las partículas, la iluminación y la captura de las

imágenes. En la segunda fase, el análisis se divide en el preprocesado, análisis de las imágenes, análisis de datos y postprocesado. (figura 2.2).

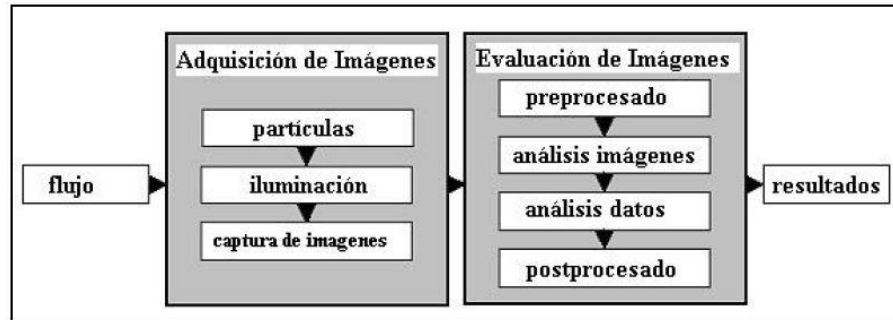


Figura. 2.2 Elementos que influyen en la instalación del PIV. Fuente: Bardera Mora, R. (2006)

2.2.1 Partículas trazadoras

Como describe en el siguiente capítulo, las partículas deben poder ser registradas al ser iluminadas. Estas partículas teóricamente se consideran elementos esféricos que se mueven en el seno del fluido. Como en las condiciones de trabajo que se tienen se está a bajos Reynolds y por lo tanto el régimen es laminar, se puede aplicar la ley de Stokes para calcular la fuerza de resistencia de una esfera en un fluido.

Una partícula que se inserta en el fluido, y que por lo tanto parte de una velocidad nula, va adquiriendo la velocidad del fluido de forma exponencial. Con esto se calcula que el tiempo de relajación representa un tiempo para el cual la partícula ha alcanzado el 63% de la velocidad media del fluido. Cuanto menor sea el diámetro de la partícula y su densidad, menor será este tiempo de relajación⁵; por lo que se busca que el tamaño de las partículas sea lo más pequeño posible. En la práctica, en función del análisis que se quiera realizar, el tamaño de las partículas no es necesario que sea muy pequeño, como en el caso que nos ocupa en el que se busca hacer un análisis del flujo general, recogiendo imágenes desde una distancia para la que basta con las partículas de 15 μm .

A su vez hay que considerar que la diferencia de densidad existente entre la de las partículas y la densidad del fluido hace que exista una velocidad de sedimentación. Esta velocidad de caída se puede calcular mediante la ley de Stokes y viene dada por la siguiente expresión (ec. 3.2).

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu_f} \quad \text{ec. 3.2}$$

⁵ Partiendo de la ecuación de Merzkirch $\frac{du_p}{dt} = K(u_f - u_p)$, siendo u_f la velocidad del fluido y u_p la velocidad de la partícula; se obtiene la expresión $u_p = u_f(1 - e^{-Kt})$, siendo K una constante que depende de parámetros de la partícula y el fluido. El inverso de ese parámetro K es el tiempo de relajación.

Donde v_s es la velocidad de sedimentación; ρ_p es la densidad de las partículas; ρ_f es la densidad del fluido; g es la gravedad; d_p es el diámetro de las partículas y μ_f es la velocidad dinámica del fluido.

Esta velocidad va en el mismo sentido que el fluido de estudio, ya que va en el mismo sentido que la gravedad y hace que la velocidad que llevan las partículas no se corresponda completamente con la del fluido. Este efecto se minimiza haciendo que las densidades del fluido y las partículas sean similares de forma que la diferencia sea lo más próxima posible a cero. Al minimizar la velocidad de sedimentación la velocidad de las partículas se aproxima mejor a la del fluido.

Para estudiar la dispersión de la luz en pequeñas partículas esféricas se suele considerar un diámetro normalizado (ec. 3.3). (Hinsch, 1993).

$$q = \frac{\pi \cdot d_p}{\lambda} \quad \text{ec. 4.3}$$

Con una $q \ll 1$ se sigue la teoría de Rayleigh⁶ mientras que cuando $q \gg 1$ se sigue la ley geométrica. Las partículas utilizadas en la técnica de PIV se encuentran en el rango intermedio por lo que la dispersión sigue la teoría de Mie. Esta teoría es la solución completa de las ecuaciones de Maxwell para la

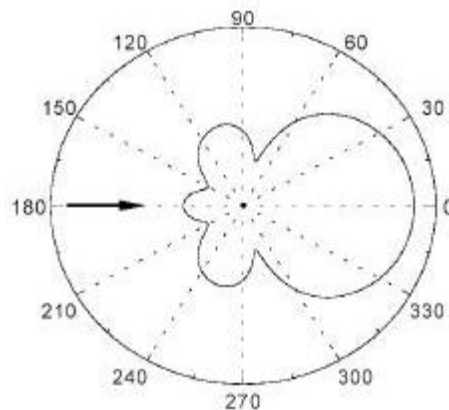


Figura. 3.4 Diagrama de dispersión de la teoría de Mie.
Fuente: Bardera Mora R. (2006)

dispersión de ondas electromagnéticas en partículas esféricas. En la figura 4.3 se ve el diagrama de dispersión de la teoría de Mie. En este diagrama se puede ver que la mayor cantidad de intensidad es dispersada en la misma dirección en la que incide la luz lo cual es una gran desventaja para el PIV. El equipo láser incide a 90° del equipo de registro, que es donde se produce la mínima dispersión de luz prácticamente. Esto hace que se necesita que los láseres utilizados para esta técnica que sean de mayor potencia.

⁶ La teoría de Rayleigh determina la dispersión de luz o cualquier onda electromagnética por partículas que tienen un tamaño mucho menor que la longitud de onda de los fotones dispersados. La intensidad de dispersión deja de depender en este momento de la dirección.

Considerando la reflectividad, son preferibles partículas grandes, ya que tras lo explicado anteriormente, la dispersión de luz aumenta con el tamaño de las partículas. Esto entra en conflicto con el anterior requerimiento por lo que hay que llegar a una situación de compromiso entre ambos.

2.2.2 Iluminación

En el desarrollo del estudio se utiliza una fuente de iluminación láser de iluminación pulsada. Los sistemas pulsados son los más utilizados porque al iluminar con un pulso de muy corta duración, las partículas aparecen como paradas ante la cámara.

La obtención de una lámina láser se consigue mediante la combinación de una lente cilíndrica, que expande la láser en una dirección; con otra esférica que lo enfoca posteriormente a la distancia focal haciéndola converger hasta el mínimo espesor para luego volver a divergir.

2.2.3 Sistema de registro

El registro de las imágenes se lleva a cabo mediante una cámara digital. En el método actual de PIV la cámara se combina con el uso de la transformada rápida de Fourier, con la que se ha sacrificado ligeramente la calidad a fin de obtener una mayor rapidez.

A la hora de considerar el tamaño de imagen de partícula hay que considerar el efecto geométrico y el de difracción. Considerando unos valores habituales, se puede hacer una estimación en la que se obtiene que el efecto de difracción es mayor frente al geométrico.

2.2.4 Procesado y análisis de las imágenes

En el procesado y análisis de las imágenes se tiene como objetivo determinar el desplazamiento que han tenido las partículas entre los dos instantes considerados. El más utilizado es la correlación, que puede ser sobre una sola imagen (autocorrelación) o sobre dos imágenes monopulso (correlación cruzada).

Una vez conocido el desplazamiento de las partículas, puede calcularse la velocidad. En el post-procesado se analizan los resultados, que se suelen presentar mediante mapas de vectores de velocidad en los que se puede apreciar perfectamente el movimiento del flujo, así como su magnitud ya que los vectores aparecen escalados. Se tendrá por lo tanto una caracterización en un plano del flujo que se ha buscado estudiar.

Capítulo 3. Descripción de la instalación experimental

Índice del capítulo 3

3	Descripción de la instalación experimental	23
3.1	Descripción de la instalación hidráulica.....	24
3.1.1	Fluido.....	24
3.1.2	Partículas trazadoras	24
3.1.3	Circuito hidráulico	26
3.1.4	Válvulas de esfera	27
3.1.5	Válvulas de aguja	28
3.1.6	Depósito de descarga	29
3.1.7	Bomba hidráulica de engranajes	29
3.1.8	Modelo	32
3.2	Dispositivos de medida	33
3.2.1	Fuente láser	33
3.2.2	Cámara oscura	34
3.2.3	Guillotina	35
3.2.4	Cámara digital	35
3.2.5	Sincronizador	36
3.2.6	Unidad de procesado	37
3.3	Dispositivos auxiliares	37
3.3.1	Caudalímetro de ultrasonidos	37
3.3.2	Sensores de presión	39
3.3.3	Softwares	41

3 Descripción de la instalación experimental

En este capítulo se describen tanto los diferentes componentes que forman la instalación como su colocación dentro de la misma y su funcionamiento.

La instalación descrita se ha utilizado simultáneamente para dos estudios. En el primer estudio el modelo trabaja en unión y el fluido entra por dos ramas para abandonar el modelo por un solo conducto tras el mezclado. En el otro estudio, el fluido circula en sentido contrario y trabaja en bifurcación entrando el fluido al modelo por un único conducto y abandonándolo separado como dos corrientes por dos conductos diferentes. Este es un hecho relevante a la hora de comprender la complejidad del circuito hidráulico respecto al estudio que se detalla en esta memoria.

En las figuras 3.1 y 3.2 se puede ver la instalación utilizada (salvo la fuente láser que no aparece de las imágenes).

La instalación trabaja en flujo estacionario, menos al arrancar la bomba y el llenado o vaciado de la instalación; instantes que no afectan a la recogida de medidas.

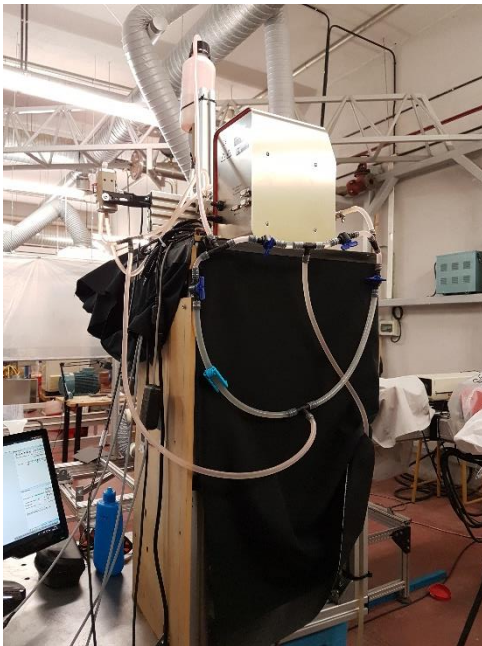


Figura. 3.1 Instalación desde la parte posterior.



Figura. 3.2 Instalación desde la zona de la toma de medidas

La descripción de la instalación se divide en dos bloques: la instalación hidráulica en la que se consideran todos los elementos que interactúan directamente con el flujo y los dispositivos de medida que son los elementos necesarios para la adquisición de las medidas del patrón de flujo y datos de presiones y caudales.

3.1 Descripción de la instalación hidráulica

En este apartado se describen las características del fluido utilizado así como todos los elementos de la instalación por los que éste circula, que son los que conforman la instalación hidráulica.

3.1.1 Fluido

El fluido que se ha utilizado para la realización del experimento es una mezcla de glicerina y agua destilada en unas proporciones de 61% y 39% en peso respectivamente. El fluido resultante debe cumplir con unas determinadas condiciones (por ejemplo, debe tener un índice de refracción determinado) y esta proporción de la mezcla se conoce gracias a estudios realizados con anterioridad⁷. La densidad de la mezcla resultante (ρ_{mezcla}) es de 1153 kg/m³.

Se busca que las imágenes obtenidas sean lo más cercanas posibles a la realidad de lo que está pasando dentro del modelo, para eso es necesario que el índice de refracción del fluido sea lo más cercano posible al índice de refracción del material del que está construido el modelo. El láser debe atravesar las paredes del modelo y el fluido, por lo que si los índices de refracción de ambos difieren, el haz de luz se desvía y la sección que se ilumina no es el plano medio del modelo. Las imágenes recogidas no serían representativas.

El índice de refracción de la mezcla es de 1.413, mientras que el del modelo es de 1.457. Ambos coeficientes están lo suficientemente próximos como para que las imágenes recogidas sean buenas.

índice de refracción de la mezcla es de 1.4129, mientras que el de los modelos de metacrilato y silicona es de 1.49 y 1.457, respectivamente. Se considera que el índice de refracción del fluido es lo suficiente próximo para que funcione correctamente.

Como se ha mencionado, las propiedades del fluido son dependientes de la temperatura a la que se encuentre el mismo, los datos arrojados anteriormente corresponden con una temperatura de 20°C.

3.1.2 Partículas trazadoras

Las partículas trazadoras son pequeñas partículas que se mueven en el seno del fluido sin perturbar su comportamiento, por lo que su velocidad es representativa de la que tiene el fluido. Calculando la velocidad que llevan

⁷ García Carrascal P. (2015)

3. Descripción de la instalación experimental

estas partículas se pueden extrapolar los resultados a la velocidad que lleva el fluido.

Son el principal elemento que caracteriza el movimiento del fluido, así que es importante que cumplan con una serie de características

- Deben seguir al fluido en su movimiento para una buena caracterización del mismo.
- Deben reflejar la luz al ser iluminadas para que pueda registrarse su posición correctamente.
- Deben estar en una concentración adecuada.

Que las partículas sigan al fluido en su movimiento depende de la densidad y el tamaño de las partículas. Si la densidad de la partícula difiere de la del fluido éstas no lo acompañaran correctamente en su movimiento y por lo tanto los resultados del movimiento de las partículas no serían extrapolables al fluido.

La luz que reflejan las partículas no depende solo de sus propiedades, sino que también influye en gran manera el sistema de iluminación láser y la potencia con la que esté funcionando.

La concentración de las partículas influirá en el que los resultados que se tengan sean buenos o no. Una concentración elevada en el fluido reflejará demasiada luz de forma que el programa no será capaz de discernir la posición de cada una de las partículas (problema similar a una potencia elevada del láser). Una baja concentración de las mismas, aunque fácilmente solventable, no proporcionaría suficientes datos en el seno del fluido como para tener una buena caracterización de la velocidad del mismo.

La concentración de partículas queda de mano de la experiencia y no puede conocerse con total seguridad la concentración adecuada sin ensayos de prueba y error.

Por sus características, las partículas pueden pegarse entre sí produciéndose conglomerados. Esto varía su tamaño y por lo tanto produce errores en los resultados.

Tabla 3.1 Propiedades de las partículas trazadoras. Fuente: Pozo Álvarez A. (2018)

Proveedor	Dantec Dynamics
Tipo	Partículas de polímero fluorescente (FPP)
Tamaño medio	15 μm
Densidad	1190 kg/m^3
Velocidad terminal en el fluido de trabajo	34,5 $\mu\text{m}/\text{min}$

Las partículas utilizadas en el experimento son de un polímero fluorescente FPP, que son las que mejor se ajustan a las características buscadas (tabla 3.1). Poseen una forma esférica y su densidad se aproxima

mucho a los 1153 kg/m^3 que posee el fluido. El tamaño de las partículas utilizadas es de $15\mu\text{m}$ un tamaño suficientemente grande para que no sea muy costoso tanto la recogida de datos como el análisis, y suficientemente pequeño para que siga adecuadamente el movimiento del fluido sin perturbarlo.

3.1.3 Circuito hidráulico

Cada uno de los elementos que componen la instalación hidráulica (depósito, bomba, modelo y válvulas) están unidos por tubos flexibles para facilitar la instalación y mantenimiento. Todos estos elementos conforman el circuito hidráulico. En las entradas y salidas al modelo, los tubos son más rígidos de forma que al sufrir menores deformaciones se mantenga mejor la presión.

El circuito hidráulico se ve complicado por el hecho de que se quiere cambiar el sentido del flujo que atraviesa el modelo de manera rápida y sencilla. El cambio del sentido del flujo se puede hacer abriendo o cerrando determinadas válvulas (figura 2.3). Sin esta distribución sería necesario vaciar la instalación para realizar las desconexiones oportunas en el circuito y que el flujo pudiera circular en el sentido contrario. Para unir cada uno de los tramos de las bifurcaciones son necesarias uniones del tipo T.

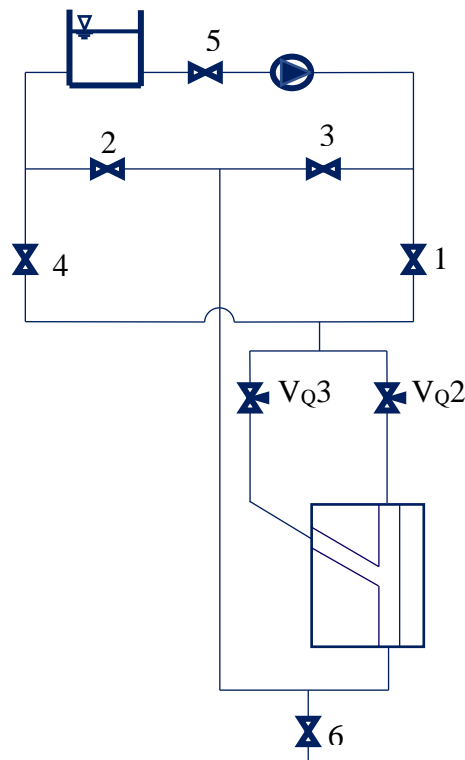


Figura. 3.3 Esquema hidráulico de la instalación

La Figura. 3.3 muestra el esquema de la instalación hidráulica que tras configurarse para trabajar en unión cerrando las válvulas 3 y 4. Cerrando las válvulas 1 y 2 el fluido cambia el sentido del flujo al atravesar el modelo. Por lo

tanto, las válvulas de la 1 a la 4 sirven para cambiar el sentido del flujo que circula por el modelo. Por precaución es conveniente no cerrar todas estas válvulas al cambiar el sentido del flujo; sino abrir todas y después cerrar las que conviene en función de la disposición que se desee. La válvula 5 sirve para el vaciado del depósito superior y la válvula 6 permite un vaciado rápido de la instalación a un depósito externo.

Considerando una configuración de la instalación en unión el fluido se toma del depósito de descarga gracias a la bomba, que lo impulsa como un único caudal por el ramal de la válvula 1 hasta llegar a una T que lo bifurca para que pueda entrar al modelo como dos corrientes. Dentro del modelo ambas corrientes se mezclan y salen como una única corriente que regresa al depósito de descarga por el ramal de la válvula 2.

Durante la recogida de medidas no circula fluido por todo el circuito hidráulico, sin embargo, todo el circuito debe estar lleno de fluido en todo momento.

3.1.4 Válvulas de esfera

Las válvulas de esfera o válvulas todo o nada son un tipo de válvula que solo trabajan en dos posiciones, o están abiertas y permiten el paso del fluido, o están cerradas y lo estrangulan completamente. Cuando no están cerradas del todo pueden estrangular ligeramente el flujo, pero este tipo de válvulas no están preparadas para trabajar en estas condiciones.

Debido a su distribución dentro del circuito hidráulico, estas válvulas permiten cambiar el sentido del flujo que pasa por el modelo de forma rápida y sencilla. La posición de estas válvulas, ya descritas en el esquema de la Figura 3.3 se encuentra especificada sobre la imagen del circuito real en la Figura 3.4. Tal y como está la disposición de las válvulas en esta Figura. 3.4, la instalación se encuentra en bifurcación.

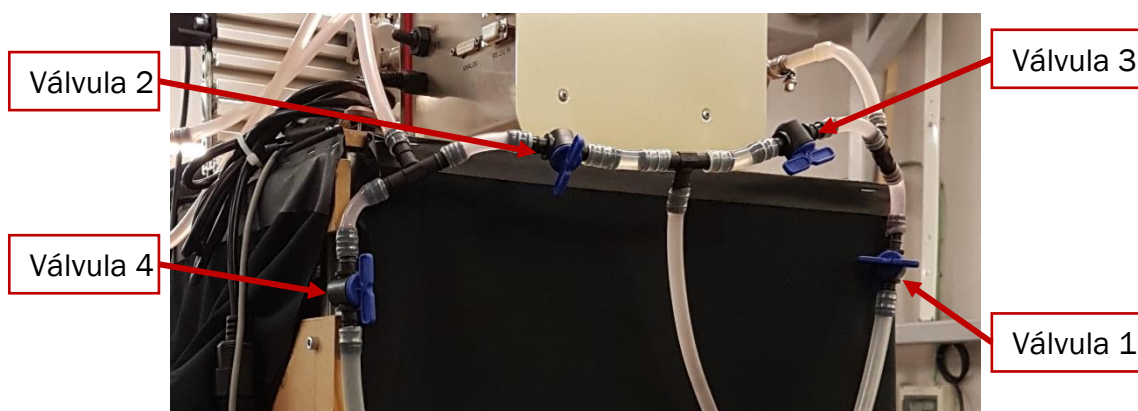


Figura. 3.4 Posición de las válvulas para el cambio del sentido del flujo que circula por el modelo

Las principales válvulas de la instalación son:

- 1 y 2: Cerrándolas el circuito trabaja en bifurcación. Válvulas que atraviesa estando en unión.
- 3 y 4: Cerrándolas la instalación trabaja en unión.
- 5: Válvula para el vaciado del depósito superior
- 6: Válvula para el vaciado de la instalación

3.1.5 Válvulas de aguja

Las válvulas de aguja constan de un vástago cónico que en función de su posición obstruye más o menos un orificio de paso (Figura. 3.5). El desplazamiento de este vástago se produce gracias a una rosca de paso fino, por lo que se garantiza un gran control sobre el caudal de lo atraviesa.

Las válvulas de aguja están colocadas en los dos ramales de entrada del fluido al modelo (Figura. 3.6) de forma que se permite un control de gran precisión del caudal que pasa por cada uno de ellos. Así pues, estas válvulas controlan la relación de caudales con una variación de ± 0.01 , jugando con su apertura y cierre. Las válvulas utilizadas en la instalación son de la marca Genebre de acero inoxidable.

Mediante las válvulas V_{Q2} y V_{Q3} se controla el caudal que pasa por los ramales 2 y 3 respectivamente.



Figura. 3.5 Esquema de una válvula de aguja
Fuente: : www.valvias.com/tipo-valorva-de-aguja.php

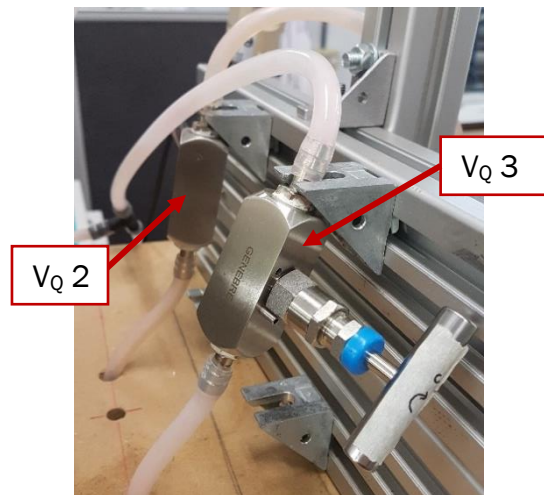


Figura. 3.6 Posición de las válvulas de control de caudal

3.1.6 Depósito de descarga

El depósito de descarga almacena el fluido una altura constante para unas condiciones de funcionamiento dadas. Está formado por una botella de plástico que se une directamente a la entrada de la bomba y se encuentra en la parte superior del circuito (Figura. 3.7); de forma se favorece el cebado de la bomba y un llenado rápido de todo el circuito.



Figura. 3.7 Depósito de descarga

Su función consiste en garantizar el suministro de fluido a la bomba con una presión constante que evite que se produzca cavitación en la entrada y recoger el fluido que ha pasado por todo el circuito.

3.1.7 Bomba hidráulica de engranajes

3.1.7.1 Funcionamiento de una bomba de engranajes

Una bomba de engranajes es una máquina de fluido de desplazamiento positivo; es decir, impulsan un volumen independientemente de las revoluciones del motor o de la presión. Existen las bombas de engranajes externos e internos. En las bombas de engranajes externos, existe un buen ajuste entre los engranajes. El fluido pasa a través del espacio entre los dientes y por su periferia. Está formado por dos engranajes, como se ve en la Figura. 3.8, uno es movido por un motor eléctrico que induce el movimiento en el otro. En la cámara de admisión se produce una depresión que provoca la aspiración del fluido y el movimiento de los engranajes lo hace avanzar.

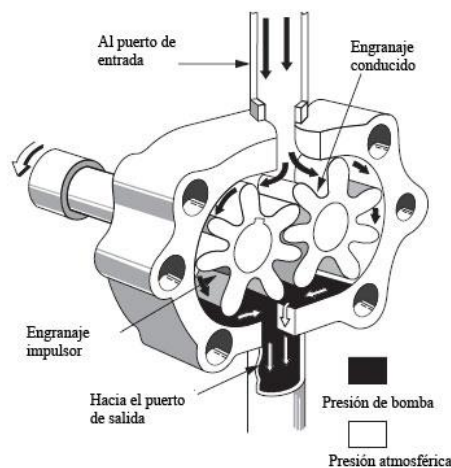


Figura. 3.8 Esquema de una bomba de engranajes.

Fuente: <http://industrial-automatica.blogspot.com/2011/08/bombas-hidraulicas-2-bombas-de.html>

Su principal ventaja es que el caudal impulsado es función del número de revoluciones a partir de una constante, según la ec. 3.1. También permite un gran control sobre el resto de las variables que intervienen en el flujo, como lo

es la velocidad de giro, la presión y el tiempo. A pesar de esto, este tipo de bombas presentan la desventaja de que no pueden usarse en un medio que contenga partículas.

$$Q_{bomba} = C_1 \cdot n \quad \text{ec. 3.1}$$

La constante C_1 incluye datos referidos a parámetros de los engranajes: el número de dientes, el módulo del dentado, la longitud del diente y el número π .

El caudal que pasa por la bomba se regula a partir del número de revoluciones a la que está funcionando; que es el parámetro que se controla durante el desarrollo del estudio. Las máximas revoluciones a las que puede trabajar la bomba son 6000rpm.

Este tipo de bombas proporcionan un flujo homogéneo y pueden trabajar con líquidos de elevadas viscosidades. Sin embargo, los engranajes solo pueden trabajar con velocidades moderadas, no permiten generar un flujo inverso y no están recomendados para flujos en los que haya partículas, lo que puede causar problemas en el análisis con PIV.

El cabezal utilizado es del tipo que puede verse en la Figura. 3.10⁸, de succión, un cabezal patentado y de diseño exclusivo de Micropump products. Es una modificación a la bomba de engranajes de cavidad convencional (Figura. 3.9⁸). Este tipo de cabezales permiten mantener un flujo consistente con elevadas diferencias de presión. El inconveniente es que no puede producirse flujo en ambas direcciones. El flujo pasa entre los engranajes y por las paredes por las que se conduce. Sólo se usa una porción de la cavidad en la que se encuentran los engranajes.

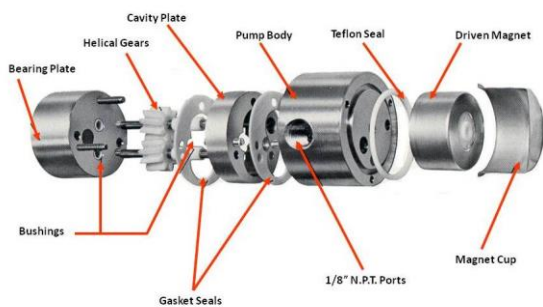


Figura. 3.9 Cabezal de cavidad convencional

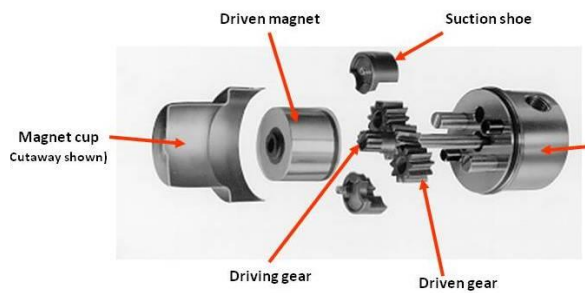


Figura. 3.10 Cabezal de succión

⁸ Fuente: <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/pumps/positive-displacement-pump/micropump-cavity-style-pump-design>

3.1.7.2 Características del modelo de bomba utilizado

La bomba que impulsa el fluido dentro del circuito es una bomba de engranajes de la marca Ismatec modelo MCP – Z Process (ver Figura. 3.11). Algunas características de la bomba (como el máximo caudal impulsado) dependen del cabezal utilizado, que en este caso es el cabezal Z-183 MI0008. Aunque no se ha utilizado durante este experimento, este modelo de bombas es programable y permite la implementación de programas de funcionamiento desde un ordenador a partir de la interfaz de conexión de RS232.



Figura. 3.11 Bomba de engranajes MCP - Z Process
Fuente: catálogo de Ismatec.

Tabla 3.2 Características de la bomba hidráulica y el cabezal utilizados. Fuente catálogo Ismatec

Marca	Ismatec
Modelo	MCP – Z Process
Tipo de motor	Motor de corriente continua
Consumo de potencia eléctrica	200 W
Rango de velocidades	60 – 6000 rpm (1rpm de resolución)
Rango de caudales	1 – 7020 ml/min (dependiendo del cabezal utilizado)
Diferencia de presiones	5.2 bar (dependiendo del cabezar utilizadoo)
Profundidad, ancho, altura	260, 160, 262 mm (sin cabezal)
Peso	6.9 kg (sin cabezal)
Cabezal utilizado / denominación	Z- 183 / MI 0008
Caudal máximo (depende del cabezal)	504 ml/min con el cabezal utilizado
Diferencia de presiones máxima	2.8 bar con el cabezal utilizado

En la tabla 3.2 pueden verse las características más importantes tanto de la bomba como del cabezal utilizados.

La bomba posee un panel de control con el que se puede encender, apagar y controlar diferentes parámetros. El parámetro de la bomba que se ha controlado en el desarrollo del experimento ha sido el régimen de giro. Aunque las revoluciones de la bomba se pueden controlar desde el ordenador, se ha optado por seleccionarlas desde el panel de control de la propia bomba.

3.1.8 Modelo

En el desarrollo del experimento se ha considerado un único modelo de silicona formado por dos entradas y una salida nombradas de la forma especificada en la Figura 3.12. En esta figura puede verse también el sistema de ejes que se ha considerado a fin de facilitar el análisis. No interesa tanto el origen del sistema de ejes como la dirección de dichos ejes. El eje x está considerado de forma que siga el sentido marcado por el láser, el y tiene la dirección del conducto 1 que es en el que se produce la mezcla y el z parte del plano medio del modelo. Hay que tener en cuenta que los sistemas de ejes que aparecen en los resultados no concuerdan con este.

Se ha considerado como conducto 1 el de salida al ser el conducto en el que se forma la mezcla y por ser el Re de este conducto el que se considera en los análisis. A partir de los datos de la bomba conoce el caudal que circula por este conducto, y por lo tanto la velocidad del fluido en el conducto 1.

Los dos ramales superiores corresponden con las dos entradas del fluido en el modelo. La entrada 2 está alineada con el conducto de salida en la dirección del eje y, y la 3 forma un ángulo de 45° respecto a esta.

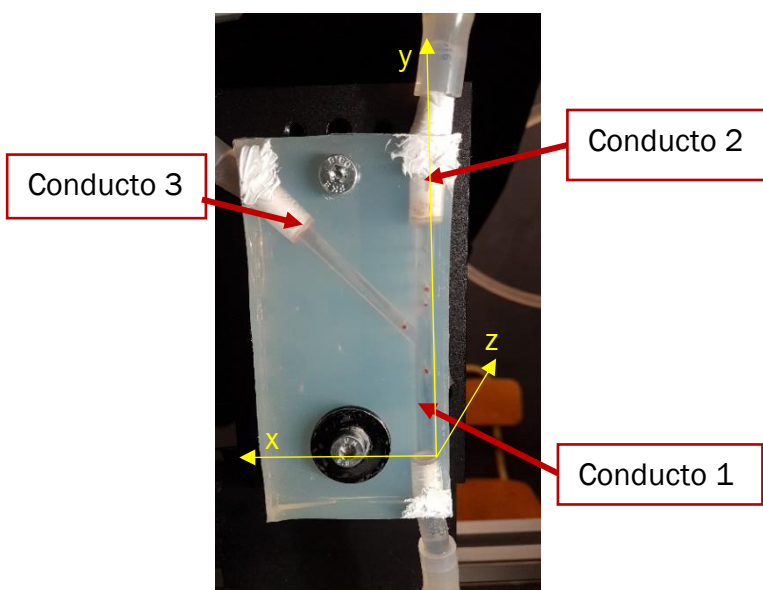


Figura. 3.12 Modelo de silicona, conductos y ejes

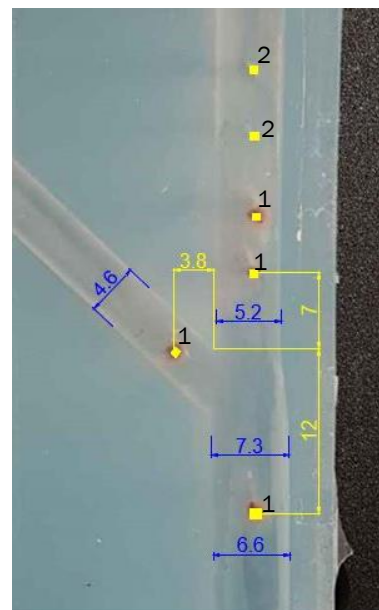


Figura. 3.13 Modelo con las cotas más significativas

De cara al estudio, las dimensiones del modelo que son relevantes son los diámetros del conducto con los que se calcula el número de Reynolds. Estos diámetros se denominan como: D_1 , D_2 y D_3 siguiendo la nomenclatura de los conductos y son: 6.6, 5.2 y 4.6, respectivamente.

A lo largo del modelo hay introducidos seis hilos de sección cuadrada que perturban el patrón del flujo por lo que deben estar correctamente señalizadas e identificadas. La posición en la que se encuentran estos hilos se ve en la Figura. 3.13 Modelo con las cotas más significativas 3.13 en la que también se han señalado en ella los dos tipos de hilos que se encuentran en el modelo. El 1 denota los hilos de lado 0.5mm y el 2 los de 0.61mm de lado.

3.2 Dispositivos de medida

En este apartado se describen todos los elementos de la instalación necesarios para desarrollar la técnica de velocimetría de imágenes de partículas.

3.2.1 Fuente láser

La fuente láser es la encargada de iluminar las partículas de forma pulsada de forma que la cámara pueda adquirir los datos. Para poder obtener dos imágenes separadas por un intervalo de micras de segundo se necesita que el láser genere dos señales muy próximas en el tiempo entre sí; para lograrlo se dispone de dos fuentes de emisión láser, cuya potencia se controla de forma separada. En el interior se dispone de una lente cilíndrica que transforma el haz de luz puntual en una línea. En la Figura 3.14 se muestra la fuente láser sobre un soporte que permite regular su altura de manera precisa, y en la Tabla 3.3 se especifican sus características.

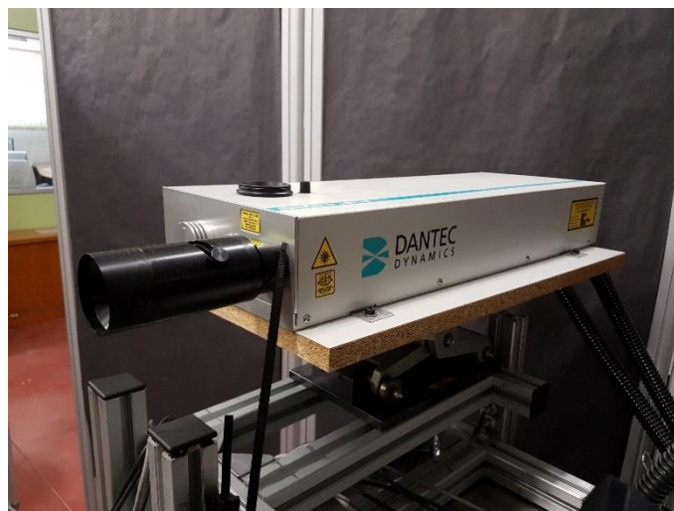


Figura. 3.14 Fuente láser sobre el soporte

Tabla 3.3 Características de la fuente láser. Fuente: Pozo Álvarez, A. (2018)

Proveedor	Dantec Dynamics
Tipo	Dual Power Nd: YAG 500 mJ (250 mJ cada uno)
Frecuencia máxima entre disparos	14.5 Hz (Single Frame) 7 Hz (Double Frame)
Longitud de onda	532 nm
Ancho de la lámina láser	2 mm (se reducen a 0.2 o 0.1 mm)

La potencia láser se controla de manera manual buscando conseguir una iluminación adecuada de las partículas. La potencia no puede ser muy baja porque el reflejo de las partículas no sería suficiente y el software no podría distinguir las partículas correctamente. Tampoco puede ser muy elevada ya que las partículas reflejarían demasiado y tampoco se distinguirían correctamente las partículas. Es necesario comprobar la potencia de ambas fuentes de emisión láser para cada adquisición de datos, y en caso de que no sea la correcta ajustar la de cada una independientemente.

Mediante el software de adquisición de datos puede controlarse el tiempo entre disparos del láser. Este tiempo es fundamental para un correcto procesado de los datos. En función de la precisión que se busque en el procesado este tiempo deberá ser mayor o menor.

Se encuentra situado sobre un elevador mecánico que permite conseguir una altura apropiada para que el haz láser atravesase correctamente la guillotina. Un buen ajuste del sistema láser permite una buena iluminación y por lo tanto una buena toma de medidas.

3.2.2 Cámara oscura

La cámara oscura es el recinto dentro del cual se realiza la toma de medidas. Consta de un techo rígido del que cuelgan tres cortinas opacas de color negro y una pared de cartón con una rendija por la que pasa el haz láser.

En su interior se sitúa el modelo y la cámara digital. Tiene como objetivo reducir el paso de luz desde el exterior de forma que se consiga tener la mayor oscuridad posible. Se busca que la única fuente de luz en el interior de esta cámara provenga del emisor láser.

3.2.3 Guillotina

La guillotina es una lámina de metal con una fina ranura en el medio que se sitúa dentro de la cámara oscura entre el modelo y la fuente de emisión láser.

Su función reducir el espesor del haz láser de forma que sólo la parte central del láser, que tiene mayor intensidad, sea la que llegue hasta el modelo. Así se consigue que se refleje con mayor facilidad en las partículas fluidas. Cuanto menor sea la relación entre el diámetro del tubo y el espesor de la luz láser mejor será la resolución de las medidas.

En este caso la guillotina reduce el espesor de la lámina láser de 2mm a 0,2 ó 0,1 mm. En la Figura 3.15 se puede ver la guillotina y al fondo la ranura por la que pasa el haz láser dentro de la cámara oscura.



Figura. 3.15 Guillotina

3.2.4 Cámara digital

La cámara digital es la encargada de obtener las imágenes que se procesan posteriormente con el ordenador para obtener los resultados. La cámara registra las partículas cuando éstas son iluminadas por el haz láser.

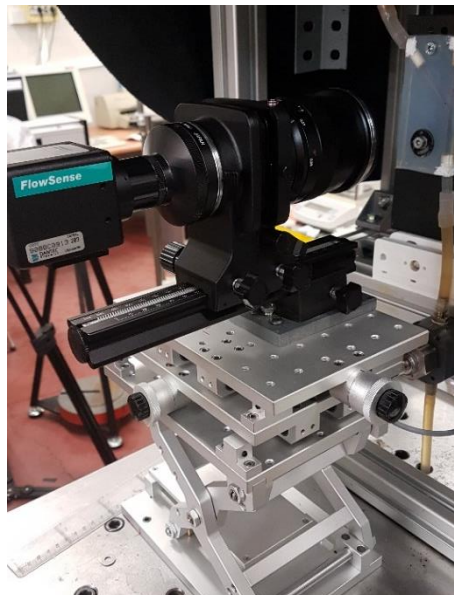


Figura. 3.16 Cámara digital sobre el soporte

El objetivo de la cámara debe estar lo más perpendicularmente posible al modelo, para poder obtener buenas imágenes de la sección deseada. Considerando esto, la cámara se coloca en sobre una mesa que permite el movimiento en tres ejes perpendiculares entre sí: eje vertical, eje paralelo al modelo y eje perpendicular al modelo. Este sistema de sujeción permite mover

la región de enfoque y por lo tanto la de estudio de forma precisa. Se puede subir y bajar la cámara, moverla de forma perpendicular al modelo y controlar su profundidad acercándola o aleándola al modelo.

En la Figura. 3.16 se puede ver la cámara frente al modelo, situada sobre el soporte de ajuste de posición. La ruleta del soporte situada a la derecha permite mover la cámara transversalmente al modelo. Además, una ruleta situada simétricamente al otro lado permite subir y bajar la cámara para ajustar correctamente la región de estudio. Una vez decidida la posición de la cámara, el enfoque puede ajustarse de forma más precisa con la ruleta de la parte trasera del soporte.

La cámara cuenta con una serie de accesorios:

- Filtro. El filtro elimina el ruido procedente de la iluminación natural permitiendo solamente el paso de la iluminación de las partículas fluorescentes. El filtro está polarizado para una longitud de onda de 570 nm, con lo que solo permite el paso de la luz que tenga una longitud de onda mayor.
- Fuelle. El fuelle permite variar la distancia focal de la cámara al comprimirse o estirarse. Al estirarse el fuelle la distancia focal aumenta y se aumenta el enfoque de la imagen, se hace zoom a la imagen. Por el contrario, si se comprime el fuelle, disminuye la distancia focal y la imagen abarca una zona mayor; tiene menor enfoque.

Tabla 3.4 Características de la cámara digital. Fuente: Pozo Álvarez, A. (2018)

Proveedor	Dantec Dynamics
Modelo	FlowSense 4M MkII
Tipo	Full Frame
Resolución	2048 x 2048
Resolución de datos	8, 10 ó 12 bits por píxel
Tiempo mínimo entre capturas	14.5 Hz (Single Frame) 7 Hz (Double Frame)
Tarjeta de comunicación	PCIe 1427

El tiempo mínimo entre capturas de la cámara viene limitado por la capacidad del láser.

3.2.5 Sincronizador

El sincronizador es un dispositivo fundamental para poder recoger correctamente las imágenes para la técnica PIV. Este dispositivo controla la cámara y el láser de forma que los disparos desde el dispositivo láser y las capturas desde la cámara se produzcan de manera sincronizada. Al ser el haz

láser pulsado, es necesario que la cámara capture las imágenes en el instante en el que se está iluminando el modelo y no otro.

La cámara, el láser, así como el software de control deben ser compatibles con el sincronizador.

3.2.6 Unidad de procesamiento

Es necesario un sistema operativo que facilite el control del equipo (láser y cámara digital) y permita un análisis de los datos recogidos. El software de control utilizado es DynamicStudio v3.14 de DANTEC Dynamics, y es compatible con todos los elementos que conforman el PIV. Este software es el encargado de controlar el sincronizador, y actuar sobre el láser y la cámara.

3.3 Dispositivos auxiliares

Además de los dispositivos que conforman la instalación del PIV, son necesarios una serie de dispositivos con los que poder recoger los datos de caudal y presión. A su vez se ha utilizado un software de tratamiento de las imágenes procesadas.

3.3.1 Caudalímetro de ultrasonidos

El caudalímetro de ultrasonidos permite la medida del caudal del flujo que lo atraviesa de manera no intrusiva. Estos caudalímetros permiten recoger de forma rápida el caudal que circula por una tubería.

El caudalímetro utilizado es de la marca Sonotec y a su vez permite medir la temperatura. Las características del caudalímetro se detallan en la tabla 3.5.



Figura. 3.17 Caudalímetro y colocación en la instalación

Tabla 3.5 Características del caudalímetro SONOFLOW IL 52/4. Fuente: catálogo Sonotec

Proveedor	Sonotec		
Modelo	SONOFLOW IL 52/4		
Principio de medida	Ultrasonidos		
Caudal máximo	6.0 l/min		
Precisión agua 23 ± 2 °C y 1 bar	0 - 0.06 l/min: ± 0.6 ml/min		
	0.06 - 6 l/min: ± 1.0%		
Ciclo de medida	Normalmente 20 ms		
Adaptador para la conexión del tubo	Diámetro de salida: 8mm Diámetro de entrada: 4mm		
Medición de temperatura	Sensor integrado (± 1 °C)		
Conector eléctrico	Conector de M12		
Tensión de alimentación	12 - 30 V (Corriente continua)		
Corriente máxima requerida	100 mA		
Rango de temperaturas	Fluido 0 - 140 °C	Ambiente 0 - 70 °C	Almacenamiento -20 - 70 °C
Calibración de fábrica	Agua a 23 ± 2 °C salida tubos despresurizados (0 bar)		
Dimensiones	122 x 64 x 46 mm		
Peso	350 g		

El aparato viene con una calibración de fábrica cuyas condiciones de funcionamiento no tienen por qué coincidir con las que trabaja en la instalación. Por ello es necesario calibrarlo para las condiciones tanto de presión como de temperatura a las que trabaja durante la realización del experimento. La calibración que se ha realizado se detalla en el apartado 0 Calibración del caudalímetro.

A fin de obtener unos resultados correctos, el caudalímetro debe estar colocado de tal forma que el fluido lo atraviese de abajo a arriba, en sentido inverso al sentido de la gravedad, lo que evitará que se quede aire dentro del aparato. Por lo tanto debe estar colocado de forma vertical. A su vez, el fluido debe atravesar el aparato de forma que siga el sentido indicado por la flecha que aparece en la carcasa del mismo. La forma correcta de instalación del caudalímetro se puede ver en la Figura 3.17.

3.3.2 Sensores de presión

La instalación cuenta con tres sensores de presión, uno en cada uno de los ramales. Con estos sensores se tienen las presiones a la entrada del modelo por cada uno de los ramales y la presión resultante a la salida del modelo. Se han utilizado dos modelos diferentes de sensores de presión: dos de la marca RS y uno de la marca JUMO, a continuación se detallan las características de cada uno de ellos.



Figura. 3.18 Sensores de presión en la instalación

Los sensores de presión pueden medir desde presión absoluta a manométrica. Los sensores de presión constan de dos partes: el captador y el acoplamiento. El acoplamiento tiene dos conexiones para los tubos hidráulicos, uno de salida y otro de entrada y sobre él va roscado también el captador.

El modelo de sensor RS – GM1p1 – 5C de la marca RS que puede verse en la Figura. 3.18, es un sensor piezorresistivo cerámico. Es un sensor con el que se miden presiones manométricas de los conductos 1 y 3.



Figura. 3.20 Soporte del sensor de presión



Figura. 3.19 Sensor de presión IPSS - GM1P1 - 5C. Fuente: catálogo RS.

El sensor se fija al circuito gracias a una pieza de acople, Figura 3.19, que posee cuatro taladros con los que puede fijarse su posición dentro del circuito en el que se quiere medir la presión. En la figura 3.20 puede verse la rosca del sensor con la que se fija al soporte.

Tabla 3.6 Características del sensor IPSS - GM1P1 - 5C. Fuente: catálogo RS

Proveedor	RS
Modelo	IPSS - GM1P1 - 5C
Rango de presiones medidas (manométricas)	-1 - 1 bar
Precisión	± 0.156% FS BFSL
Salida analógica	4 - 20 mA
Tensión de alimentación	9 - 32 V (corriente continua)
Corriente máxima	28 mA
Rango de temperaturas de trabajo	-20 - 125 °C
Material de la carcasa	Acero inoxidable

En el conducto 2 se encuentra un sensor de la marca JUMO tipo dTRANS p30 TYP404366/000 TN45006500. Este sensor es también del tipo piezorresistivo (Figura. 3.21 Sensor de presión JUMO Figura. 3.21).



Figura. 3.21 Sensor de presión JUMO.
Fuente: Catálogo JUMO

Tabla 3.7 Características del sensor de presión JUMO. Fuente: catálogo JUMO

Proveedor	JUMO		
Modelo	dTRANS p30 TYP 404366 / 000 TN45006500		
Rango de presiones medidas (manométricas)	0 - 0.25 bar		
Precisión	± 0.156% FS BFSL		
Salida analógica	4 - 20 mA		
Tensión de alimentación	10 - 30 V (corriente continua)		
Rango de temperaturas	Fluido: 30 - 140 °C	Ambiente: -20 - 100 °C	Almacenaje: -40 - 125 °C
Material de la carcasa	Acero inoxidable		
Peso	200 g		

3.3.3 Softwares

3.3.3.1 Tecplot

Tecplot es un software de procesado y tratamiento de datos para su posterior visualización y análisis. Se ha utilizado para el tratamiento de los datos obtenidos mediante la técnica de PIV.

3.3.3.2 Software de recogida de datos presiones y caudales

Se ha utilizado un software propio para mostrar por pantalla los datos recogidos por el caudalímetro y los sensores de presión.

Capítulo 4.

Metodología experimental

Índice del capítulo 4

4	Metodología experimental	45
4.1	Preparación previa de la instalación	45
4.1.1	Puesta a punto de la instalación hidráulica	46
4.1.1.1	Sujeción y conexión del modelo	46
4.1.1.2	Preparación de la mezcla	47
4.1.1.3	Llenado y vaciado de la instalación	48
4.1.2	Ajuste del sistema láser y guillotina	50
4.1.3	Ajuste de la cámara digital	52
4.1.3.1	Enfoque del modelo	52
4.1.3.2	Ajuste y centrado de la imagen	53
4.1.3.3	Control de la iluminación	54
4.1.4	Ajuste de paralelismo	55
4.1.5	Calibración del caudalímetro y la bomba	57
4.2	Medidas	59
4.2.1	Zonas de medida	60
4.2.2	Medidas realizadas	61
4.2.2.1	Análisis de un mezclador	62
4.2.2.2	Análisis de torbellinos	63
4.2.3	Ajuste del tiempo entre disparos	63
4.2.4	Adquisición de las imágenes con el programa y calibración	64

4.3	Procesado de las imágenes.....	65
4.3.1	Generación de la máscara	65
4.3.1.1	Máscaras utilizadas en las diferentes vistas	66
4.3.1.2	Máscaras utilizadas para los torbellinos	66
4.3.2	Eliminación del mínimo	67
4.3.3	Correlación promediada.....	67
4.3.4	Importancia del tratamiento de las imágenes.....	68

4 Metodología experimental

Los resultados experimentales obtenidos con la instalación descrita en el capítulo anterior deben ser válidos y coherentes; por lo que es necesario establecer un procedimiento de medida adecuado. Previamente a la adquisición de datos es necesario preparar y ajustar la instalación, así como comprobar que el buen funcionamiento de la misma durante todo el desarrollo del experimento.

El primer paso a llevar a cabo es la preparación preliminar de la instalación de forma que su puesta en funcionamiento sea correcta. Antes de comenzar cualquier serie de medidas es necesario asegurarse de que todas las conexiones, tanto de los dispositivos hidráulicos como eléctricos, son correctas. Un error en este ámbito deriva en una mala adquisición de los datos y un gran gasto de tiempo para averiguar de dónde proviene el fallo. Una vez se tienen todas las conexiones, la instalación se pone en marcha configurando unas determinadas revoluciones para la bomba.

Con el fluido circulando por la instalación se determina el plano del modelo en el que se quiere medir y se realizan los ajustes ópticos. El modelo se coloca en la posición adecuada para que la lámina de máxima intensidad del láser ilumine la sección de estudio del modelo. Igualmente se ajusta el enfoque de la cámara respecto a la sección en la que se va a medir.

4.1 Preparación previa de la instalación

Durante la preparación inicial de la instalación se posicionan cada uno de los dispositivos hidráulicos y eléctricos. Esta preparación solo es necesaria realizarla una vez y es el primer paso que hay que llevar a cabo antes de poder realizar cualquier medida. A fin de reducir trabajo a posteriori es importante realizar un buen montaje y conseguir un buen alineamiento de los distintos elementos de la instalación. Cuanto más se aproxime la situación inicial a la que deberían tener finalmente, menores serán los esfuerzos necesarios en los calibrados y alineamiento de los elementos.

La preparación inicial de la instalación se puede dividir en las siguientes etapas:

- Puesta a punto de la instalación hidráulica
- Ajuste del sistema láser y la guillotina
- Ajuste de la cámara digital
- Ajuste de paralelismo
- Calibración del caudalímetro

4.1.1 Puesta a punto de la instalación hidráulica

El primer paso que hay que llevar a cabo para la buena realización del experimento es el de la puesta a punto de la instalación hidráulica. Lo primero es realizar todas las conexiones hidráulicas y colocar el modelo sobre el soporte y conectarlo con el resto del circuito. La colocación del modelo solo se realizará una vez, sin embargo, la conexión con el resto del circuito será necesario realizarlo cada vez que se le quiera realizar una limpieza.

Debido a la necesidad de cambiar el sentido del flujo que atraviesa el modelo, el circuito hidráulico es más complejo y hay que tener en consideración un mayor número de uniones entre tuberías. Así pues, hay que asegurar que no se producen fugas en ningún punto del circuito.

Hay que asegurar que los captadores de presión y el caudalímetro están correctamente sujetos y sus conexiones son correctas.

En la puesta a punto del circuito hidráulico hay que tener cuidado de que no se produzcan salpicaduras o fugas que puedan caer sobre la cámara ya que esto podría llegar a estropearla. Para ello cada vez que se intervenga sobre el circuito habrá que prestar especial atención a la situación de la cámara, siendo conveniente alejarla lo máximo posible del modelo y cubrirla con una funda de un material impermeable.

4.1.1.1 Sujeción y conexión del modelo

La sujeción del modelo con el soporte se ha realizado mediante dos tornillos gracias a dos taladros que posee el modelo. Estos orificios deben estar colocados de tal forma que no se interpongan entre el haz láser y la zona de estudio, para no dificultar la iluminación y las medidas.

El modelo se sujeta a un soporte metálico dentro de la cámara oscura. La chapa a la que se atornilla el modelo está sujeta a otra por una esquina fija y otras dos sujeciones en las que se puede variar la distancia entre ambas chapas. De esta forma se pueden variar los ángulos del modelo en los ejes x e y y hasta lograr la alineación del modelo con el láser. El soporte es paralelo al plano xy por lo que al montar el modelo se intenta que la distancia entre ambas chapas sea la misma en todos los puntos y así se aproxima lo máximo posible a la alineación del modelo con el haz láser que va en la dirección x .

La chapa fija sobre la que se coloca el modelo está sujeta a un desplazador con el que se puede variar la posición del modelo respecto del eje z para que la lámina de máxima intensidad del láser coincida con el plano medio del modelo.

Las conexiones del modelo con el resto de elementos del circuito hidráulico se realizan con el modelo anclado al soporte. Es necesario que el

circuito hidráulico se conecte de forma que no se produzcan dobleces que aumenten las pérdidas de carga ni que pueda interferir con la cámara o el láser. Los tubos que salen del modelo son más rígidos que los que componen la instalación principal y para que las conexiones del modelo sean lo más estancas posibles están reforzadas con teflón.

Nota: Es importante asegurar que no haya fugas en las uniones del modelo con el circuito hidráulico. Fugas en las entradas al modelo pueden llegar a alterar los resultados.

Las paredes exteriores del modelo de silicona deben permanecer limpias para evitar que esto afecte a las imágenes captadas por la cámara. La limpieza exterior del modelo puede hacerse mediante un limpiacristales con el que no queden marcas.

4.1.1.2 Preparación de la mezcla

La mezcla debe tener unas propiedades especificadas en el apartado 3.1.1. De trabajos anteriores⁹ se tienen los cálculos necesarios para conocer las cantidades de agua y de glicerina necesarias para conseguir una determinada cantidad de mezcla. La concentración en masa de glicerina dentro de la mezcla es de un 61%, el resto de la mezcla lo compone agua destilada en un 39%.

A continuación se detallan los cálculos necesarios para conocer la cantidad de glicerina que hay que añadir a un volumen determinado de agua para obtener la disolución:

$$m_{agua} = V_{agua} \cdot \rho_{agua} = V_{agua} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \quad \text{ec. 4.1}$$

En la ecuación 4.1 se calcula la masa de agua a la que equivale el volumen de agua de partida a partir de su densidad que es igual a 1000 kg/m³. Dado que las concentraciones se tienen en masa, es necesario realizar el cálculo con las masas.

$$m_{mezcla} = \frac{m_{agua}}{C_{agua}} = \frac{m_{agua}}{0.39} \quad \text{ec. 4.2}$$

En la ec. 4.2 se calcula la masa de la mezcla a partir de la masa de agua y la concentración de agua que hay en la mezcla, que es 0.39.

$$m_{glicerina} = m_{mezcla} \cdot C_{glicerina} = m_{mezcla} \cdot 0.61 \quad \text{ec. 4.3}$$

Según la ecuación 4.3 se puede calcular la masa de glicerina a partir de la masa total de la mezcla y su concentración (0.61) dentro de ella.

⁹ Carrascal García, P. (2015)

$$V_{glicerina} = \frac{m_{glicerina}}{\rho_{glicerina}} = \frac{m_{glicerina}}{1249 \text{ kg/m}^3} \quad \text{ec. 4.4}$$

Por último, el volumen de glicerina que hay que añadir al volumen de agua original se obtiene dividiendo la masa de glicerina por su densidad, que es de 1249 kg/m^3 (ver ec. 4.4).

Con estas ecuaciones se tiene que para obtener 1L final de disolución son necesarios 445 mL de agua con 557 mL de glicerina.

Por último, se tiene que la densidad de la mezcla final se puede calcular mediante la ecuación ec. 4.5.

$$\rho_{mezcla} = \rho_{glicerina} \cdot C_{glicerina} + \rho_{agua} \cdot (1 - C_{glicerina}) \quad \text{ec. 4.5}$$

$$\rho_{mezcla} = 1261 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.61 + 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (1 - 0.61) = 1158 \text{ kg/m}^3$$

En la ecuación 4.5 se tienen las densidades de la glicerina y el agua para una temperatura de 24°C . Este será el valor utilizado para la densidad para los cálculos que se realicen del experimento.

4.1.1.3 Llenado y vaciado de la instalación

Este apartado está orientado de cara al mantenimiento de la instalación. Para evitar un deterioro de los tubos es conveniente que la instalación esté en todo momento llena de fluido. Sin embargo, ya que las partículas se pegan a las paredes, cuando no se quieran realizar medidas conviene dejar la instalación llena de agua destilada en vez de con la disolución para evitar un ensuciamiento de todo el circuito hidráulico. Es importante realizar un buen vaciado de la instalación ya que todo lo que queda dentro de la instalación cuando se llena de agua se deshecha pudiendo perderse así concentración de partículas con el coste que esto conlleva.

Por lo tanto, en cada jornada que se realicen diferentes medidas es necesario vaciar la instalación que se encuentra llena de agua y llenarla con la disolución de glicerina. Una vez se hayan recogido las medidas oportunas hay que vaciar la instalación de la disolución de glicerina y volver a llenarla de agua.

NOTA: Los llenados y vaciados de la instalación son parte del mantenimiento de la misma y son importantes para su buena conservación y para una buena obtención de resultados.

Llenado de la instalación

En el proceso de llenado de la instalación se dejan todas las válvulas abiertas, a excepción de la de vaciado de la instalación, que habrá que comprobar que esté cerrada. Al llenar el depósito superior puede que la válvula 5 esté cerrada, por lo que hay que abrirla y dejar que la bomba se cebe por

gravidad. Cuando la bomba está cebada, con la aspiración llena de fluido, puede ponerse en marcha la bomba.

Durante el desarrollo del experimento se constató que para un llenado más rápido convenía configurar la instalación en bifurcación y cerrar las válvulas 1 y 2. De esta forma se evita obligar al aire que se encuentra dentro del circuito a atravesar el modelo, de menor sección de paso; y se reduce el recorrido que tiene que hacer hasta salir al depósito.

También se tiene el hecho de que el ramal 2 presenta mayores dificultades para el llenado que el 3, por lo que hay que forzar que el fluido vaya por este conducto y expulse al aire residual. Para ello se cierra la válvula V_{Q3} obligando a que el fluido salga por el ramal 2.

Una vez se tiene todo el circuito vacío de aire puede cambiarse a la disposición en unión y proceder a la recogida de medidas.

NOTA: Hay que asegurar que no quede aire en la zona del caudalímetro que se encuentra en el ramal que presenta mayores dificultades en el llenado (ramal 2).

Vaciado de la instalación

La instalación consta de la válvula 6 para el vaciado del circuito. En el vaciado se abren todas las válvulas de la instalación y se deja que el agua se precipite en el recipiente colocado para tal fin tras la válvula 6. Se puede ayudar al vaciado mediante la bomba trabajando a no muy altas revoluciones teniendo cuidado de que no le llegue nunca aire a la bomba en funcionamiento.

Para vaciar el depósito superior se cierra la válvula 5 y se agita para recoger las partículas que se hayan podido quedar pegadas en las paredes del mismo.

NOTA: Es importante que tanto durante el llenado como el vaciado de la instalación, se asegure que no entra aire a la bomba en funcionamiento.

4.1.2 Ajuste del sistema láser y guillotina

La fuente láser se sitúa encima de una mesa que al poseer un elevador mecánico permite situarlo con facilidad; en la Figura 4.1 puede verse su colocación. Para que no se produzcan problemas con el disparador es necesario seguir una serie de pasos durante el encendido.

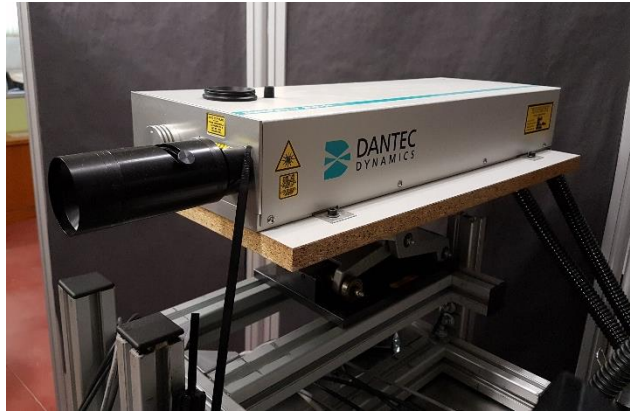


Figura. 4.1 Fuente láser

El primer paso que hay que realizar antes de encender el dispositivo es comprobar el nivel del refrigerante. Una vez asegurado que el nivel está por encima del mínimo, se puede proceder a encender la torre láser. La torre se enciende con un botón en la parte trasera y con una llave en la parte delantera (ver figura 4.2 en la que aparece la torre de alimentación apagada) que hay que girar hasta la posición on. Con esto queda encendida la torre de alimentación del láser.



Figura. 4.2 Fuente de alimentación del láser



Figura. 4.3 Mando de control del láser

El láser puede controlarse mediante el mando de control que puede verse en la Figura 4.3, activando el sistema con *system on*. Antes de encender el láser hay que poner en marcha el circuito de refrigeración del mismo, por lo que lo primero que hay que encender es la bomba hidráulica que alimenta de refrigerante el circuito pulsando *pump on*. Una vez encendida la bomba puede encenderse el láser con el botón *laser on*.

El disparador puede abrirse y cerrarse con el controlador citado anteriormente mediante los botones *shutter open* y *closed* respectivamente.

Esto es muy útil dado que permite cerrar la boquilla de salida del haz láser sin necesidad de parar el láser. Es una característica importante a la hora de garantizar la seguridad durante el manejo del sistema sin reducción de la comodidad.

En este momento ya pueden realizarse los disparos con la lámina láser controlando la potencia con este mismo mando. Durante la toma de medidas puede controlarse en cualquier momento la potencia de la lámina láser, controlándose de forma independiente las dos bandas de disparo.

La lámina que dispara el láser debe incidir de forma perpendicular a la cara lateral del modelo después de haber pasado a través de la guillotina y la apertura hacia la cámara oscura. Considerando un montaje y ajuste perfectos, se tendría una lámina láser completamente vertical y paralela al plano xy que con un buen ajuste del modelo incidiría en su plano medio con la zona de mayor intensidad del haz láser. El ajuste de la entrada del láser a la cámara oscura se hace mediante el elevador mecánico.

Considerando la formación del láser, la lámina de mayor intensidad es la central, como ya se ha indicado anteriormente. Esta lámina de láser tiene el suficiente espesor como para alumbrar todo el modelo, por lo que el ajuste no tiene por qué ser perfecto.

Precaución: todos los usuarios deben considerar que en las proximidades del láser será necesario el uso de gafas protectoras específicas para la longitud de onda de emisión del láser debido al riesgo de daño de la retina si el láser incide directamente sobre el ojo. Una situación de peligro se puede producir tanto por un mal uso del equipo como por un disparo accidental del láser o un fallo del equipo ya que en algunas ocasiones se producen disparos de una mayor intensidad de la indicada. Hay que prestar atención a su vez de posibles reflexiones del haz sobre alguna superficie.

Ajuste de la guillotina

Una vez se haya colocado el láser y el modelo sobre el desplazador se coloca la guillotina. Es necesario que esté colocado el láser para poder situar su zona central con la ranura de la guillotina.

La separación entre ambas hojas también puede modificarse y se debe conseguir una apertura uniforme y con el espesor deseado. El desplazador que permite este movimiento no indica la distancia real entre ambas hojas, sin embargo, por estudios previos¹⁰ se puede conocer su calibración.

¹⁰ Pozo Álvarez, A. (2018)

Tabla 4.1 Resultados de la calibración de la distancia de la hojas de la guillotina. Fuente: Pozo Álvarez, A. (2018)

Distancia desplazador	Distancia real (mm)
20	0
30	0.05
40	0.1
50	0.15

Una vez realizado el montaje dentro de la instalación se deberá ajustar la inclinación de la guillotina de forma que se encuentre paralela al desplazador del modelo y perpendicular al haz láser. Es importante que esté correctamente alineado ya que en caso contrario no se tendrá la intensidad adecuada del haz y por lo tanto no se iluminará correctamente la zona de medida.

4.1.3 Ajuste de la cámara digital

Es importante un correcto ajuste de la cámara para obtener imágenes lo más nítidas posibles. Como se ha mencionado antes en el apartado 4.1.1 hay que prestar especial atención a la colocación de la cámara y guardar de que no le caiga fluido encima.

4.1.3.1 Enfoque del modelo

Lo primero es decidir el nivel de detalle con el que se quiere realizar el análisis. El análisis que se ha realizado ha sido de todo el flujo, por lo que no ha sido necesaria la utilización del fuelle.

Tras montar el objetivo es necesario establecer en enfoque de la parte del modelo que se quiere estudiar. La cámara debe quedar completamente perpendicular al plano de medida.

La altura y la inclinación de la cámara se ajustan de forma preliminar haciendo que el conducto de salida quede vertical. La cámara debe estar colocada de forma que la zona de medida quede centrada dentro de la imagen. Este paso se realiza manualmente. Se acerca la cámara al modelo de forma que roce las paredes del modelo y se pueda colocar perpendicular al mismo. También se coloca aproximadamente la cámara para que el modelo quede en el centro.

Para encontrar la distancia de la cámara en la que el modelo estará enfocado es necesario iluminar el modelo. Se puede hacer de dos formas:

- Iluminar con una fuente externa que proporcione una fuente de luz constante, como una lámpara.
- Iluminar mediante el sistema láser.

Considerando la iluminación mediante una fuente externa hay que prestar atención de no iluminar en exceso, ya que esto saturaría el sensor y podría llegar a dañarlo. Por eso esta iluminación debe ser indirecta y no enfocar directamente al modelo o a la cámara.

Mediante este tipo de iluminación se puede llevar a cabo un ajuste preliminar. No se pueden ver las partículas correctamente, por lo que se utiliza una plantilla de cuadros negros y blancos y se modifica la posición de la cámara hasta que éstos quedan enfocados. En este punto se tiene enfocada la pared del modelo, así que se acerca la cámara una distancia igual a la mitad de la pared del modelo. Se supone que la zona de análisis está a la mitad de anchura del modelo o en las proximidades, luego solo serán necesarios unos pequeños ajustes.

La iluminación del láser es intermitente, por lo que tiene que estar coordinado con la cámara. Utilizando el láser como fuente de alimentación es obligatorio el uso de gafas protectoras apropiadas para evitar daños oculares.

Mediante la iluminación láser, sí pueden llegar a apreciarse las partículas, por lo que se puede intentar ajustar el enfoque directamente con las paredes del modelo hasta que se vean con nitidez.

4.1.3.2 Ajuste y centrado de la imagen

El programa utilizado para ver y recoger las imágenes de la cámara es el Dynamic Studio, que se ha especificado anteriormente. En función del tipo de iluminación que se utilice habrá que especificar un modo y otro para mostrar las imágenes. Aunque en ambas situaciones se tiene que especificar que es single frame.

- *Free Run.* Si la iluminación la produce un foco constante, el programa muestra en tiempo real lo que ve la cámara.
- *Preview.* Al emplear el láser en la pantalla se van mostrando las imágenes que va tomando la cámara sincronizada con los impulsos de iluminación del láser. Hay que parar las imágenes que va recogiendo mediante el botón *Stop/Abort*.

Partiendo de una posición cercana al modelo, se va alejando la cámara hasta encontrar el punto de más nitidez. Una vez conseguida la posición de la cámara se afina la nitidez mediante el enfoque que permite la mesa.

Una vez se tiene la mejor nitidez posible se comprueba que las paredes de los conductos 1 y 2 está completamente vertical. En caso contrario se realizarán pequeñas correcciones en los ejes vertical y horizontal. En caso de que sea necesario, se realizarán correcciones en el enfoque de la cámara.

Hay que asegurar que el conducto principal está perfectamente vertical en las imágenes, lo cual puede hacerse gracias a la rejilla del programa. Para

mostrar la malla del programa se pincha con el botón derecho del ratón sobre la imagen y se selecciona la opción *Show grid*. Se puede seleccionar el tamaño de la malla que se desee. Con este ajuste se consigue que los vectores verticales al analizar las imágenes sean axiales en el conducto principal y los horizontales serán los radiales. Si no estuvieran bien posicionadas las imágenes, los vectores verticales y los horizontales serían una combinación de los axiales y radiales reales en el conducto principal lo cual haría necesaria su descomposición.

4.1.3.3 Control de la iluminación

Por último, tras haber enfocado y centrado la imagen, se debe ajustar la iluminación del láser. Con una iluminación pobre apenas se verán partículas y los resultados no serán buenos. Con una iluminación excesiva, se reflejará demasiado la luz y tampoco se distinguirán las partículas.

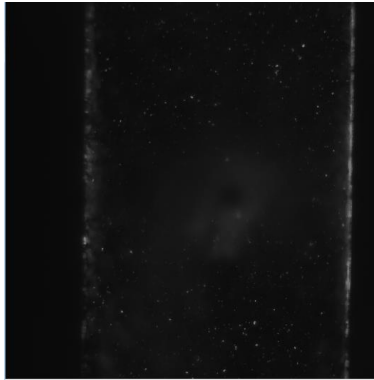


Figura. 4.4 Ejemplo de poca iluminación de las imágenes



Figura. 4.5 Ejemplo de excesiva iluminación de las partículas

Para ajustar la iluminación de las imágenes hay que cerrar la apertura del diafragma, con lo que puede aumentarse la profundidad de campo hasta abarcar toda la sección iluminada. Esto se realiza desde el propio programa de *Dynamic Studio*, con la potencia del láser fijada en un punto que no sea ni demasiado baja ni demasiado elevada (6 Hz por ejemplo). Desde las opciones de la imagen se accede al *Color map and histogram* y se varia el histograma hasta que se ven nítidamente todas las partículas. Si se cierra en exceso hará falta una potencia de láser excesiva para que las imágenes queden iluminadas.

El control de la potencia del láser hace a través de la mesa de control del dispositivo láser. Es necesario comprobar la potencia que tiene el láser en los dos instantes de disparo. Se pueden controlar las imágenes de los dos instantes pulsando en las imágenes y con la tecla T del teclado.

El ajuste de la iluminación debe hacerse con la cámara oscura cerrada, de forma que toda la luz que ilumina al modelo procede de la fuente de iluminación láser.

4.1.4 Ajuste de paralelismo

El ajuste de paralelismo consiste en obtener una correcta colocación del modelo de forma que se encuentre completamente perpendicular a la cámara con el haz láser iluminando correctamente el modelo. Se busca que el haz incida en todo el modelo en el plano medio de los conductos que es donde se encuentra la máxima distribución de velocidades. En el plano medio también es donde el diámetro de la tubería es el máximo, el diámetro total de la tubería, y las paredes del conducto se ven nítidamente.

Los modelos se sitúan sobre un soporte que permite controlar la inclinación del mismo, y éste a su vez está sujeto a un desplazador que permite acercar o alejar el modelo a la cámara. Se intenta que el desplazador esté en una posición intermedia antes de comenzar con el ajuste para disponer de movimiento en ambos sentidos. En el montaje de la instalación, apartado 4.1.1.1 se indicó que un montaje aproximado a la situación final reduciría esfuerzos para este ajuste de paralelismo. Por lo tanto, lo primero sería comprobar que las placas del soporte del modelo están a la misma distancia en todos los puntos. Basta con medir los puntos en los que se encuentran las uniones entre las placas.

La inclinación de las plazas del soporte se puede controlar mediante dos desplazadores con precisión del orden de micrómetros situados en esquinas opuestas, como se ve en la Figura 4.6. Una de las otras esquinas que no poseen micrómetro está anclada en el desplazador horizontal del modelo y esta es la esquina que se toma como referencia.



Figura. 4.6 Soporte de los modelos con los micrómetros



Figura. 4.7 Soporte del modelo colocado en la instalación

Para realizar el ajuste de paralelismo es necesario partir de una posición inicial y llevar a cabo un proceso iterativo hasta llegar a la situación óptima de ajuste del modelo. En el proceso iterativo hay que ir realizando una serie de correcciones que se hacen gracias a una serie de medidas realizadas con el software *Dynamic Studios*.

Mediante el desplazador se puede ajustar la parte inferior del modelo (Figura 4.7), que es fija respecto a las inclinaciones que permiten los micrómetros. Lo primero que se va a ajustar es esa esquina, y dado que en el modelo hay unos hilos que modifican el flujo, por sencillez, se hace que el fluido entre por el conducto 1 y salga por el 2 y el 3. Este sentido de flujo es el contrario al que se va a seguir durante el experimento, pero se ha decidido así por simplicidad a la hora de establecer el plano central del conducto. Si la instalación trabajara en unión, a la salida del modelo por el conducto inferior, su flujo se vería afectado por los hilos y establecer en plano de máxima velocidad sería más complejo. Esto puede hacerse debido a que el ajuste de paralelismo es independiente del sentido de flujo que tenga el modelo.

Esta esquina inferior se puede ajustar con el desplazador que mueve el modelo en dirección al eje de la cámara. Cuando se haya ajustado correctamente el paralelismo este desplazador permitirá situarse en diferentes planos perpendiculares del modelo.

Los pasos a seguir para realizar el ajuste de paralelismo son los que se especifican a continuación:

- 1- Lo primero es partir de una posición inicial, que puede ajustarse a ojo, en la que se vea que la parte inferior del modelo está más o menos alineado con el láser. Se toman una serie de medidas en esta posición y se analizan para obtener el perfil de velocidades. Se obtiene así el perfil de velocidades de la posición cero.
- 2- Se traslada el modelo mediante el desplazador. Se obtiene el perfil de velocidades en otro plano. Si la velocidad media en ese perfil es mayor que la de la posición cero se sigue en ese sentido tomando medidas. Si, por el contrario, es menor, habrá que tomar medidas en el sentido contrario. Se van obteniendo así diversas medidas.
- 3- Con los resultados se busca el plano en el que la velocidad por el conducto principal es máxima. La tolerancia con la que se decide cuándo dejar de iterar depende del grosor de la pared. En este punto en el que se tiene enfocado el plano central del conducto es en el que se establece el nuevo origen del desplazador.
- 4- Teniendo ya ajustado el plano central del conducto 1 se ajusta con el micrómetro la inclinación del modelo y se realizan una serie de medidas hasta encontrar el plano medio del conducto 2.
- 5- Se busca ajustar la rama lateral de forma que también en esta la velocidad sea la máxima. El punto en el que todas las velocidades son las máximas y por lo tanto se trata de la sección central de los conductos se alcanza aproximadamente cuando la separación entre las placas del soporte es igual en todos los puntos.

- 6- Finalmente se puede realizar un último análisis para comprobar que la distribución de velocidades es la apropiada y que realmente se está enfocando en todos los conductos a la sección central del modelo.

Podrían realizarse dos medidas a cada lado del plano inicial y a partir de los resultados obtenidos de estas medidas, acotar luego el plano. Sin embargo, este procedimiento es más largo y es mejor analizar las medidas realizadas y orientar la toma de medidas a partir de los mismos.

Una vez se han realizado estos ajustes el láser, después de atravesar la guillotina, atravesará el modelo por la sección central del mismo. Este proceso de ajuste de paralelismo es necesario realizarlo cada vez que se cambie el modelo.

4.1.5 Calibración del caudalímetro y la bomba

El caudalímetro es un elemento de gran importancia en la instalación ya que con sus medidas se establecen las diferentes relaciones de caudal. A partir del caudal que proporciona la bomba y el medido con el caudalímetro se calcula el caudal del ramal 3 y con ello posteriormente las relaciones de caudal. Por ello es necesario que ambos arrojen unos valores sobre la medida de caudal que sean correctos.

Para la calibración se utiliza la medida de caudal de la bomba, del PIV y una medida galvanométrica del caudal. Se hace girar la bomba en un rango de velocidades, anotando el caudal que indica la bomba en su panel de control. A su vez, se anota para cada velocidad de la bomba que se considere, el valor que arroja el caudalímetro sobre el caudal en ese momento.

Se trabaja con la mezcla de partículas, de la que es conocida su densidad. De esta forma, se puede calcular el caudal real de la instalación con la ecuación 4.6. Se retira la entrada al depósito superior y se extrae una cantidad de fluido durante un periodo de tiempo determinado y se pesa el fluido en una báscula en la que se ha tarado con el recipiente. Así se puede conocer el caudal real que pasa por la instalación para un rango de velocidades de giro de la bomba determinados. El caudal real se obtiene por lo tanto a partir de un método manual.

$$Q = \frac{\frac{m}{\rho}}{t} \quad \text{ec. 4.6}$$

Siendo cada variable de la ecuación:

- Q: caudal de la instalación (mL/min)
- m: la masa del fluido (g)
- ρ : la densidad de la mezcla (g/mL)
- t: periodo de tiempo que se haya querido considerar (min)

En la tabla 4.2 se adjuntan los datos recogidos para la calibración del caudalímetro. El cálculo de la densidad de la mezcla se especifica en el apartado 4.1.1.2 Preparación de la mezcla.

Tabla 4.4.2 Datos para la calibración del caudalímetro

rpm	Tiempo (s)	Masa (g)	Q real calculado (mL/min)	Q caudalímetro (mL/min)	PIV	Bomba
1000	30	20.0	34.54	34	39.56	56.67
2000	30	53.0	91.52	91	88.55	113.30
3000	30	85.5	147.64	148	139.00	170.00
4000	20	70.1	181.57	197	173.00	226.70
5000	20	99.0	256.43	248	214.77	283.00
6000	15	83.0	286.64	293	252.50	340.00
Densidad mezcla (g/mL)	1.15823					

A medida que se aumenta la velocidad de giro de la bomba se reduce el tiempo ya que al impulsar mayor caudal es demasiado el volumen de fluido que se saca para el cálculo. Tratar con tiempos menores a 15s puede aumentar el error. Al ser un proceso manual, se produce un pequeño error causado por el tiempo que se emplea en cerrar la válvula; aunque este es lo más reducido posible y no influye en los resultados.

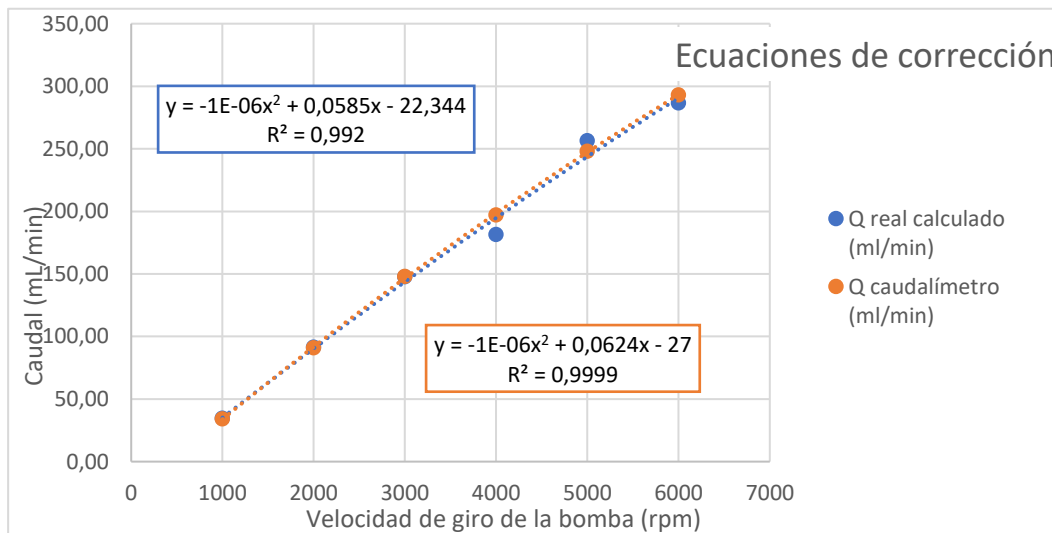


Figura. 4.8 Gráfica con las ecuaciones de corrección para el caudalímetro

Para calcular las ecuaciones con las que poder hacer las correcciones y calibrar tanto la bomba como el caudalímetro se representan los datos de la tabla 4.2 en una gráfica representada en la figura 4.8.

La ecuación de ajuste de la instalación es la que se obtiene a partir de los datos calculados, ecuación 4.7. Se ha escogido una ecuación polinómica de grado 2 porque se ajusta mejor a los resultados que una lineal.

$$Q_{real} = -10^{-6}n^2 + 0.0585n - 22.344 \quad \text{ec. 4.7}$$

Siendo la n el valor de la velocidad de giro de la bomba en revoluciones por minuto se calcula el caudal que está impulsando la bomba en ml/min, que es Q_{real} . Esta será la ecuación utilizada para calcular el caudal que impulsa la bomba para las diferentes revoluciones.

La ecuación del caudalímetro es la 4.8. En ella n , las revoluciones de la bomba están en rpm y se obtiene con ella el caudal en ml/min.

$$Q = -10^{-6}n^2 + 0.0624n - 27 \quad \text{ec. 4.8}$$

Comparando ambas ecuaciones se constata que el caudalímetro está calibrado para las condiciones de trabajo.

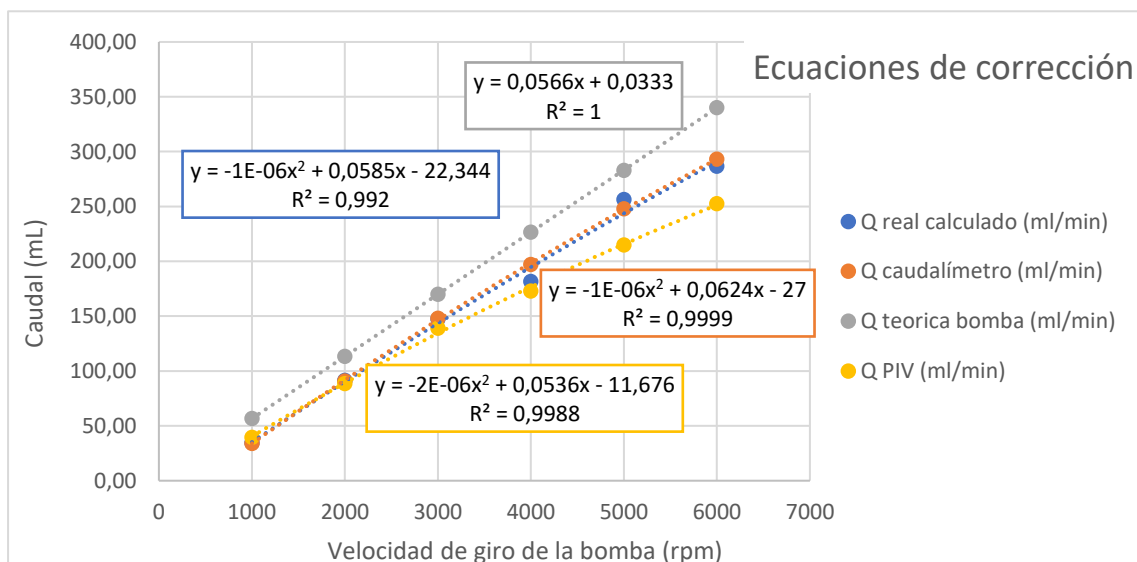


Figura. 4.9 Gráfica con las ecuaciones de corrección del caudalímetro y bomba

También se realizan varias medidas con el PIV para las diferentes revoluciones de la bomba, cuyos resultados pueden verse en la figura 4.9. Se hace un análisis para obtener la velocidad en el caudal principal y se calcula el caudal considerando una corriente del tipo Hagen – Pouseille. Cabe destacar la desviación que presentan los valores respecto a la curva real al aumentar las revoluciones de la bomba.

4.2 Medidas

En este apartado se explican las medidas que se han realizado. Se comienzan detallando las diferentes zonas del modelo en las que se han

realizado medidas así como la justificación de cada una de las vistas y posteriormente se explican las medidas realizadas en cada una de esas vistas. Después se detalla el procedimiento a seguir hasta que se han obtenido unas buenas imágenes y estas están listas para procesar.

4.2.1 Zonas de medida

Se realizan medidas en tres zonas consecutivas del modelo de forma que con esta caracterización se pueda seguir el desarrollo del fluido desde que se juntan las corrientes hasta que esta corriente resultante se encuentra con el hilo inferior.

Las tres vistas en las que se recogen las medidas son las que se detallan a continuación:

- **Vista 1.** En la primera zona de medidas la unión queda centrada en la imagen (ver figura 4.10). Con esta vista se pueden analizar las dos corrientes de entrada justo antes de que se produzca la mezcla y la primera zona en la que ambas corrientes comienzan a mezclarse.

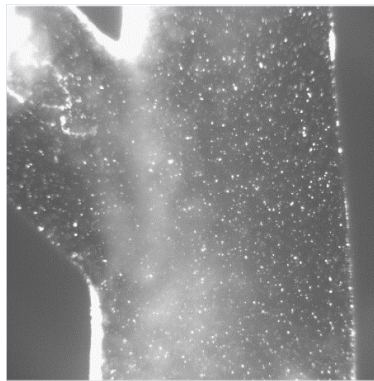


Figura. 4.10 Vista 1

- **Vista 2.** La segunda zona se corresponde con la zona inmediatamente inferior a la unión. Tal y como muestra la figura 4.11 se ve el ramal 3 y en la parte inferior de la imagen aparece ya el hilo inferior. Esta vista es intermedia entre la que recoge la zona en la que se produce la unión y la vista alrededor del hilo inferior.

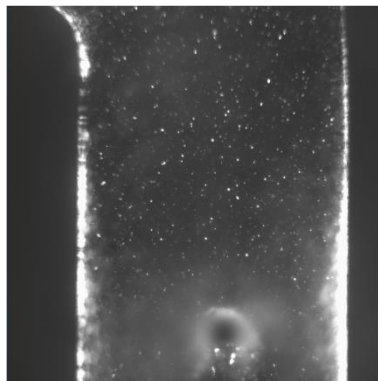


Figura. 4.11 Vista 2

En la figura 4.11 se puede ver una pelusa pegada en el hilo de estudio que se ha quedado enganchada. Este efecto se ha producido durante la realización del experimento y sus efectos deben ser considerados en las medidas a las que afectan.

- Vista 3. En la tercera vista el hilo se sitúa en el centro de la imagen (figura 4.12). Con esta vista se pretende analizar la influencia del hilo en la corriente de mezcla.

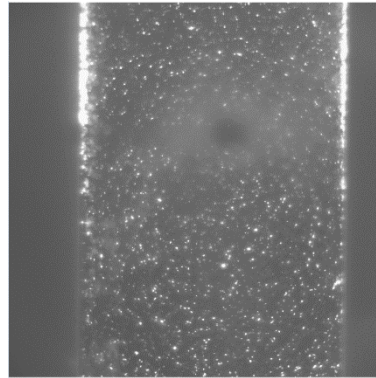


Figura. 4.12 Vista 3

4.2.2 Medidas realizadas

Las medidas realizadas se dividen en dos grupos: en el análisis del patrón de flujo del mezclado de dos corrientes y el análisis de los torbellinos que se forman al impactar una corriente contra las paredes del conducto.

Para realizar los análisis se consideran una serie de situaciones, gobernadas por el número de Reynolds del conducto 1. Este puede calcularse a partir de la ec. 4.9 con los datos del conducto de salida. En esta ecuación se relaciona directamente el Re con Q , el caudal que circula por el conducto que es todo el caudal que impulsa la bomba; A , el área del conducto; μ la viscosidad del fluido que es conocida y ρ la densidad.

$$Re = \frac{Q \cdot v \cdot \mu}{\rho} = \frac{Q^2 \cdot \mu}{\rho \cdot A} \quad \text{ec. 4.9}$$

Las medidas se realizan para diferentes relaciones de caudal que se definen según la ecuación 4.10.

$$r = \frac{Q_2}{Q_3} \quad \text{ec. 4.10}$$

Para cada Reynolds considerado, se conoce el caudal del conducto 1, que se corresponde con el caudal total impulsado por la bomba. Con este dato y la relación de caudales que se desea se calcula el caudal que tiene que pasar por el ramal 2 (ecuación 4.11). Así se cierran las válvulas de aguja hasta que el caudalímetro marque el caudal calculado.

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{r}{r+1} \quad \text{ec. 4.11}$$

4.2.2.1 Análisis de un mezclador

En cada vista se han realizado seis medidas para cada número de Reynolds a analizar, en la figura 4.13 se ve un esquema de las medidas realizadas. Se tienen por lo tanto 24 situaciones diferentes. Los números de Reynolds que se han considerado son 34.34, 74.11 y 110.86 que se corresponden con 2000, 4000 y 6000 rpm de la bomba, respectivamente. Estos Reynolds se han redondeado a múltiplos de 5 quedando en 35, 75 y 110; por lo que se considera que se trabaja en todo momento con valores bajos del Re^{11} . Para cada uno de estos Reynolds se han considerado cinco relaciones de caudal: 0, 0.5, 1, 1.5 e ∞ . A mayores se ha registrado una sexta relación de caudales que se corresponde con el circuito libre, es decir, con las dos válvulas de control de caudal abiertas. Esta sexta relación de caudales, al no estar controlada, varía en función de las condiciones que se tengan.¹²

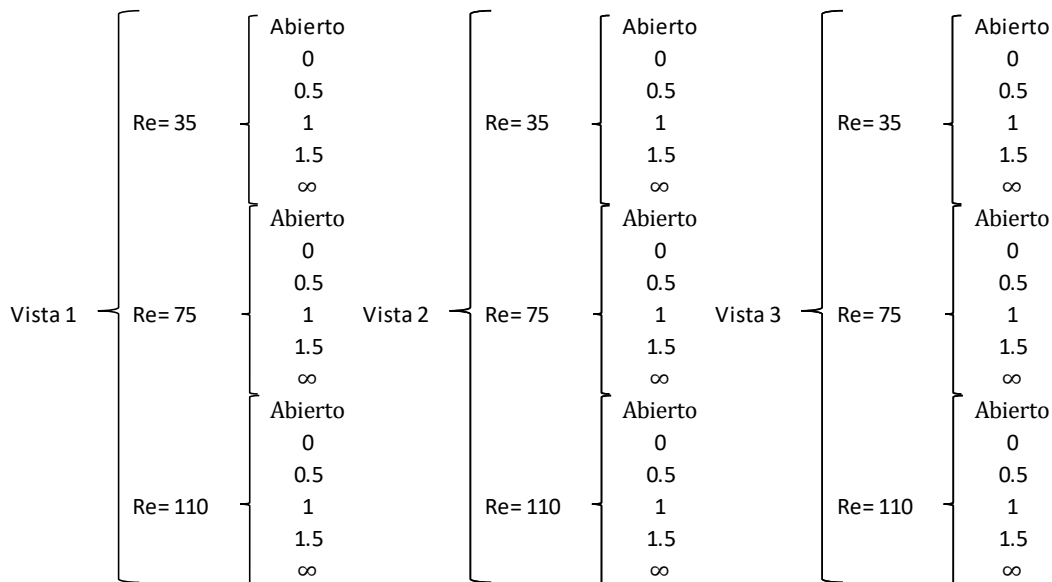


Figura. 4.13 Esquema de las medidas realizadas

Los diferentes números de Reynolds se consiguen variando las revoluciones de la bomba. Para obtener las diferentes relaciones de caudal se juega con las válvulas que controlan el paso del fluido por cada uno de los ramales 2 y 3. La relación de caudal buscada se ajusta gracias al caudal que circula por el ramal 2 y que indica el caudalímetro con una precisión de $\pm 0.01 \text{ ml/min}$.

¹¹ Dentro de un conducto un flujo es laminar si su $Re < 2300$. Los Re considerados al menos 20 veces menores a este valor límite.

¹² En la presente memoria no aparecen los resultados correspondientes al circuito abierto, pero pueden consultarse en el Anejo 1.

La relación de caudal 0 se corresponde a la situación en la que el ramal 2 está cerrado y por lo tanto todo para por el 3. La relación de ∞ es por lo tanto la situación contraria; en la que todo el fluido pasa por el conducto 2.

4.2.2.2 Análisis de torbellinos

También se realiza un análisis de los dos torbellinos que se producen cuando el fluido circula solo por el conducto 3 e impacta contra la pared del conducto principal. Durante la realización y análisis de las medidas se constató la presencia de dichos torbellinos y se vio en la necesidad de ampliar el análisis para caracterizar estas situaciones. Este estudio se realiza en las vistas 2 y 3.

Para tratar de caracterizar mejor el torbellino se realizan medidas en la vista 3 en planos paralelos al central del modelo. Partiendo de la sección central se han recogido datos en otras tres secciones separadas 0.5mm considerando el sentido del eje z. Dado que la sección central se encuentra en el punto 46.5, el resto de medidas que recogen se encuentran en: 47, 47.5 y 48. A partir del punto 48 la proximidad a la pared imposibilita una correcta recogida de las imágenes ya que en estas no se aprecian nítidamente las partículas y por lo tanto no puede caracterizarse el flujo.

4.2.3 Ajuste del tiempo entre disparos

El tiempo entre disparos del láser es necesario adecuarlo a unas determinadas condiciones de funcionamiento. El tiempo entre disparos depende fundamentalmente del número de Reynolds y del número de pixeles del procesado, aunque también depende del factor de escala en menor medida. El tiempo de disparos se especifica en el programa en microsegundos.

Tabla 4.3 Tiempo entre disparo para cada Reynolds

Re	T disparo (μ s)	T disparo torbellino (μ s)
35	245	750
75	115	250
110	75	125

Torbellinos

En el análisis de torbellinos cuando el conducto 2 está cerrado, la velocidad que lleva el fluido dista mucho de la velocidad a la que gira el torbellino. Con un mismo tiempo entre disparos para la zona en la que se encuentra el torbellino y la zona en la que se mueve el fluido puede observarse correctamente uno de los dos movimientos. Para poder percibir en una misma imagen ambos movimientos es necesario utilizar dos tiempos entre disparos diferente.

Para poder captar correctamente el movimiento del torbellino, que se mueve más despacio que el flujo principal, es necesario aumentar el tiempo entre disparos. El tiempo correspondiente a la zona del torbellino se obtiene gracias a la experiencia; es necesario realizar varias medidas y analizar los datos hasta conocer el tiempo apropiado para la caracterización del torbellino.

Se toma la parte en la que se encuentra el torbellino de las medidas realizadas con el tiempo alto, y el movimiento del fluido viene dado por las medidas en las que se haya usado el tiempo entre disparos correspondiente al Reynolds que sea; que será más bajo. Para poder realizar la posterior unión de los datos es necesario utilizar dos tipos diferentes de máscara.

4.2.4 Adquisición de las imágenes con el programa y calibración

Es necesario realizar la calibración del modelo determinando una distancia concreta en el modelo de forma que el posterior cálculo de la velocidad sea el adecuado. Sin conocer una distancia dentro de la imagen, los resultados de velocidad no serán los adecuados. El programa exige realizar una nueva calibración cada vez que se empieza un nuevo proyecto.

Para la calibración del modelo se cogen unas pocas imágenes, con 10 es suficiente. Estas imágenes se tienen que guardar para calibración y posteriormente utilizarlas para el Measure Scale Factor. Dentro de esa opción se pide que se marquen dos puntos en la imagen y se indique a qué distancia real se corresponde. Con estos datos el programa es capaz de calcular el factor de escala de la imagen. En la figura 4.14 se muestra la pantalla en la que se establece el factor de escala.

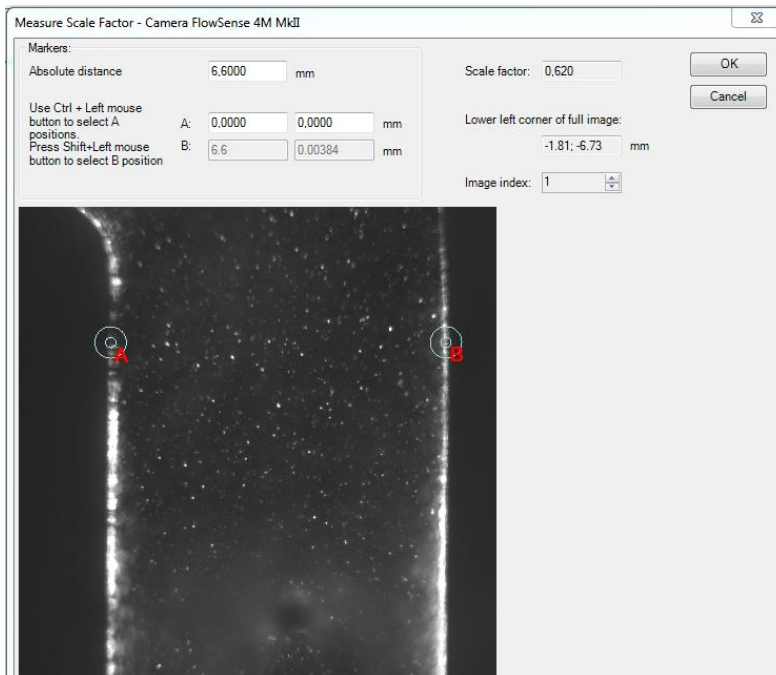


Figura. 4.14 Pantalla para el cálculo del factor de escala

Las primeras imágenes que se recogen no son válidas, se pueden producir variaciones en la intensidad del láser y la mayoría de las veces las primeras 3 aparecen sin iluminar o muy oscuras por una mala sincronización del láser con la cámara. Por esta razón, al guardar las imágenes para el análisis posterior es necesario desechar las primeras imágenes recogidas, con unas 10 imágenes es suficiente.

4.3 Procesado de las imágenes

Durante el procesado se parte de las imágenes obtenidas con la cámara hasta obtener las imágenes con los resultados en las que se aprecian los perfiles de velocidades. El resultado que se tiene es una media de los datos originales recogidos. Cuantas más imágenes se usen para dicha media, mejores serán los resultados, pero llega un punto en el que el coste computacional no compensa el aumento de exactitud. Se han cogido un total de entre 90 y 91 imágenes para procesar.

Gracias al procesado de las imágenes se pueden mejorar los resultados. Aunque las imágenes no sean del todo nítidas, como consecuencia del ensuciamiento de la instalación, mediante un procesado adecuado se pueden conseguir unos buenos resultados.

Se puede establecer una secuencia de análisis de forma que se aplique el mismo análisis a todas las imágenes que se deseen sin tener que volver a configurar los análisis uno por uno. Esto es una gran ayuda que permite ahorrar tiempo ya que no hay que esperar a que se haya realizado un procesado para continuar y pueden dejarse las imágenes procesándose. A todas las imágenes recogidas se les ha aplicado el mismo procesado. A excepción de las que se indiquen expresamente. A continuación, se explica el procesado que se le ha realizado a las imágenes.

4.3.1 Generación de la máscara

La máscara es un elemento que permite eliminar del procesado de los datos todas aquellas zonas de las que no se desean resultados. Puede ser de las zonas exteriores al modelo o de los hilos o dentro del mismo modelo, zonas de las que no interesan los datos. Es lo primero que se realiza, dado que no se quiere analizar lo que haya recogido la cámara fuera de los tubos del modelo y dado que los resultados que se obtienen en estas zonas son erráticos se consiguen limpiar los resultados finales obtenidos. A parte, se reduce, aunque no de manera significativa, el tiempo de procesado.

Las máscaras pueden ser todo lo grandes o todo lo pequeñas que se quieran. Pueden tener geometrías ya definidas como un círculo o un rectángulo o tener el perfil que se desee para adaptarse correctamente a la zona que se

desea. Para generar la máscara hay que seleccionar las imágenes y seleccionar la opción de Define mask. El resto de procesados se realizarán sobre estas imágenes y no sobre las originales.

Una buena máscara es aquella en la que se consiguen eliminar todos, o casi todos, los datos que no interesan. Dada las características que tiene que tener una máscara, ha sido necesaria la utilización de una máscara por cada una de las vistas consideradas.

4.3.1.1 Máscaras utilizadas en las diferentes vistas

En la figura 4.15 se adjuntan las máscaras utilizadas para las tres vistas. En las vistas 2 y 3 a la máscara se le añade la zona del hilo, en la que los vectores que se obtienen no son válidos.

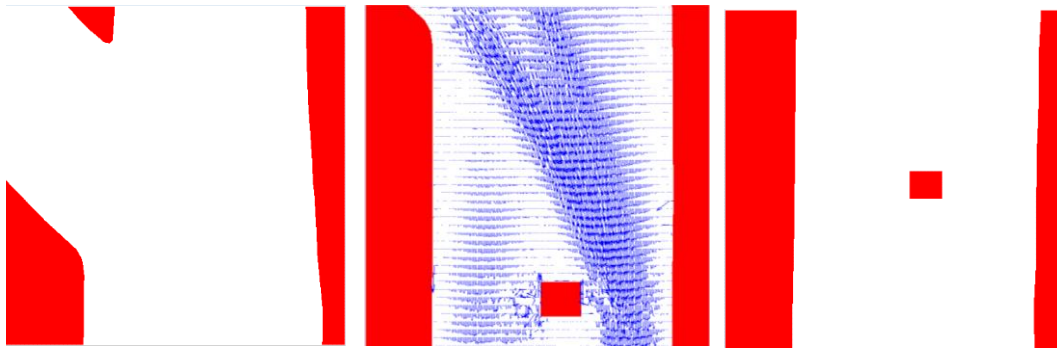


Figura. 4.15 Máscaras utilizadas para las vistas 1, 2 y 3; de derecha a izquierda

4.3.1.2 Máscaras utilizadas para los torbellinos

En el caso de los análisis de torbellinos, son necesarios dos tiempos de disparo diferentes. Para ello hay que utilizar tantas máscaras como tiempos de disparo diferentes se tengan para después poder juntas las imágenes. En la figuras a se ve la máscara para coger la zona del torbellino, para las imágenes que tienen mayor tiempo entre disparos. En las figuras b se tiene la máscara para la zona que no corresponde con el torbellino y que tiene el tiempo del flujo según el Reynolds que se esté considerando.

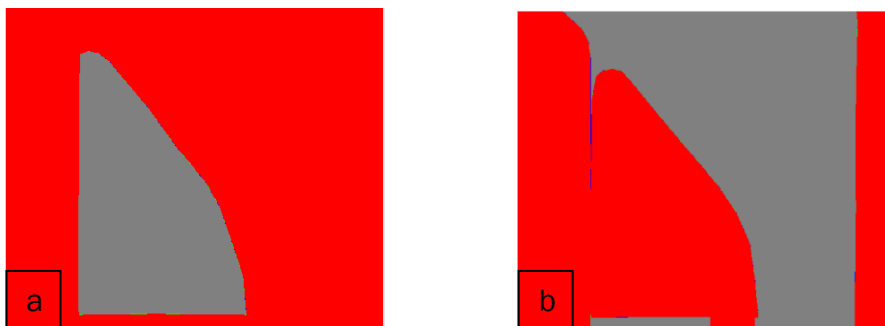


Figura. 4.16 Máscaras para el tratamiento del torbellino en la vista 2

En la figura 4.16 se tienen, las máscaras del torbellino (a) y del flujo principal (b) para la vista 2.

En la figura 4.17 se tienen lo mismo que en la anterior, pero para la vista 3. Las máscaras del torbellino y del flujo principal.

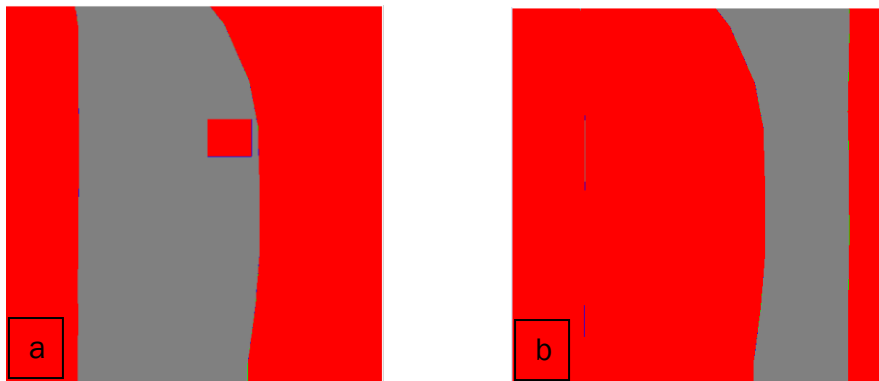


Figura. 4.17 Máscaras para el tratamiento del torbellino en la vista 3

La creación de estas máscaras se ha realizado después de un análisis con el que ha podido caracterizarse la zona en la que se encuentra el torbellino. No es posible generar una máscara apropiada sin un análisis anterior en el que poder basarse.

4.3.2 Eliminación del mínimo

Las imágenes obtenidas presentan zonas en las que el modelo se ha ensuciado o los resultados no son del todo nítidos. Las zonas en las que la velocidad sea nula pueden descartarse y para corregir estos defectos hay que eliminar los puntos en los que se tenga la mínima velocidad. Se calculan los puntos de mínima velocidad de cada una de las fotos mediante el comando Image Min/max con el que se obtiene una imagen de los mínimos. Esta imagen se resta a las imágenes a las que ya se les ha aplicado la máscara con el comando Image arithmetic, dejando en negro las áreas que se eliminan.

Ya con la máscara aplicada y eliminados los mínimos se tienen unas imágenes más limpias que son las que se van a analizar y con las que se tienen unos mejores resultados que si no se hubieran procesado.

4.3.3 Correlación promediada

El algoritmo utilizado para el cálculo del campo de velocidades es el *Average correlation*. En la técnica de correlación no se determina el desplazamiento de partículas individuales, si no que se analizan grupos de partículas contenidas en pequeñas regiones. Estas regiones suelen ser cuadradas y su tamaño se especifica dentro del comando y de ellas dependerá la precisión que se tenga en las medidas. Este tamaño influye también en el tiempo entre disparos apropiado para realizar la toma de medidas. La elección del tamaño de área de análisis es importante para la selección del tiempo entre disparos. Si no, el análisis habrá que hacerlo con celdas más grandes y no se

tendrá la precisión requerida. El área de interrogación que se ha utilizado ha sido de 16 x 32 pix.

En general no se hace la correlación de forma directa si no que se aplica la transformada rápida de Fourier sobre la imagen. Se proporciona un vector de desplazamiento por cada ventana de análisis. El resultado que se obtiene para cada área de interrogación es una media de las velocidades de todas las imágenes que se han recogido en ese mismo área.

Introducir un porcentaje de superposición hace que a parte de analizar las celdas independientemente se analice una superposición de las mismas, lo que es muy útil cuando algunas de las partículas pasan de una celda de estudio a otra. En el procesado realizado se ha considerado un overlap del 25%.

4.3.4 Importancia del tratamiento de las imágenes

A continuación se exponen cuatro imágenes para ilustrar la importancia del tratamiento de las imágenes. Las figuras 4.18 y 4.19 son una muestra de las imágenes sin tratar y las tratadas, respectivamente. En las imágenes tratadas las partículas se aprecian con mayor nitidez.

Estas imágenes se corresponden con la vista 1, en la que se puede ver parte de todos los ramales.

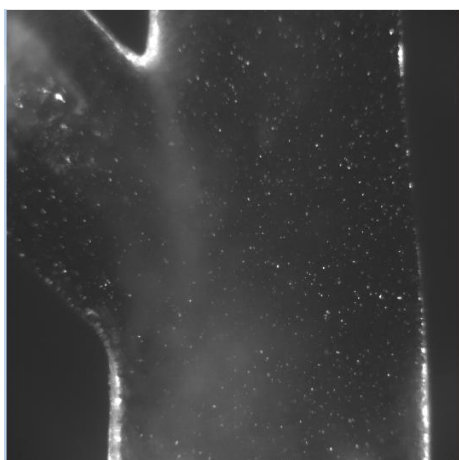


Figura. 4.18 Imágenes recogidas con la cámara

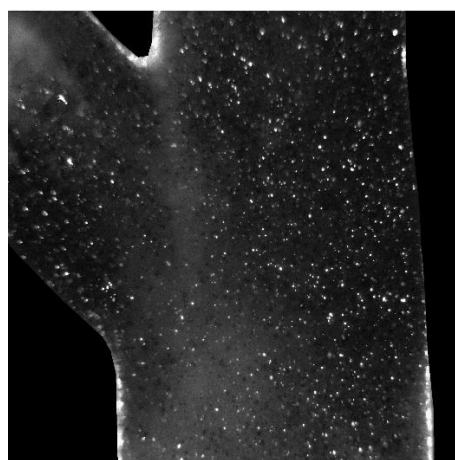


Figura. 4.19 Imágenes después de aplicar el procesado

En la figura 4.20 se muestran los resultados del campo de velocidades que se obtiene a partir de las imágenes originales y en la figura 4.21 los resultados que se obtienen a partir de las imágenes procesadas. Estos resultados se corresponden con el conjunto de imágenes de los que se tiene una muestra en las figuras 4.18 y 4.19.

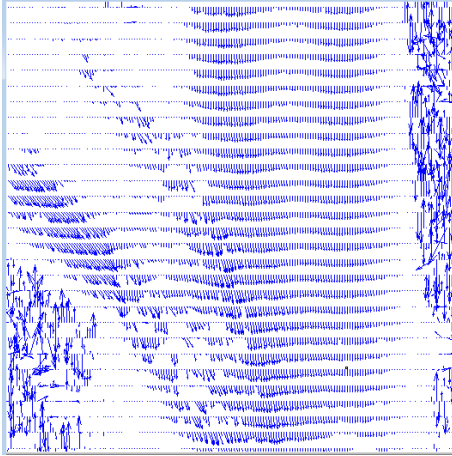


Figura. 4.20 Average correlation de las imágenes originales

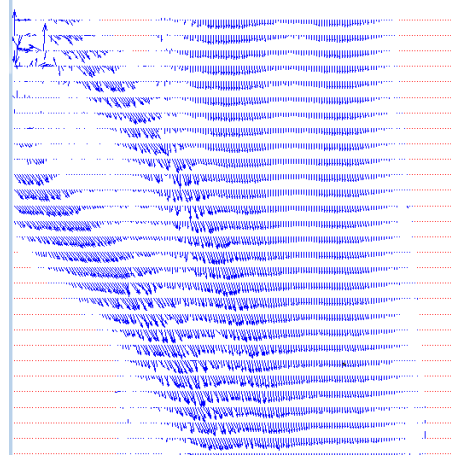


Figura. 4.21 Average correlation de las imágenes procesadas

El procesado de imágenes permite obtener un campo de velocidades más limpio y definido. A mayores, la máscara, permite eliminar del análisis las zonas de las que no interesan resultados y mostrar tan solo la zona de análisis.

Capítulo 5. Análisis de los resultados

Índice del capítulo 5

5	Análisis de los resultados experimentales.....	73
5.1	Análisis del comportamiento de un mezclador.....	75
5.1.1	Consideraciones iniciales	75
5.1.1.1	Perfil teórico de velocidades	75
5.1.1.2	Relaciones de caudal obtenidas.....	76
5.1.1.3	Caídas de presión	76
5.1.1.4	Discrepancia de caudal para $r = \infty$	77
5.1.2	Influencia de la relación de caudales para un mismo Reynolds	79
5.1.2.1	Ensuciamiento de las paredes.....	84
5.1.2.2	Influencia de la presencia de impurezas	85
5.1.3	Influencia del Reynolds para una misma relación de caudales	86
5.1.3.1	Adimensionalización de las velocidades.....	86
5.1.4	Consideraciones respecto a una bifurcación.....	94
5.2	Análisis del comportamiento de un flujo incidiendo en un conducto	94
5.2.1	Análisis del torbellino superior	94
5.2.2	Análisis del torbellino inferior	96
5.2.3	Análisis en distintos planos paralelos	99

5 Análisis de los resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados de los experimentos realizados, así como los análisis derivados de estos. Estos resultados serán utilizados en un trabajo posterior para la validación de un modelo numérico. Tanto los resultados como las condiciones a las que hacen referencia deben estar completamente detallados para que el modelo sea capaz de reproducir las mismas situaciones y obtener los mismos resultados. Algunos de los resultados experimentales pueden verse deteriorados por suciedad en las paredes de los conductos o la presencia de pelusas en la instalación; hechos que se han constatado en las medidas.

En la caracterización del patrón de flujo se han considerado las tres vistas del modelo expuestas en el apartado 4.2.1 y que se resumen a modo de recordatorio en la Figura. 5.1. En cada una de estas vistas se reproducen las mismas condiciones de funcionamiento del número de Reynolds y relación de caudal; aunque pueden producirse pequeñas variaciones derivadas de la imposibilidad de reproducir al cien por cien las condiciones. Estas variaciones entran dentro de las tolerancias admisibles y al conocerse los resultados que se ven afectados por dichas irregularidades, pueden descartarse sus efectos del análisis. Tal es el caso de las medidas en las que se ha adherido una pelusa en alguno de los hilos afectando ligeramente al patrón de flujo.

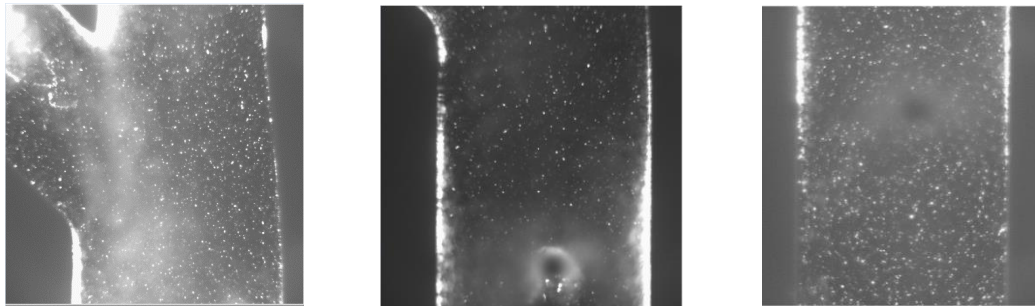


Figura. 5.1 Recordatorio de las zonas de medida; de izquierda a derecha, vistas 1, 2 y 3

El análisis del patrón de flujo desarrollado en este capítulo se agrupa en dos conjuntos de comparaciones: en el primero se evalúa el comportamiento de un mezclador y en el segundo se realiza un análisis de un flujo que incide con cierto ángulo en un conducto de mayor diámetro.

Respecto al comportamiento de un mezclador se realizan dos análisis de la mezcla resultante:

- Influencia de la relación de caudales para el mismo Reynolds
- Influencia del Reynolds para una misma relación de caudales

Respecto a una corriente que incide con un cierto ángulo en un conducto se realizan tres análisis:

- Análisis del torbellino superior (Figura. 5.3)
- Análisis del torbellino inferior (Figura. 5.2)
- Análisis del torbellino inferior en diferentes planos

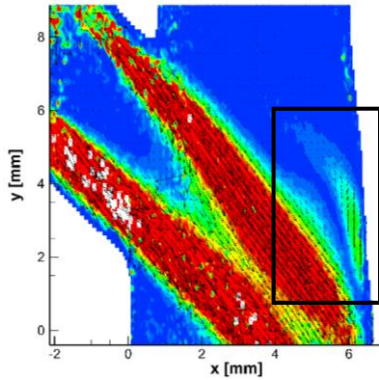


Figura. 5.3 Torbellino superior

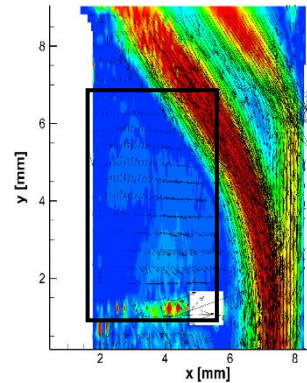


Figura. 5.2 Torbellino inferior

A fin de facilitar el análisis, se establece un sistema de ejes (Figura. 3.12) que de nuevo se indica en la Figura. 5.4. En ella puede verse a su vez la numeración de los tres hilos que se mencionan en el análisis. En el conducto 2 solo se ha nombrado un hilo dado que el comportamiento de los hilos que se encuentran en este conducto se analizan de manera conjunta.

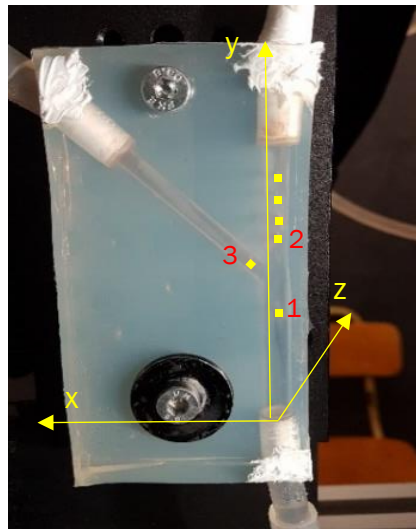


Figura. 5.4 Recordatorio del sistema de ejes y numeración hilos

En el Anejo 1 se encuentra todo el conjunto de imágenes recogidas en el experimento así como los datos de presiones y temperaturas. A su vez se puede consultar este Anejo para conocer las propiedades del procesado de cada una de las imágenes.

5.1 Análisis del comportamiento de un mezclador

Se analiza el patrón de flujo resultante de la mezcla de dos corrientes que confluyen con un ángulo de 45° entre sí y donde el flujo resultante lleva la misma dirección que una de las entradas. En esta memoria no se adjuntan todos los resultados que se han utilizado para el análisis, sino que estas pueden consultarse en el Anejo 2. En él se pueden consultar las imágenes del Anejo 1 colocadas a fin de ayudar en el análisis.

Las situaciones que se han considerado para el análisis vienen caracterizadas por su relación de caudales citada en el capítulo 4 (ec. 4.10¹³).

5.1.1 Consideraciones iniciales

5.1.1.1 Perfil teórico de velocidades

En este apartado se extiende la explicación del perfil de velocidades teórico que presenta un flujo que se mueve dentro de un conducto circular solo sometido a una variación de presiones. En ese caso se mencionó, que la corriente sigue una distribución de corriente de Hagen – Poiseuille. Tal y como se ve en la figura Figura. 5.5.

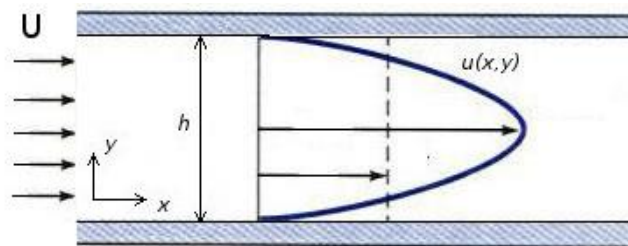


Figura. 5.5 Perfil de velocidades de Hagen – Poiseuille
Fuente: <https://cfdconopenfoam.wordpress.com/category/tutoriales>

Considerando el movimiento en un plano, la ecuación que define el movimiento viene dado por la ec. 5.1.

$$Pe + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad \text{ec. 5.1}$$

En la que h es el diámetro del conducto. Pe es el gradiente de presión reducida se define por la ecuación 5.2.

$$-Pe = \frac{\partial(P+\rho \cdot U)}{\partial x} \quad \text{ec. 5.2}$$

Considerando como condición de contorno que en la pared del conducto la velocidad es cero, tal y como se ve en la imagen 5.3, se tiene la ecuación del patrón de flujo, ec. 5.3.

¹³ Ecuación para el cálculo de la relación de caudales. $r = \frac{Q_2}{Q_3}$

$$u = (h - y) \cdot y \cdot \frac{Pe}{2 \cdot \mu} \quad \text{ec. 5.3}$$

Teniendo el gradiente de presiones se tiene la expresión para el perfil de velocidades, y teniendo en cuenta el sistema de ejes considerado puede calcularse la velocidad del flujo en cualquier punto en el diámetro del tubo.

En el proyecto se ha trabajado con las velocidades medias del flujo dentro de los conductos, calculada a partir de los caudales; o con los valores de la velocidad arrojados por el PIV.

5.1.1.2 Relaciones de caudal obtenidas

Los coeficientes de caudal obtenidos en los ensayos se aproximan a los de referencia pero no son exactamente iguales, como se muestran en la Tabla 5.1. Aun así, estas variaciones no superan el 10% en ninguno de los casos considerados, por lo que entra dentro de los límites aceptables y las relaciones de caudal que se han reproducido en el experimento están lo suficientemente cerca de los valores de r buscados.

Tabla 5.1 Comparación r real - r teórico para Re= 35 en las medidas de la vista 1

r real	r teórico	% Error
0.50	0.50	0.40
1.08	1.00	8.14
1.55	1.50	3.31

5.1.1.3 Caídas de presión

A partir de los datos de las presiones recogidas en cada conducto, se puede cuantificar la resistencia que ofrecen las paredes de los conductos al paso del fluido. Estas pérdidas de carga se pueden calcular a partir de la diferencia de presión existente entre dos puntos. Así pues, se tienen dos coeficientes uno para cada ramal, aunque en ambos coeficientes se cuantifican las pérdidas en el conducto 1. El coeficiente K_2 (ecuación 5.5) está relacionado con las pérdidas del conducto 2 y el coeficiente K_3 (ecuación 5.6) con el 3.

$$K_2 = \frac{|P_2 - P_1|}{Q_1} \quad \text{ec. 5.5}$$

$$K_3 = \frac{|P_3 - P_1|}{Q_1} \quad \text{ec. 5.6}$$

Estos coeficientes dan una idea de la pérdida de presión que se tienen en los conductos en función del caudal que circula por ellos (Tabla 5.2 Resistencia de las paredes para cada ReTabla 5.2).

Tabla 5.2 Resistencia de las paredes para cada Re

$\frac{Pa}{ml/min}$	K_2	K_3
110	14	12
75	20	18
35	44	38

Al ser el caudal menor, la caída de presión por unidad de caudal es mayor ya que las presiones permanecen prácticamente constantes. Se aprecia que el coeficiente de resistencia K_2 es mayor que K_3 , lo cual concuerda con lo observado. El fluido encuentra mayor facilidad para circular por el conducto 3 en los tres Re considerados.

El $Re = 35$ se aprecia que tiene los mayores valores para estas resistencias. También se ha constatado una mayor deposición de las partículas en las paredes de los conductos. Los resultados en este caso también son peores debido a la peor calidad de las imágenes recogidas.

5.1.1.4 Discrepancia de caudal para $r = \infty$

Durante la realización del experimento se ha constatado un comportamiento anormal en el funcionamiento de la instalación para $r = \infty$. Cuando todo el caudal pasa por el conducto en el que se encuentra el caudalímetro este registra todo el caudal que impulsa la bomba. En esta situación aparece una discrepancia entre el caudal que marca el caudalímetro y el caudal calculado a partir de la velocidad de giro de la bomba.

El caudal que impulsa la bomba se calcula mediante la ecuación obtenida en la calibración con el caudalímetro, ec. 4.7¹⁴. Así pues, este caudal calculado se corresponde con el que circula por el conducto 1 (Q_1) y es el que se usa para conocer Q_3 , a partir de los datos que aporta el caudalímetro (Q_2) y conociendo que Q_1 es la suma de los caudales que circulan por ambos ramales.¹⁵

Tabla 5.3 Caudales recogidos para $r = \infty$ en la vista 1

Revoluciones bomba (rpm)	Caudal bomba (ml/min)	Q_2 (ml/min)	Q_3 (ml/min)
6000	292,656	288,7	3,956
4000	195,656	202,4	-6,744
2000	90,656	105,7	-15,4

Considerando esto se tiene que en algunas de las medidas el valor de Q_2 medido por el caudalímetro es mayor que el Q_1 calculado. En la Tabla 5.3 se

¹⁴ $Q_{real} = -10^{-6} \cdot x^2 + 0.0585 \cdot x - 22.344$ (ml/min)

¹⁵ $Q_1 = Q_2 + Q_3$

representan el caudal que se calcula que debería impulsar la bomba, y el que registra el caudalímetro. Considerando estos resultados se tendría que el caudal en el conducto 3 es negativo, por lo que se tendría un caudal circulando en sentido contrario al habitual. Se ha demostrado que este comportamiento no se produce.

El efecto se hace más significativo cuanto menores son las revoluciones a las que trabaja la bomba, es decir bajos números de Reynolds del caudal principal. Cuando la bomba gira a 2000rpm el caudal que registra el caudalímetro se aproxima al caudal calculado con la expresión que proporciona el fabricante (Q engranajes en la Figura. 5.6 Caudales respecto las revoluciones de la bomba Figura. 5.6). En la calibración explicada en el apartado 4.1.5, se observa una mayor dispersión del valor del caudal para altos números de Reynolds.

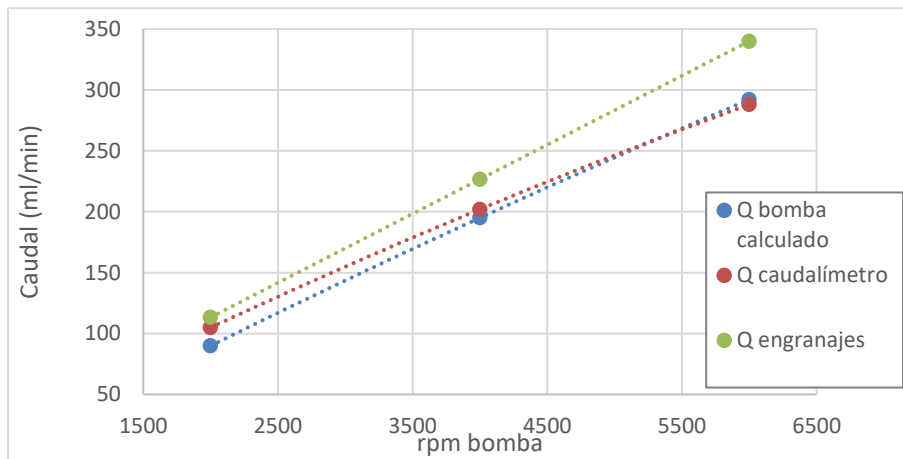


Figura. 5.6 Caudales respecto las revoluciones de la bomba

El flujo que atraviesa la bomba depende de la diferencia entre las presiones de aspiración e impulsión que, en este caso, producen los engranajes en su movimiento. Si estas presiones son más parecidas entre sí, circula menos fluido. Un desgaste de los dientes de los engranajes de la bomba conlleva a que ante una diferencia de presiones elevada, se “escape” fluido y el comportamiento no sea correcto. Como la ec 4.7 está ajustada al comportamiento de altas revoluciones de funcionamiento de la bomba, no reproduce correctamente el comportamiento que se tiene a bajas revoluciones.

A pesar de ello, el caudalímetro siempre marca el caudal real de la instalación, aunque cuando se trabaja en unión y circula fluido por ambos ramales es necesario utilizar la ecuación para poder conocer el caudal Q_3 .

5.1.2 Influencia de la relación de caudales para un mismo Reynolds

Se compara la influencia que tiene la relación de caudales en el patrón de flujo para un mismo Re. Para cada número de Reynolds se han comparado cinco relaciones de caudal diferentes: 0, 0.5, 1, 1.5 e ∞ . Hay una sexta relación de caudal que se corresponde a la que se tiene con el circuito en el que las dos válvulas reguladoras de caudal están abiertas. Dado que las relaciones de caudal que se tienen con el circuito abierto no coinciden para las tres vistas de análisis, no se han adjuntado esos resultados en la memoria¹⁶.

El Reynolds de referencia que se incluye en esta memoria como ilustración de la comparación es el de 75, que se corresponde con 4000rpm de la bomba. El análisis completo de todas las medidas se encuentra en el Anejo 2. En este anejo los resultados se muestran con las tres vistas consecutivamente de forma que pueda tenerse una visión completa del modelo.

Considerando la geometría del modelo y las situaciones reproducidas en el experimento, el patrón de flujo viene determinado por la relación de caudales y la presencia de los hilos en los conductos.

¹⁶ Se pueden consultar en el Anejo 1, que como se ha indicado anteriormente contiene los resultados de todas las medidas realizadas.

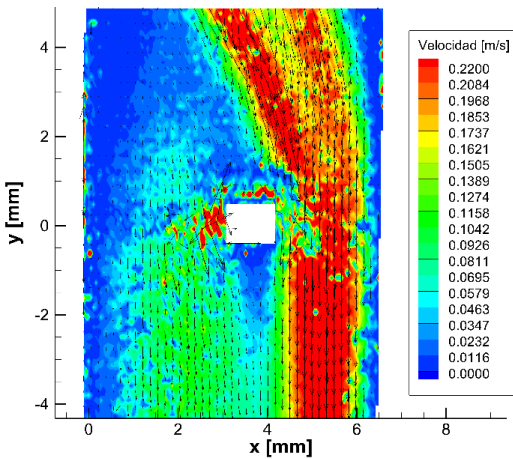
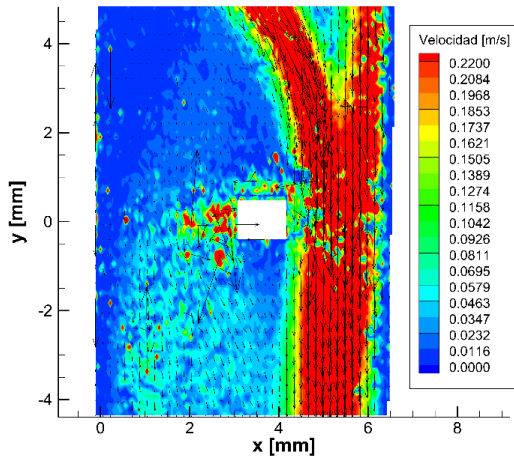
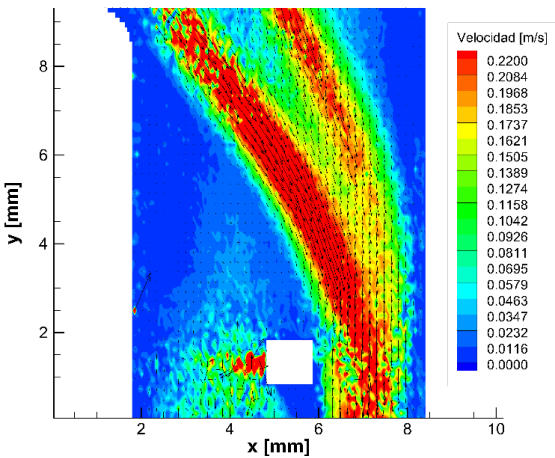
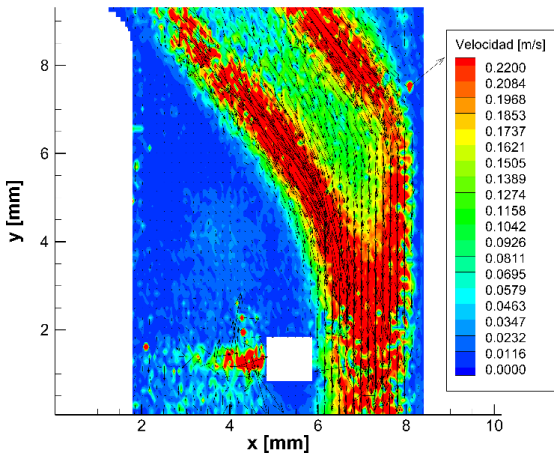
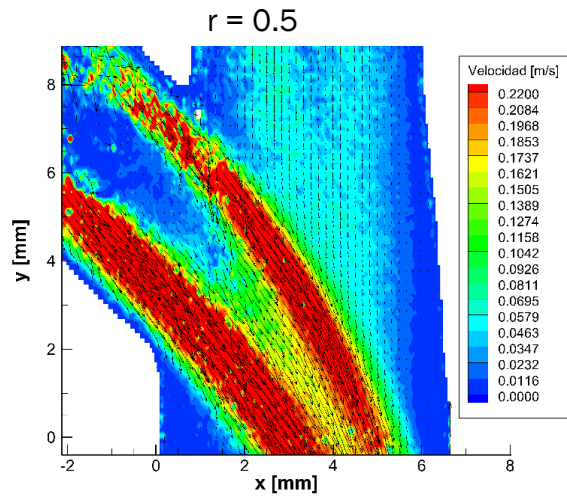
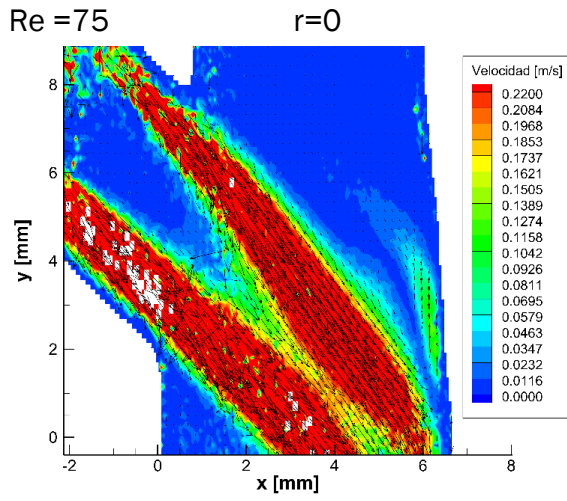


Figura. 5.7 Re= 75 y r= 0

Figura. 5.8 Re= 75 y r= 0.5

5. Análisis de los resultados

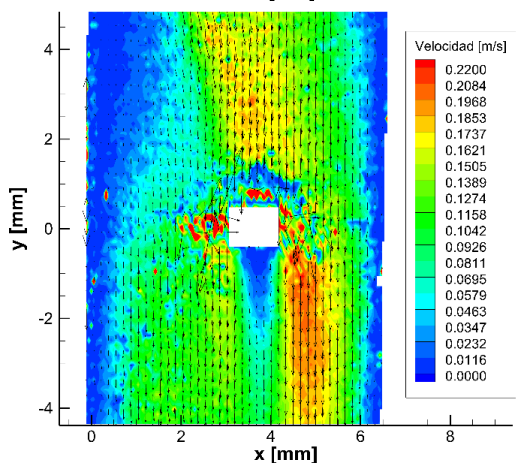
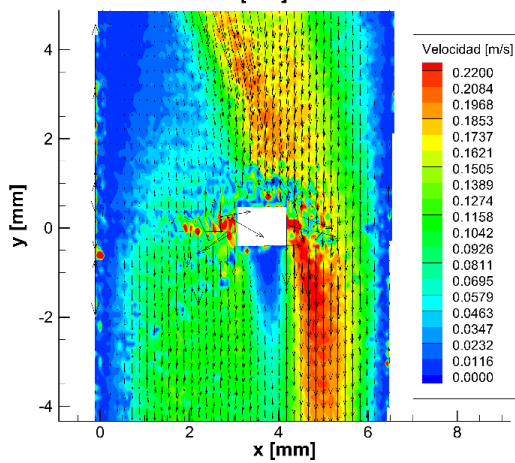
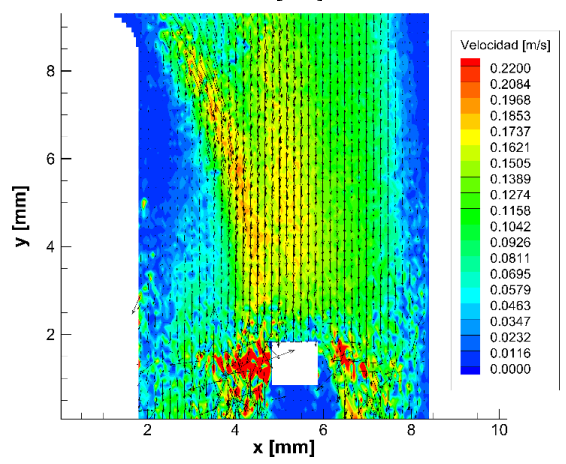
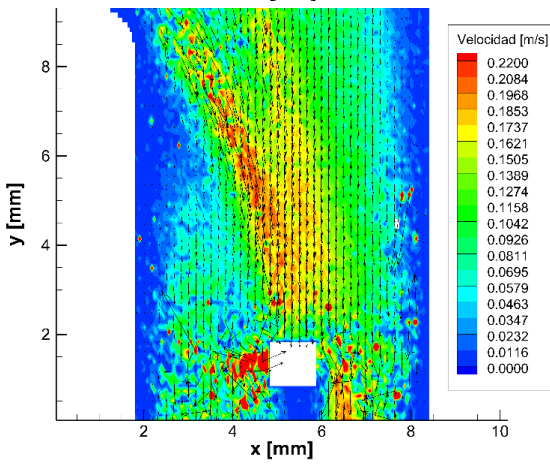
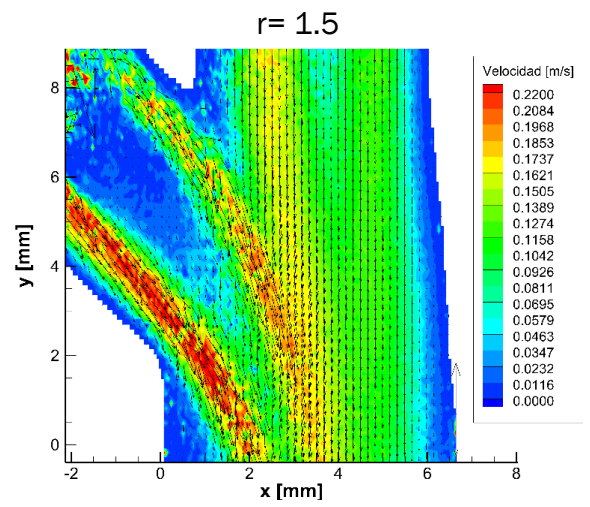
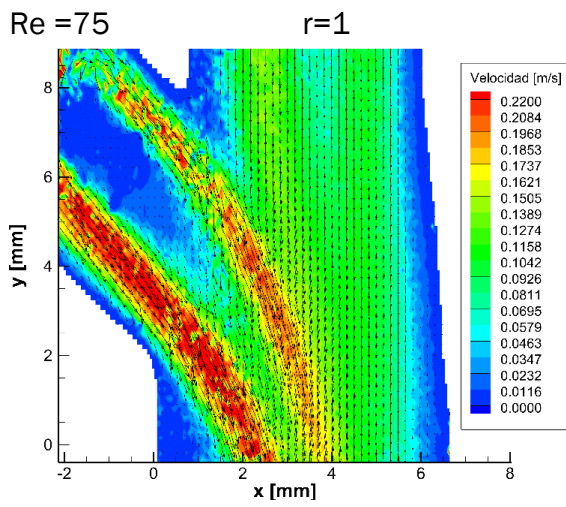
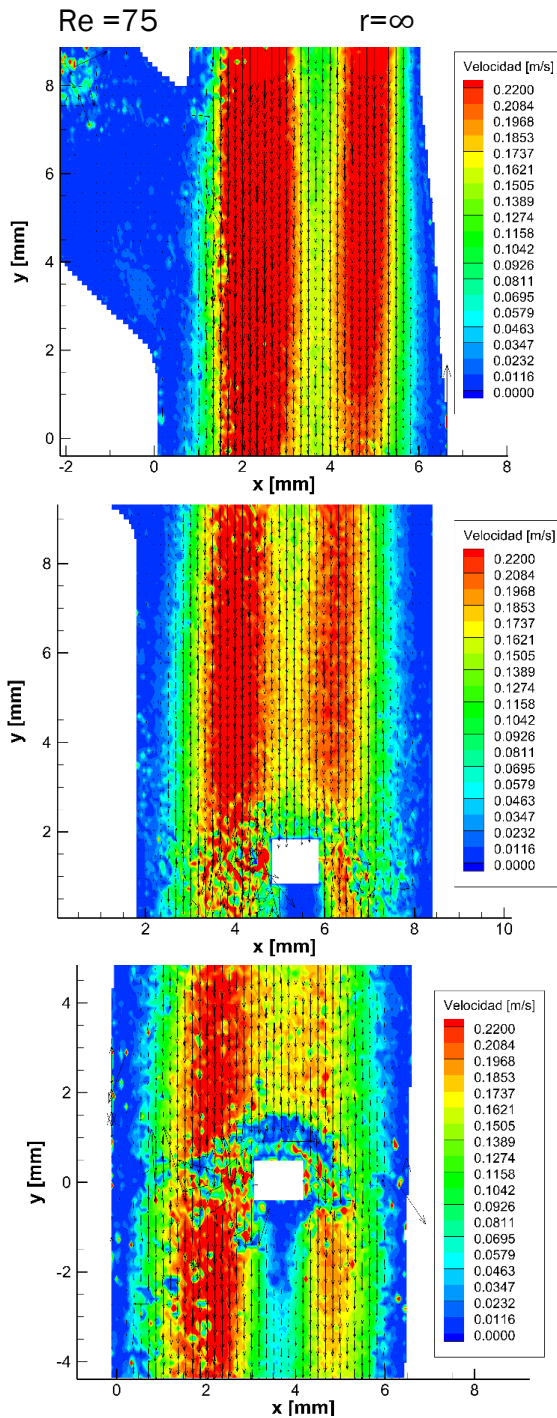


Figura. 5.9 Re= 75 y r = 1

Figura. 5.10 Re= 75 y r = 1.5



Situaciones extremas. $r = 0$ y ∞

Las situaciones en las que solo circula fluido por uno de los dos conductos de entrada distan del comportamiento general del resto de medidas al no ser una mezcla. Estas situaciones se consideran extremas dado que el resto de relaciones de caudal analizadas se encuentran entre ellas.

Aunque no se trate del comportamiento de la formación de una mezcla, el patrón de flujo $r = 0$ se asemeja a $r = 0.5$ en cuanto a que lo que prima en el campo de velocidades que se genera en el conducto 1 es el flujo que proviene del ramal 3.

En $r = 0$ y ∞ las estelas de los hilos son las que determinan el campo de velocidades. Al considerar $r = 0$ el fluido impacta contra la pared vertical del conducto generando un torbellino cuya velocidad viene determinada por la velocidad que lleve el fluido principal, es decir, el Reynolds. Este torbellino se analiza en el apartado 5.2.1.

Para $r = \infty$ el flujo aparece dividido como consecuencia de la estela de los cuatro hilos que se encuentran en el conducto 2. Al entrar en el conducto 1 se encuentra con el hilo 1, por lo que la estela en la corriente está presente a lo largo de toda la zona del modelo considerada.

Situaciones de r intermedios

En las vistas 1 y 2 puede constatarse que la velocidad del fluido en ambos conductos de entrada no se iguala hasta no tener relaciones de caudal cercanas a 1.5. Dado que el diámetro del conducto 3 es menor, su velocidad es mayor. Considerando en vez de la relación de caudales la relación de velocidades r^* se puede calcular la r para la cual las velocidades de los conductos 2 y 3 se igualan. En la ecuación 5.7 se tiene que r^* es la relación de velocidades medias, r la relación de caudal de los ramales 2 y 3 y a la relación de áreas de los conductos 2 y 3.

$$r^* = \frac{v_2}{v_3} = \frac{Q_2}{Q_3} \left(\frac{A_3}{A_2} \right) = r \cdot \frac{1}{a} \quad \text{ec. 5.7}$$

Utilizando esta ecuación, se puede hacer una transformación de las relaciones de caudal en relaciones de velocidad (Tabla 5.4). Así pues, para que la velocidad media sea igual en ambos conductos de entrada 2 y 3, se tiene que tener una relación de caudal de 1.4. En la Figura. 5.10 se puede apreciar cómo para esta $r = 1.5$ las velocidades de entrada son muy similares y el patrón de velocidades a la salida del modelo es el más uniforme respecto a los campos de velocidad obtenidos con las diferentes relaciones de caudal.

Tabla 5.4 Equivalente de la relación de velocidades para las relaciones de caudal

r	r^*
0.50	0.39
1.00	0.78
1.50	1.17

En ambos conductos de entrada hay al menos un hilo¹⁷ que reduce la sección del conducto en el punto en el que se encuentra y afecta al patrón de flujo de forma que la estela sigue siendo importante en la zona en la que se unen ambas corrientes. El patrón de flujo de la corriente que circula por el ramal 3 viene determinado por el hilo 3, cuya estela se sigue apreciando en la mezcla de las dos corrientes.

A su vez, el flujo proveniente del conducto 3 es prioritario en el campo de velocidades de la mezcla en todas las relaciones de caudal salvo $r = \infty$ en la que no circula fluido por este ramal. El flujo del conducto 3 entra formando un ángulo de 45° respecto al flujo del conducto 2 y tiende a mantener la misma dirección que tenía dificultando la uniformización del campo de velocidades de ambas corrientes.

En las figuras 5.7, 5.8, y 5.9 puede apreciarse la gran influencia del flujo 3 en la mezcla resultante. Un $r = 0.5$ presenta un perfil de velocidades muy cercano al comportamiento de $r = 0$. Para $r = 0.5$, la mayor parte del flujo ocupa el 35% del diámetro del conducto 1, mientras que para $r = 1.5$ aumenta hasta un 63% considerando la zona anterior a encontrarse con el hilo. Por esto la estela del hilo 1 no aparece de forma palpable hasta una relación de caudal de 1. Para menores relaciones de caudal la mayor parte de la corriente de la mezcla (que no es homogénea por lo que se aprecian las dos corrientes originales) no impacta contra el hilo.

En el conducto 2 se encuentran 4 hilos que afectan considerablemente al patrón de flujo antes de producirse el mezclado de las corrientes. Solo para situaciones en las que Q_3 es al menos el doble que Q_2 deja de apreciarse la estela en el conducto 2. Aun así, la estela del cuerpo situado en el conducto 3 destaca en todas las relaciones de caudal analizadas ya que el flujo llega sin uniformizar a la zona de la mezcla afectando al patrón de flujo de esta.

Además, de las tres r consideradas, la de 1.5 es la que presenta una mayor homogeneización de las velocidades. Con esta relación de caudales ambos conductos aportan fluido con la misma velocidad a la mezcla.

5.1.2.1 Ensuciamiento de las paredes

En las imágenes de la vista 1 y 2 no se tiene una concordancia de los datos en la zona que comparten ambas imágenes. La zona común entre ambas vistas debería tener unos valores de velocidad iguales; y aunque siguen el mismo patrón de flujo, el valor de la velocidad no coincide. Este efecto está asociado al ensuciamiento de las paredes que genera un problema óptico. Las partículas adheridas a las paredes afectan a la nitidez de las imágenes que

¹⁷ El conducto 2 tiene cuatro hilos y el 3 uno, tal y como se especifica en el apartado 2.2.6.

recoge la cámara impidiendo que se capten correctamente la posición de las partículas.

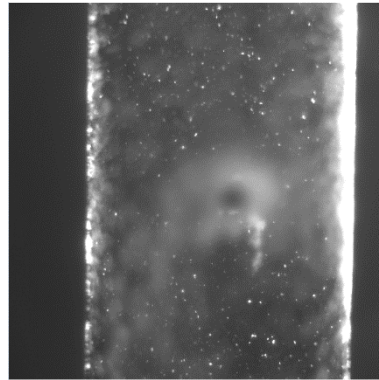


Figura. 5.12 Vista 3 con ensuciamiento en las paredes para $Re= 35$

El ensuciamiento de las paredes es más palpable cuanto menor es la velocidad del flujo, es decir, para $Re= 35$. Las medidas recogidas en este caso se ven afectadas por partículas adheridas a las paredes tal y como se ve en la Figura. 5.12 en la que la cantidad de partículas que se aprecia es menor.

El ensuciamiento en las paredes hace que sean más irregulares y con una mayor rugosidad, lo que acelera el proceso de ensuciamiento. Por lo tanto, el ensuciamiento de las paredes es un proceso exponencial.

5.1.2.2 Influencia de la presencia de impurezas

En la realización del experimento se ha tenido como problema principal la limpieza del modelo y de todo el circuito hidráulico. Esto ha generado la necesidad de limpiar el modelo de manera periódica. La adherencia de partículas a las paredes del circuito ha afectado a la calidad de las medidas realizadas, constatándose este efecto de forma más significativa para bajos Re . Se tiene como consecuencia de esto que los resultados de patrones de flujo que se tienen para $Re= 35$ difieren más de los otros dos Re considerados.

A su vez, en un momento se ha contaminado el fluido con la presencia de pelusas que se quedaban enganchadas en los hilos. En la recogida de las medidas de la vista 3 (se pueden comprobar el resto de medidas en cualquiera de los Anejos 1 ó 2) hay una pelusa adherida en el cuerpo que se aprecia en el campo de visión, que es el hilo 3. Estas pelusas adheridas a los hilos aumentan su sección y modifican el campo de velocidades.

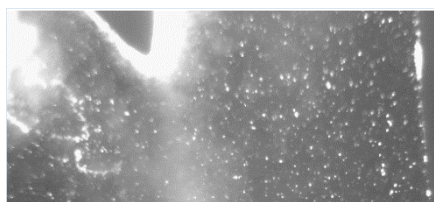


Figura. 5.13 Zona de unión del modelo

A su vez, los pequeños conglomerados de partículas pueden llegar a adherirse a las paredes. Cuando el fluido ha estado circulando un tiempo después de su limpieza, se ve la tendencia de estos coágulos a reunirse en el punto de la unión de los ramales. En la Figura. 5.13 puede verse cómo comienza a tener la zona de unión de los ramales una mayor concentración de partículas. Este punto, que es en el que comienza la mezcla de ambas corrientes es un punto de remanso y por lo tanto el fluido, al estar más parado, favorece a la deposición de las partículas.

5.1.3 Influencia del Reynolds para una misma relación de caudales

Considerando una misma relación de caudales, se compara la influencia que tiene el Reynolds del conducto principal. En esta memoria se consideran tres relaciones de caudal diferentes: 0, 1 y ∞ ; y para cada una de ellas se consideran tres Reynolds diferentes en el conducto principal: 35, 75 y 110.

Dado que el factor principal del patrón de flujo es la relación de caudales, se espera que los patrones sean iguales para las mismas r , aunque el Re sea diferente.

5.1.3.1 Adimensionalización de las velocidades

El Reynolds del conducto principal con el que se trabaja viene dado por la velocidad media que lleva el fluido. Se busca que el análisis del campo de velocidad sea independiente de la magnitud de la velocidad del conducto principal para que pueda realizarse una comparación de los patrones de flujo. Así, para poder comparar correctamente los patrones de flujo para diferentes Re se tiene la necesidad de adimensionalizar la velocidad media. La adimensionalización se ha realizado con la velocidad media del conducto principal según la fórmula ec. 5.8.

$$V_{adimensional} = \frac{|V|}{V_m} \quad \text{ec. 5.8}$$

Donde V_m , la velocidad media del conducto principal se calcula a partir del caudal y del área del mismo.

$$V_m = \frac{Q_1}{A_1} \quad \text{ec. 5.9}$$

Con esta adimensionalización se pueden representar los patrones de flujo de los tres Re dentro de la misma escala haciendo más sencilla su comparación. Así se independiza el patrón de flujo del caudal, por lo que cabe esperar que los perfiles de velocidad sean iguales, o muy similares, ante la misma relación de caudal.

A continuación, en la Figura. 5.14, la correspondiente a una relación de caudal de 0 para un Re de 110, se aprecia una discrepancia en la unión de las imágenes de la vista 1 y 2. Esta toma de medidas se realizaron con una pelusa adherida al hilo del conducto 3 lo que ha afectado al patrón de flujo de forma significativa. El efecto conseguido es similar al que se tendría con un hilo de mayor grosor.

Se colocan los resultados en función del número de Reynolds descendente dado que Re= 35 tiene unos resultados menos nítidos y de esta forma Re= 110 y 75 están situados al lado favoreciéndose su comparación.

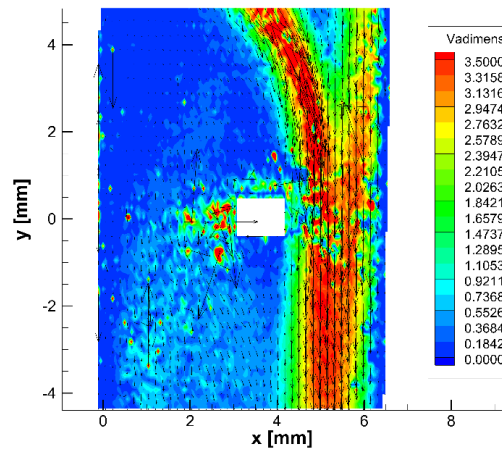
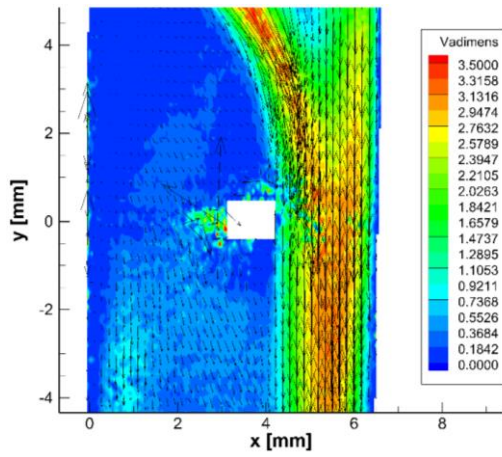
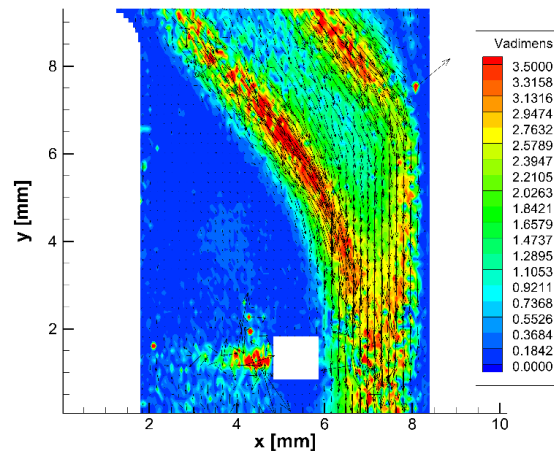
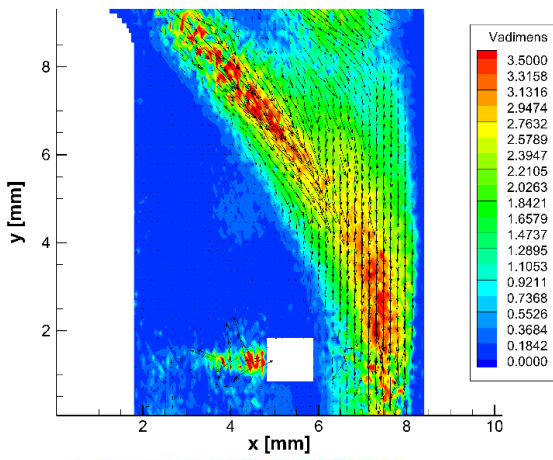
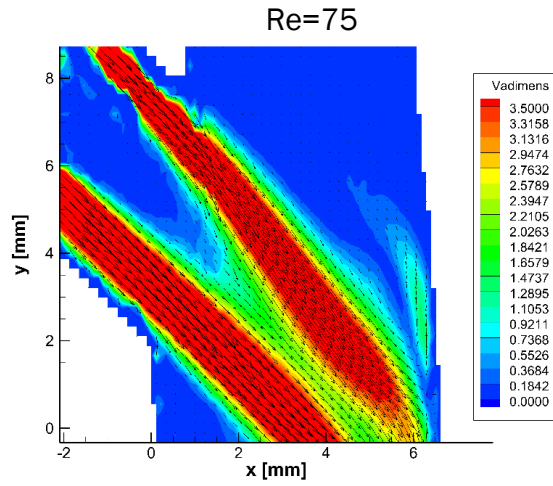
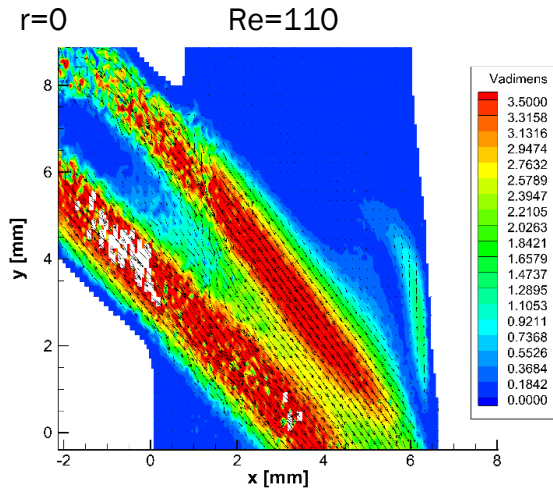


Figura. 5.14 $r = 0$ y $Re = 110$

Figura. 5.15 $r = 0$ y $Re = 75$

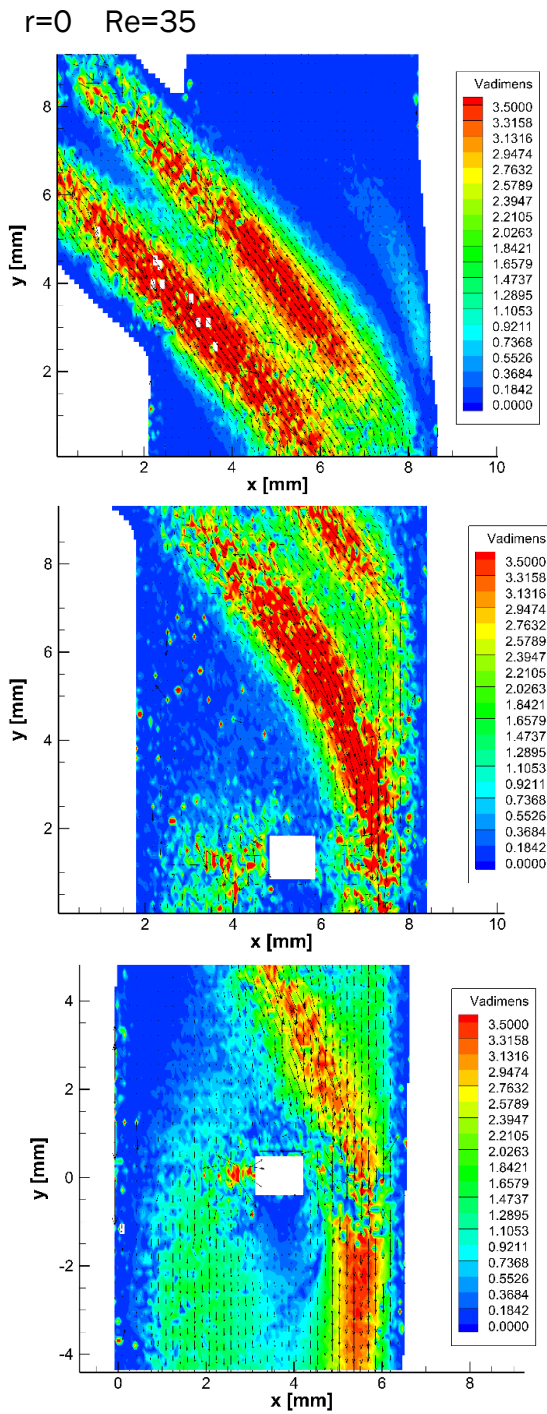


Figura. 5.16 $r=0$ y $Re=35$

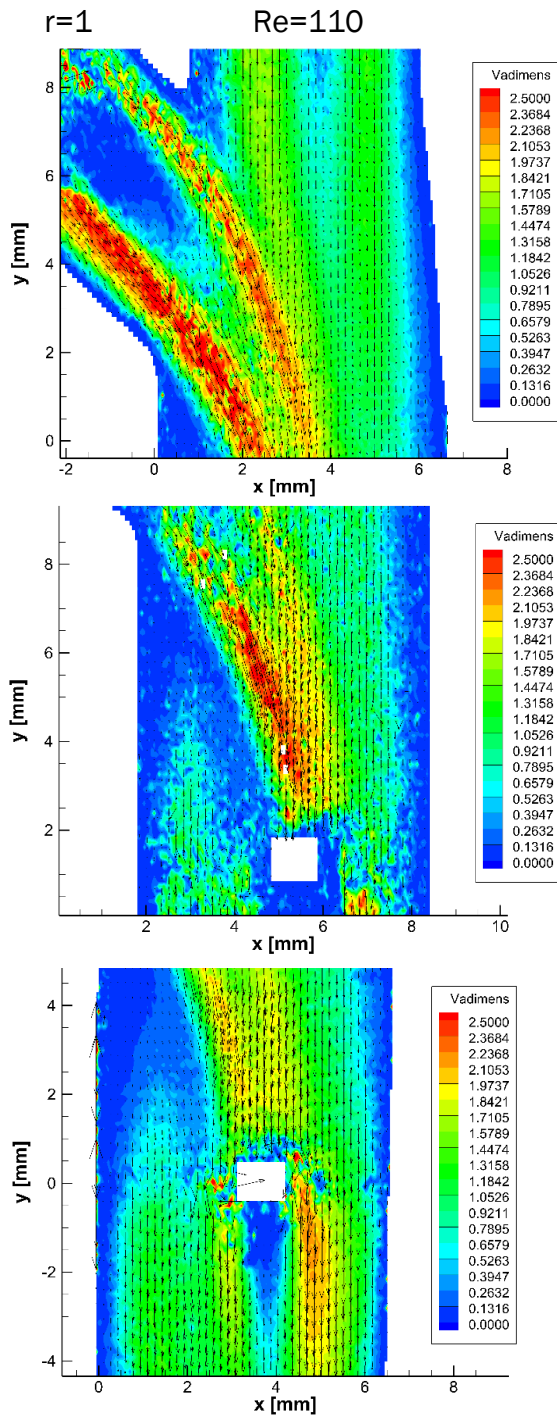


Figura. 5.17 $r=1$ y $Re=110$

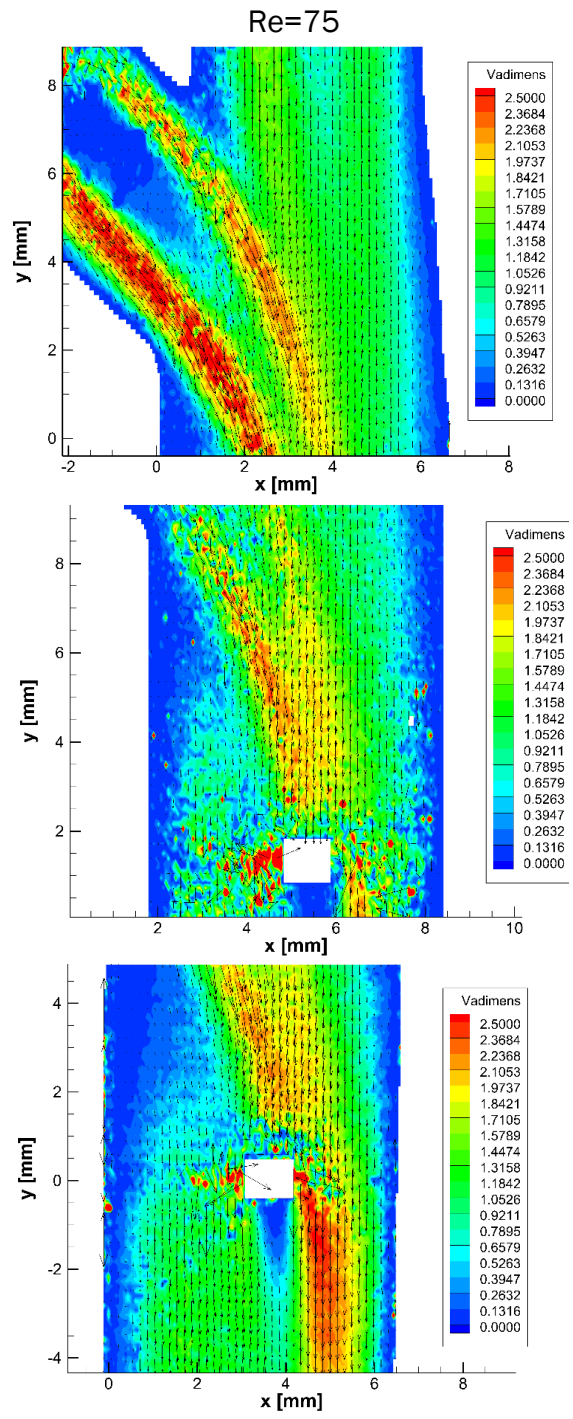


Figura. 5.18 $r=1$ y $Re=75$

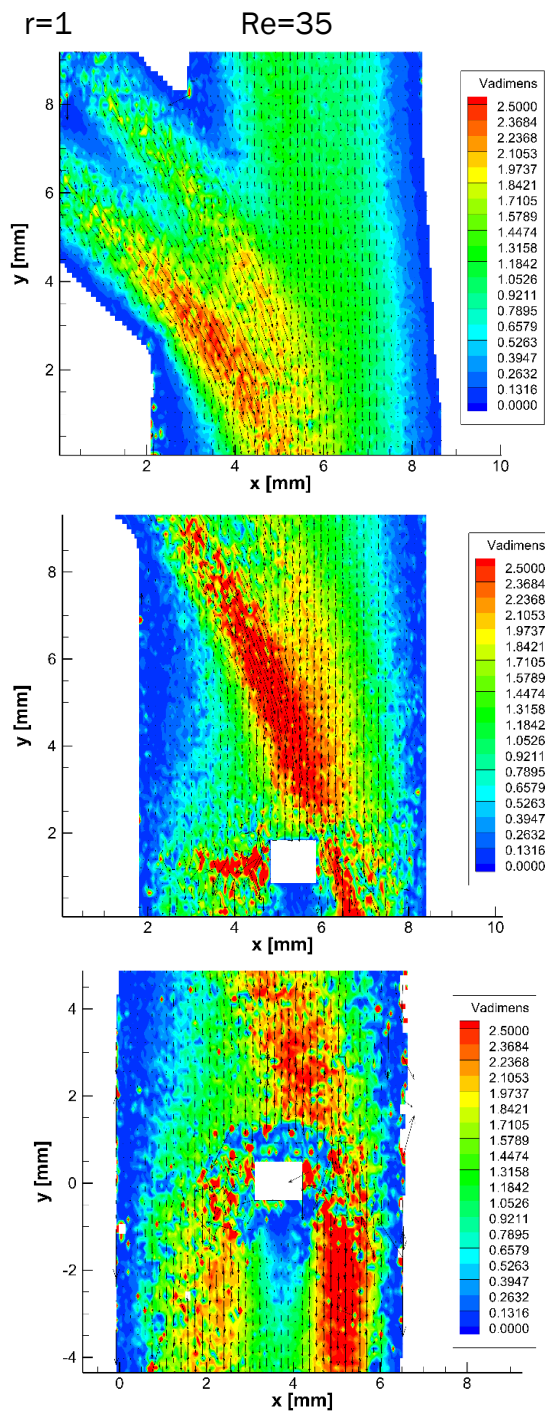


Figura. 5.19 $r=1$ y $Re=35$

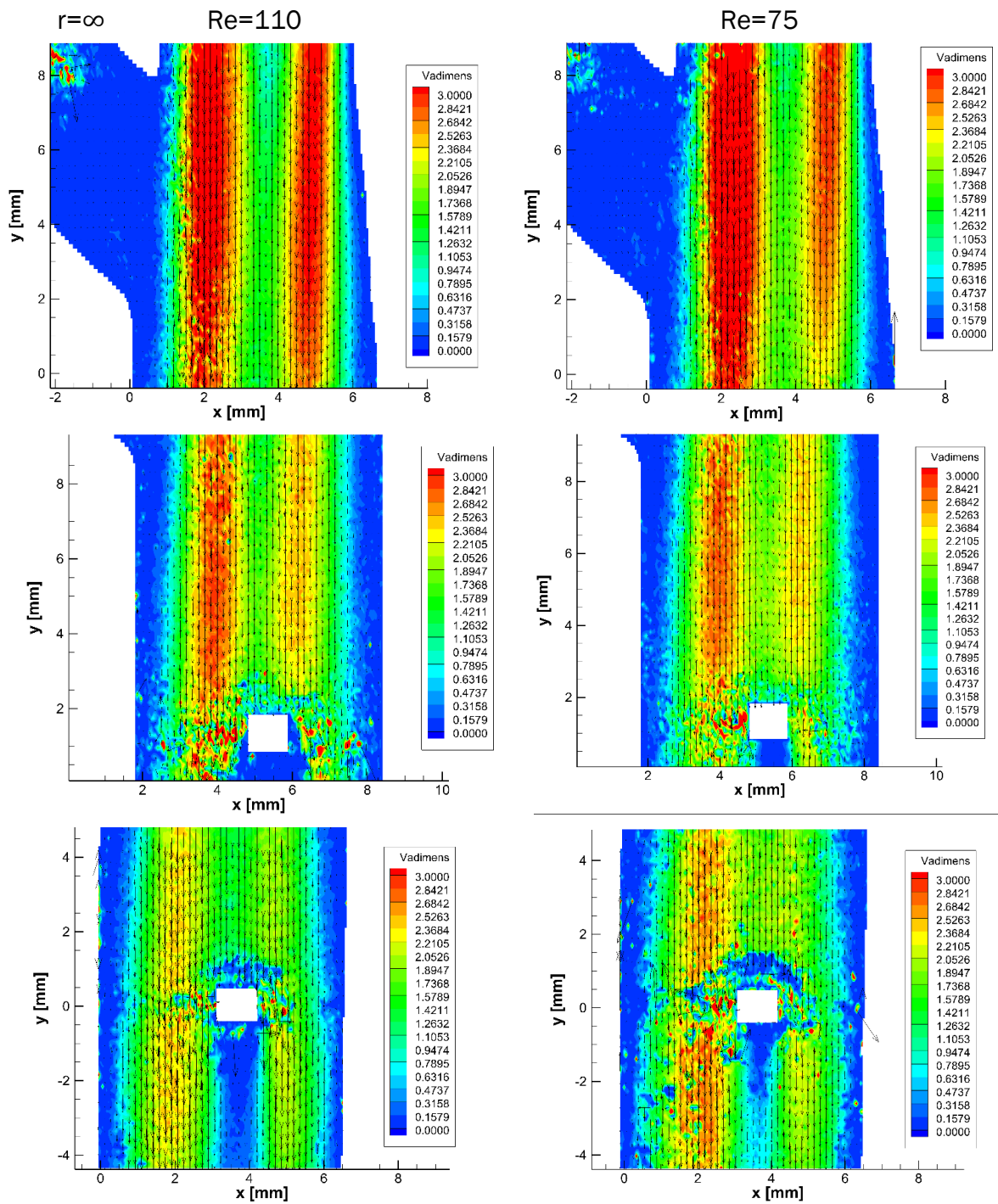


Figura. 5.20 $r = \infty$ y $Re = 110$

Figura. 5.21 $r = \infty$ y $Re = 75$

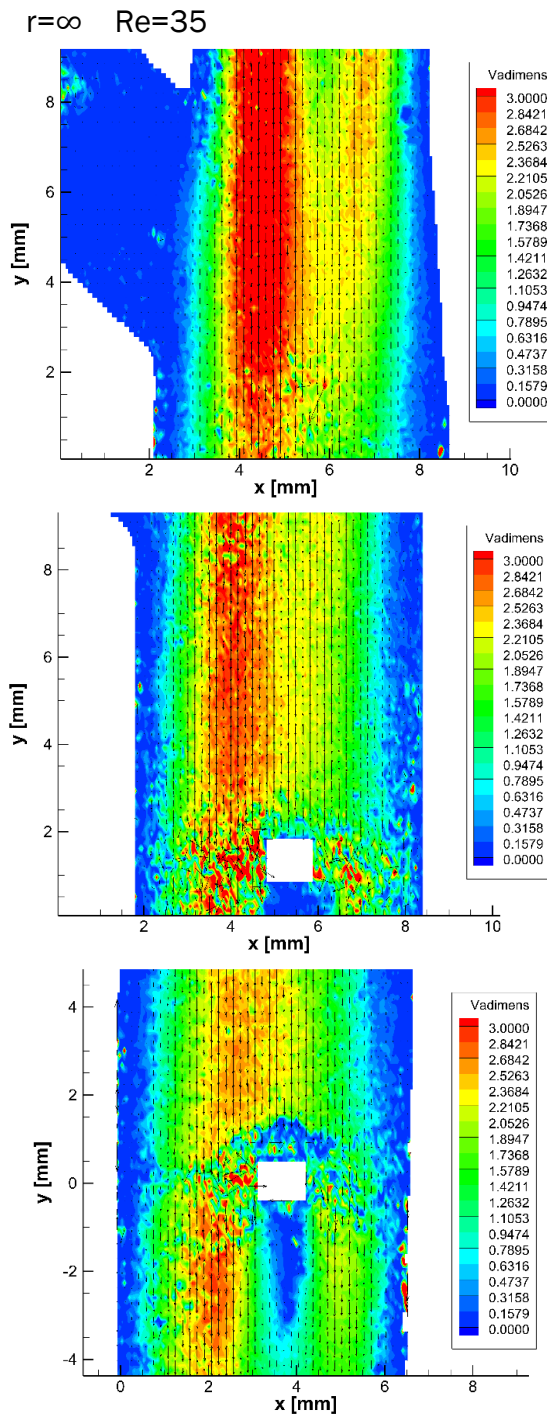


Figura. 5.22 $r = \infty$ y $Re = 35$

Al igual que en el apartado anterior son los resultados para $Re = 35$ que presentan una mayor discrepancia debido al ensuciamiento de las paredes. Al llevar el fluido una menor velocidad, la suciedad se adhiere más fácilmente a las paredes interfiriendo en la recogida de las imágenes. Se puede

apreciar que los resultados que se tienen en este caso están distorsionados. A pesar de las discrepancias, sí se aprecian similitudes entre los tres números de Re.

Para $r = 1$, los patrones de flujo para $Re = 110$ y 75 son iguales. Las similitudes entre los patrones de flujo difieren más en las situaciones intermedias que cuando circula caudal por ambos conductos de entrada.

De los resultados se puede concluir que el Re influye directamente en el módulo de la velocidad. Sin embargo, el patrón de flujo es el mismo independientemente del Re que se considera si la r es la misma.

5.1.4 Consideraciones respecto a una bifurcación

Haciendo un análisis de bifurcación, el patrón de flujo se ve afectado únicamente por el hilo del conducto 1. En el análisis en unión el patrón de flujo de la mezcla se ve afectado por todos los hilos salvo por el del conducto 1.

Otro detalle que separa ambas situaciones es el hecho de que en bifurcación el flujo que parte de la bomba se separa por primera vez en el modelo. En unión, el flujo se separa gracias al circuito hidráulico. Este hecho no es muy relevante para el análisis.

5.2 Análisis del comportamiento de un flujo incidiendo en un conducto

En el análisis del apartado 5.1 se observa un comportamiento del flujo inesperado cuando la relación de caudales es cero y todo el flujo circula por el ramal 3. Independientemente del número de Reynolds se aprecia una dirección del flujo diferente al lado del hilo 1. A su vez, el impacto de la corriente sobre la pared del conducto vertical genera al torbellino superior.

5.2.1 Análisis del torbellino superior

Dada la geometría que presentan los conductos, cuando la relación de caudales es 0 y todo el fluido circula por un conducto de 45° de inclinación y cambiarle la dirección, este tiende a mantener la dirección que tenía. Por esta razón impacta contra la pared del conducto de salida que es vertical. El choque contra la pared hace que parte del flujo se desvíe del resto de caudal e interactúe con el fluido que está estancado en el conducto 2 generando un pequeño torbellino. Este es el torbellino cuya formación puede verse en la Figura. 5.23 y que se aprecia con mejor nitidez en la Figura. 5.24 en la que aparece ampliado. Esta figura corresponde con $Re = 35$ y en ella se aprecia que el torbellino alcanza unas velocidades de 0.1m/s en el sentido al eje y , la mitad de los 0.22 m/s que se tienen en el flujo principal.

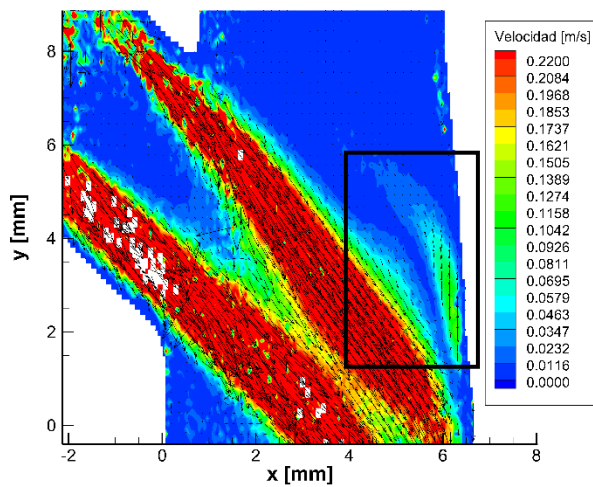


Figura. 5.23 Torbellino superior en la vista 1

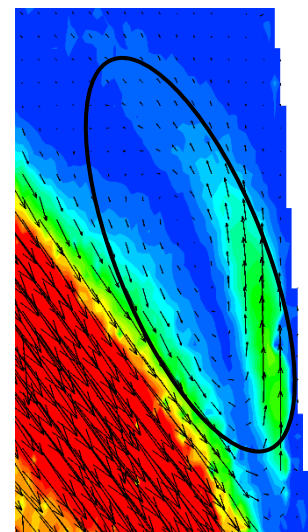


Figura. 5.24 Ampliación de Figura. 5.23

En la Figura. 5.25 se han representado los vectores de velocidad de forma que se puede apreciar el punto en el que el flujo “se da la vuelta” que es cuando cambia de signo respecto al eje y . Considerando que el eje y es hacia arriba tal y como se indicó en la figura 5.2, se tiene que el flujo pasa de tener velocidad negativa en dicho eje a tenerla positiva.

Este torbellino, en el plano medio, tiene una forma que podría aproximarse por un óvalo, con unas dimensiones de 1.87mm en la parte estrecha y 5.61mm en la dimensión más alargada.

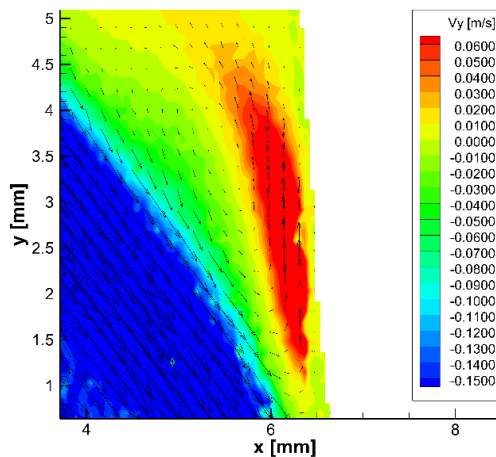


Figura. 5.25 Velocidad en el eje y del torbellino superior

El torbellino que aquí se genera tiene una velocidad que llega a alcanzar la mitad de la velocidad que lleva el flujo principal. Considerando los Reynolds estudiados, de 35 a 110, se ve que la relación de la velocidad del torbellino con respecto a la velocidad principal se encuentra entre 0.4 y 0.6.

El análisis PIV realizado es bidimensional y no consigue caracterizar completamente el comportamiento del patrón de flujo en esta zona que es

tridimensional. Para poder captar correctamente el patrón de flujo en esta zona sería necesario utilizar una técnica PIV tridimensional en el que son necesarias al menos un par de láseres y de cámaras. Con dos láseres podrían recogerse medidas simultáneas en dos direcciones y realizar un análisis más completo. Aun así, puede apreciarse las dimensiones del torbellino y su movimiento desde el plano medio del modelo, por lo que el análisis realizado se puede considerar que es lo suficientemente bueno.

5.2.2 Análisis del torbellino inferior

Se denomina torbellino inferior el que se genera en el lado del hilo 1, que es el hilo inferior porque es el último que se encuentra el fluido antes de salir del modelo. Se ha buscado caracterizarlo tanto antes como después del hilo 1, y para ello se han realizado medidas con los campos de visión de las vistas 2 y 3.

Al igual que para el análisis de la influencia del Re para las diferentes relaciones de caudal, como se comparan situaciones con diferentes números de Reynolds, se tienen que adimensionalizar los resultados. Así las velocidades adimensionalizadas van desde 0 a 3.5 m/s.

Tal y como se explicó en el capítulo de metodología, son necesarios dos tiempos de disparo diferentes, lo que conlleva la utilización de dos máscaras en el procesado de las imágenes. Así pues, en las imágenes resultantes se aprecia la zona de intersección entre ambas máscaras. Esta intersección se corresponde en la realidad con la separación del flujo principal del flujo que forma parte del torbellino. Los resultados obtenidos en esta intersección son menos representativos ya que se pierde definición en las imágenes al acoplar los resultados de ambas zonas.

Los resultados se muestran consecutivamente en orden ascendente del Re con las vistas colocadas consecutivamente siguiendo el sentido del flujo al igual que en el análisis anterior.

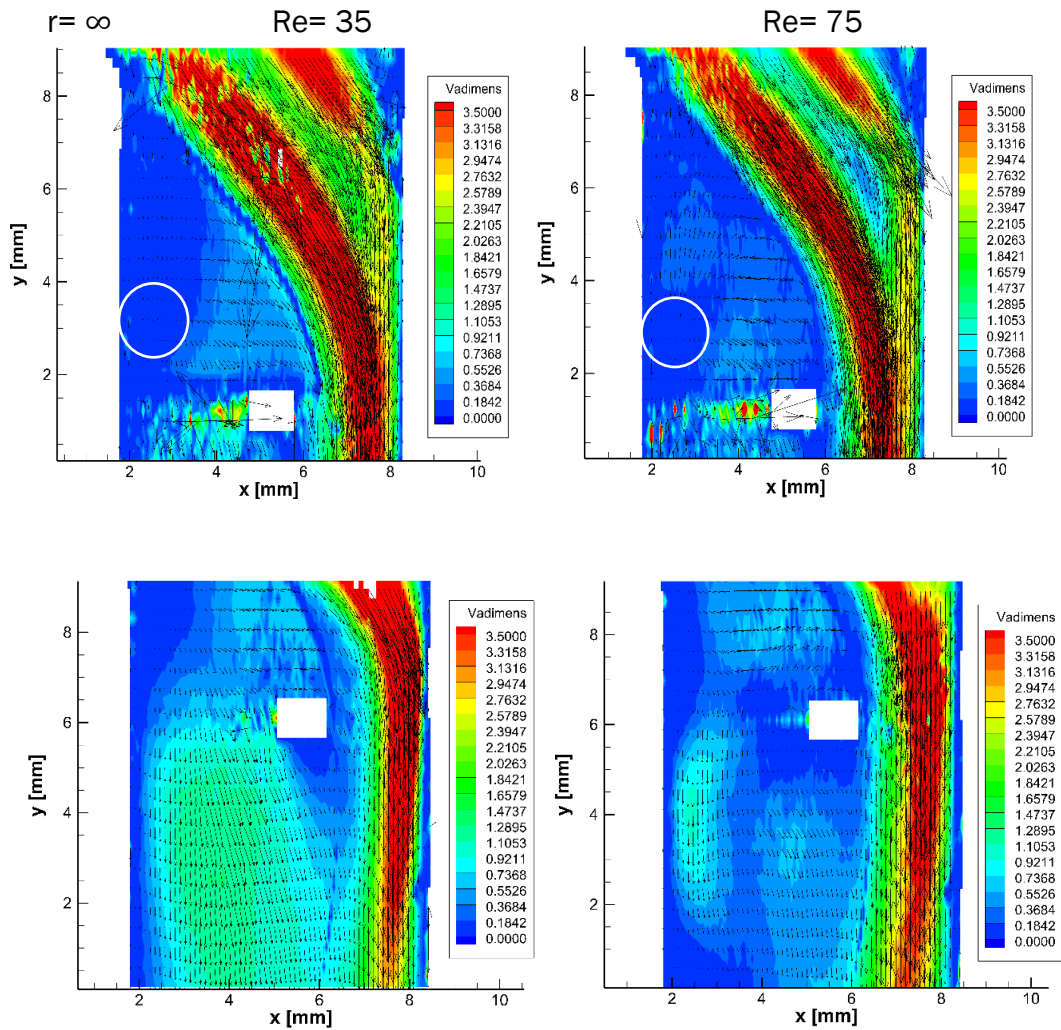


Figura. 5.26 $r = \infty$ y $Re = 35$

Figura. 5.27 $r = \infty$ y $Re = 75$

Considerando el comportamiento del torbellino antes del hilo 1, en los casos de Re igual a 35 y 75; las líneas de corriente en el plano medio del modelo parten de un punto que se marcado con un círculo blanco en Figura. 5.26 y Figura. 5.27. Además, el punto por el que sale el fluido en sentido del eje z está en ambos casos a una altura de 3mm considerando el eje que se aprecia en las respectivas figuras. De esto se deduce que el flujo del torbellino parte de las paredes del conducto de salida hacia el plano medio del modelo.

En el caso de $Re = 75$ se observa que en la estela del hilo 3 se tienen valores de la velocidad adimensional próximos a cero, algo que no se produce en los otros dos Re considerados. Estas bajas velocidades se asocian con un pequeño torbellino que se produce en la estela generada por este cuerpo y que puede deberse a la presencia de una pelusa en el mismo.

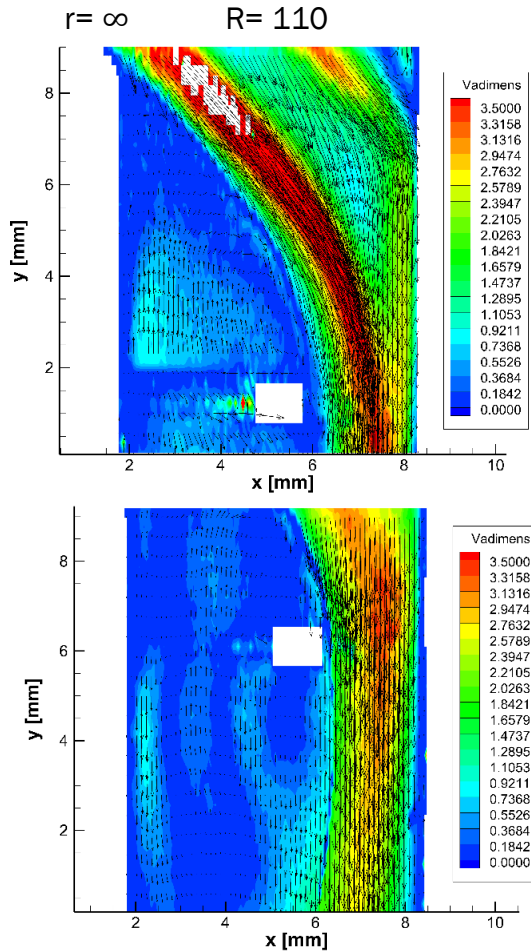


Figura. 5.28 $r = \infty$ y $Re = 110$

Considerando el número de Reynolds del conducto de salida, se tienen las dos situaciones extremas de $Re = 35$ y $Re = 110$ a las que les corresponden los patrones de flujo extremos. Así el patrón de flujo de los torbellinos que se generan para un Re entre 35 y 110 es una combinación de los patrones de flujo extremos. El patrón de flujo del torbellino se acerca más o menos al de uno de los Re extremos tanto como el Re del conducto de salida se acerque más a 35 o 110. Es decir, para un $Re = 45$ el torbellino que se forma presenta un patrón de flujo intermedio respecto a los otros dos Re considerados.

En el caso del Reynolds del conducto de salida de 110, el más alto considerado, no se aprecia como tal un torbellino en el plano medio del modelo. Se tiene un flujo central en sentido del eje y (sistema de ejes de la Figura. 5.4; el eje y va en sentido contrario al del flujo principal) alimentado por dos flujos en sentido contrario que circulan a cada lado del mismo. Este efecto se aprecia en la Figura. 5.28 y es el que hace que difiera de la situación de $Re = 35$ considerada. A su vez, la velocidad adimensionalizada del torbellino es

ligeramente menor a los otros dos casos considerados en los que llega a alcanzar los 1.5m/s.

Los torbellinos se producen por una interacción con la corriente principal de una zona del conducto en la que el fluido tiene una menor velocidad. El torbellino tiene una velocidad del orden de 4 veces menor a la del flujo principal. La corriente principal cae por la parte derecha de esta zona (la que tiene una menor cota de x según el sistema de ejes considerado) y se produce una zona de interacción entre las capas límite, produciéndose un arrastre del fluido que forma parte del torbellino. Por lo tanto, este torbellino es una consecuencia del “arrastre” que realiza el flujo principal del fluido que forma parte del torbellino.

A pesar de las diferencias, en los tres Re considerados el torbellino es tridimensional. Éste se produce en la parte exterior del conducto y circula hasta el plano central del modelo simétricamente respecto a este plano. Los patrones de flujo registrados indican que el torbellino no se desarrolla en el plano de análisis por lo que se escapa del análisis que permite la técnica de PIV bidimensional.

5.2.3 Análisis en distintos planos paralelos

El torbellino, al ser un fenómeno tridimensional, no queda completamente descrito en el plano de análisis considerado. Para caracterizar completamente el torbellino inferior sería necesario un análisis tridimensional que se escapa del estudio del PIV disponible en el laboratorio. Para compensar la falta de medios, se opta por realizar un análisis en diferentes planos paralelos al xy , teniendo así un análisis pseudo-tridimensional con el que poder conocer el comportamiento del torbellino en toda la sección del conducto.

Se parte de la posición original $X1$, ajustada durante la calibración de la instalación y en la que se capta el plano medio del modelo, y se realizan tres medidas en planos paralelos desplazando 0.5mm en sentido del eje z . Podrían realizarse tres medidas en la otra dirección del modelo, pero se ha considerado, por la geometría del modelo, que el torbellino es simétrico respecto a su plano medio.

En la siguiente Tabla 5.5 se adjuntan las características del procesado de las medidas realizadas en planos paralelos.

Tabla 5.5 Propiedades de las figuras de planos paralelos

Tamaño de la zona estudio (pix)	2048 x 1447
Tamaño de la zona estudio (mm)	15.16 x 10.7
Área de interrogación (pix)	32 x 64
Área de interrogación (mm)	0.236 x 0.472

Diámetros (mm): $D_1/ D_2/ D_3$	6,6/ 5,2/ 4,6
Factor de escala	0.621
Re_1	75
Tiempo entre disparos 1 (μs)	115
Tiempo entre disparos 2 (μs)	250
Caudal (ml/min)	195,656
Relación de caudales	0
Energía láser	6,7 - 7,2
Overlap (%)	25

El tiempo entre disparos 2 que aparece en la tabla 5.5 se corresponde con el tiempo necesario para captar el torbellino. Se han utilizado un tiempo de disparo diferente para el torbellino que para el flujo principal, por lo que se han tenido que utilizar también dos máscaras.

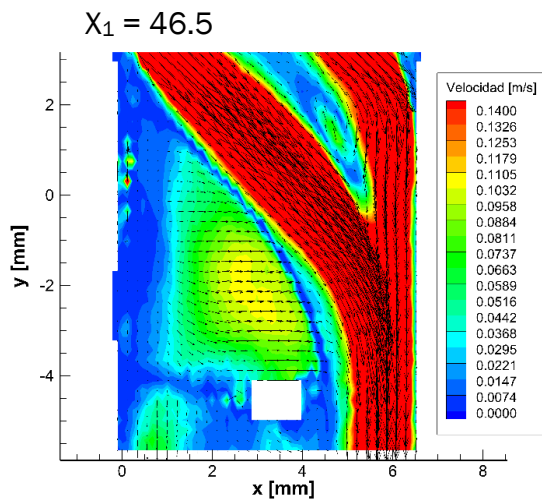


Figura. 5.29 $r = \infty$ en $X_1 = 46.5$

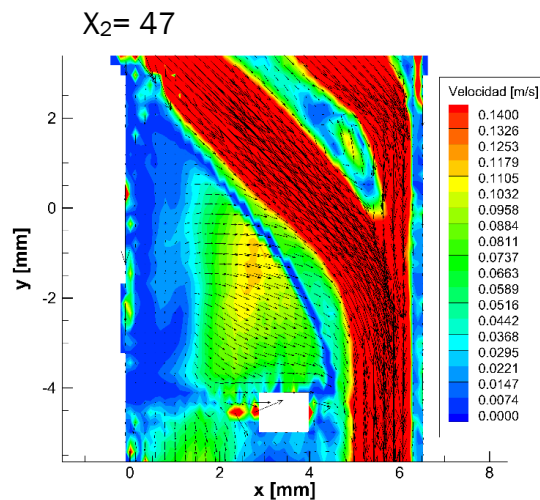


Figura. 5.30 $r = \infty$ en $X_2 = 47$

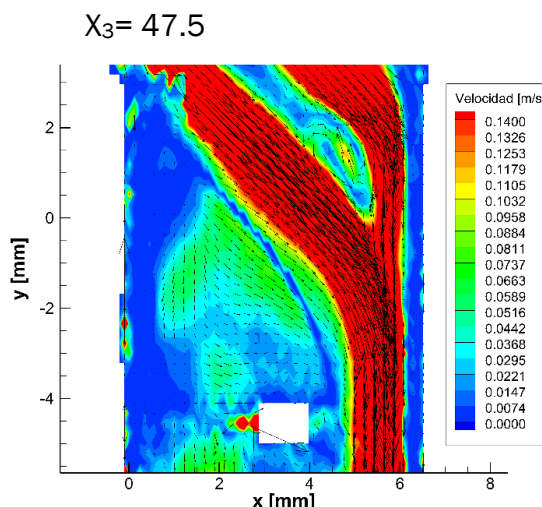


Figura. 5.31 $r = \infty$ en $X_3 = 47.5$

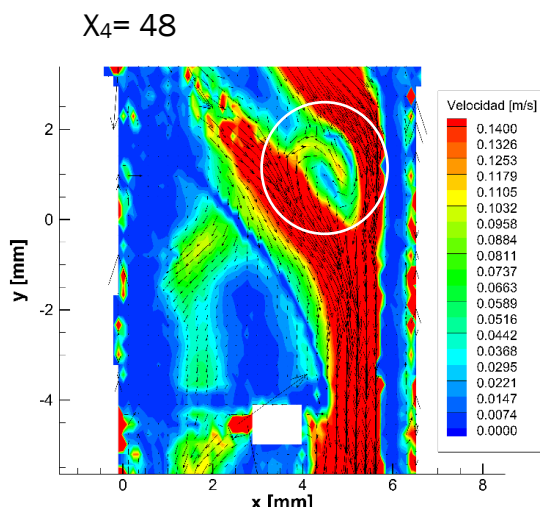


Figura. 5.32 $r = \infty$ en $X_4 = 48$

A partir de una posición del desplazador de 48, se está demasiado cerca de la pared como para obtener unos resultados nítidos. A medida que se van tomando medidas más alejadas del plano medio, las paredes se van viendo menos nítidas, y van ocupando más espacio en la imagen. Al efecto de acercarse cada vez más a la pared hay que añadir la suciedad adherida en la misma. Se enfocan las partículas que circulan por el fluido, pero estas están muy cercanas a las de la pared que quedan también enfocadas haciendo que las imágenes no sean todo lo nítidas que se desearía.

Se aprecia un aspecto curioso en el tratamiento pseudo tridimensional en la estela que deja el hilo 3 en el flujo. Se produce un pequeño torbellino en la estela dejada por este cuerpo, cuando la corriente principal en la que está se encuentra con la pared del conducto principal. El flujo que viene del conducto 3, llega separado por la estela en dos corrientes, una superior y una inferior. Al llegar a la zona de la unión, la parte superior de la corriente se ve forzada a descender, juntándose con la corriente que había pasado por debajo del cuerpo. Esto hace que se produzca un torbellino que se genera en el exterior del conducto y va hacia el plano medio. El fenómeno explicado anteriormente se aprecia en la Figura. 5.32, en la zona marcada con un círculo blanco. En la zona cercana a la pared se ve claramente que las líneas de corriente del torbellino se juntan con el flujo principal y van hacia el plano medio del modelo.

En las muestras recogidas en los diferentes planos, se puede apreciar que el flujo del torbellino inferior va desde la pared del conducto al interior. Esto se deduce a su vez de los análisis desde el plano medio del modelo en el que se ve un punto a partir del cual salen las líneas de flujo. El torbellino comienza como consecuencia del impacto del flujo con las paredes del conducto y “entra” hacia el plano medio del modelo. En la Figura. 5.29 se aprecia al flujo del torbellino del plano medio mezclándose con el flujo principal para seguir el camino marcado por éste. De esta forma, por la distribución del patrón de flujo que se tiene en esta zona parte del fluido del torbellino se ve arrastrado por el flujo principal que es a su vez el que abastece al torbellino. Así se tiene que el fluido que participa en el torbellino no está “estancado” en esa zona y no es siempre el mismo, sino que se va renovando a medida que el flujo circula.

Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras

6 Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se exponen las conclusiones a las que se han llegado en este trabajo. Estas se han agrupado en los dos mismos grupos del capítulo 5 de análisis de resultados.

6.1 Conclusiones acerca del funcionamiento de un mezclador

De los resultados se puede concluir que el número de Reynolds influye en el módulo de las velocidades, pero que es la relación de caudales entre los flujos de entrada la que determina el patrón de flujo de la mezcla.

En el caso de las situaciones en las que no se tiene el comportamiento de un mezclador, sino que solo circula fluido por uno de los conductos; el patrón de flujo queda determinado tan solo por la presencia de los hilos transversales al flujo que circula por los conductos.

La relación de caudales para la cual la mezcla tiene un perfil de velocidades más uniforme es 1.5. Esta es la relación de caudal de entre las consideradas, para la cual las velocidades que llevan las corrientes de entrada son más similares y por lo tanto el patrón de flujo es más uniforme a lo largo de toda la zona del modelo considerado.

Se constata que es el flujo que proviene del conducto 3, el conducto inclinado respecto al conducto de salida, el que más influye en el campo de velocidades de la mezcla. A partir del análisis de presiones se aprecia que el conducto 2 presenta mayores pérdidas de carga y por lo tanto el fluido encuentra más dificultades para circular. Si se tuvieran diferentes propiedades en las corrientes, las propiedades del flujo 3 serían determinantes siempre y cuando se tuvieran relaciones de caudal menores a 1.5. Así pues, en un mezclador se usaría el conducto 2 como corriente principal del que se quieren modificar sus propiedades gracias al menor o mayor caudal que circula por el conducto 3.

A partir de los resultados obtenidos, no puede establecerse con exactitud la longitud de mezclado de ambas corrientes, es decir, la distancia de tubería que necesitan ambas corrientes para mezclarse completamente. El fluido mezcla que abandona la zona de estudio no presenta una distribución del patrón de flujo uniforme en todo el diámetro. Por ello se deduce que la longitud de mezclado va más allá de la zona del modelo abarcada en el análisis y la mezcla homogénea podría llegar a producirse fuera del modelo.

Una conclusión adicional derivada del análisis es la detección de la zona en del modelo en la que se juntan los dos conductos como zona de remanso.

Este detalle es remarcable en caso de considerar flujos en los que haya partículas, dado que en esta zona del micromezclador se produce una acumulación de éstas que podría derivar en una limpieza periódica del equipo.

6.2 Conclusiones del análisis de torbellinos

En el análisis se destacan dos zonas en las que el perfil de velocidades de Hagen – Poiseuille desaparece debido a la formación de torbellinos. Estos torbellinos se forman para unas condiciones de $r=0$ y en función de la zona del modelo en la que se producen se habla del torbellino superior o inferior.

Como consecuencia del impacto del flujo del ramal 3 contra la pared del conducto de salida parte del fluido se separa del flujo principal generándose el torbellino superior. La velocidad media de este torbellino es del orden de la mitad de la velocidad media que lleva el flujo principal. Considerando el patrón de flujo que queda registrado desde el plano medio del modelo, el análisis bidimensional realizado es suficiente para caracterizarlo.

Respecto al torbellino inferior, éste se genera en la parte exterior del conducto de salida y se dirige hacia el plano medio con un patrón de flujo que depende del número de Reynolds del conducto de salida. El patrón de flujo del torbellino que se tiene para $Re=45$ es una combinación intermedia de los que se tiene para $Re=35$ y $Re=110$. De esto se deduce que el patrón de flujo del torbellino para cualquier Re será una combinación del comportamiento de los torbellinos para las dos situaciones extremas. El patrón de flujo del torbellino producido para un Re determinado se parecerá más al registrado para un $Re=35$ o $Re=110$ según como se aproxime el Re a cada uno de estos. Se observa del análisis realizado que para un $Re=35$ y $Re=75$, el patrón de flujo entra al plano medio del modelo desde el exterior del conducto por el mismo punto. En los tres Re considerados los torbellinos presentan una velocidad media cuatro veces menor a la velocidad media del flujo principal.

El torbellino inferior no queda caracterizado correctamente a partir de un análisis bidimensional por lo que se realiza un análisis en planos paralelos al plano xy . De este análisis se concluye que los torbellinos que se forman en el conducto principal, son tridimensionales y simétricos respecto al plano medio xy . También se observa un pequeño torbellino dentro de la estela del hilo 3 para un $Re=75$; cuyo movimiento queda palpable cuanto más próximo se está de la pared.

6.3 Líneas futuras

Una línea futura inmediata a este análisis es la aplicación de los resultados que se han obtenido en la validación de un modelo numérico.

El análisis actual se podría ampliar respecto a la zona del modelo considerado. Con el campo de análisis del modelo realizado, no llega a apreciarse mezclas completamente homogéneas de forma que no puede establecerse la distancia de mezclado.

El modelo utilizado presenta unas dimensiones mayores que las que son habituales en un micromezclador ordinario. Podría considerarse realizar un análisis con un modelo de menores dimensiones, siendo conscientes de las complicaciones técnicas que ello conlleva.

El análisis actual también podría ampliarse en el ámbito de la caracterización del torbellino inferior. En análisis pseudo-tridimensional realizado solo abarca al $Re = 75$; cuyos resultados pueden extrapolarse a $Re = 35$ y $Re = 110$, al presentar un comportamiento intermedio entre ambas situaciones. Sin embargo, el comportamiento tridimensional de estos torbellinos podría diferir en los diferentes números de Reynolds.

Se podría considerar repetir las medidas recogidas en las que la presencia de pelusas afecta a los resultados finales a fin de constatar que son la causa de ciertos comportamientos anómalos.

Bibliografía

Bibliografía

Libros y artículos científicos

Crespo Martínez, A. (2014) *Mecánica de fluidos*. Paraninfo.

Díaz Delgado, C.; García Aragón, J.A.; Salinas Tapia, H.; (2008) *Análisis experimental del efecto de la turbulencia en la velocidad de caída de sedimentos en suspensión*. Ingeniería, investigación y tecnología. Vol. 9, no. 1

Hessel, V.; Löwe, H.; Schönfeld, F. (2005) *Micromixers. A review on passive and active mixing principles*. Elsevier. Vol. 60, págs 2479 – 2501.
<http://doi.org/10.1016/j.ces.2004.11.033>

Memorias del XIX congreso internacional anual de la somim, (2013) *Desarrollo de micromezcladores LTCC para aplicaciones en micro-sistemas analíticos*. Pachuca, Hidalgo, México.

Viktorrov, V.; Mahmud M.; Visconte C. (2015) *Comparative analysis of passive micromixers at a wide range of Reynolds numbers*. Micromachines. Vol. 6, págs.. 1166 – 1179.
<http://doi.org/10.3390/mi6081166>

Trabajos anteriores

Bardera Mora, R. (2006) Tesis doctoral, *Aplicación del PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica*. Universidad complutense de Madrid. Capítulo 3.

Bastida Yañez O., et al. (2009) Proyecto. *Microprocesados aplicados a la producción de biodiésel*. Universidad nacional autónoma de México. Capítulo 2.

García Carrascal, P. (2015) Tesis doctoral, *Estudio experimental del patrón de flujo en un modelo de una bifurcación coronaria con stent*. Universidad de Valladolid.

Pascual García, C. Trabajo fin de grado, (2017). Universidad de Valladolid. Capítulos 3 y 4.

Pozo Álvarez, A. (2015) Trabajo fin de grado, *Análisis en frecuencia del modelo de una bifurcación de arteria coronaria*. Universidad de Valladolid. Capítulo 3.

Pozo Álvarez, A. (2018) Trabajo de fin de máster, *Diseño y construcción de una instalación de flujo no estacionario. Estudio de la estela de un cuerpo romo*. Universidad de Valladolid. Capítulos 3 y 4.

Catálogos de fabricantes y manuales

Bellevue, WA. (2010) *Tecplot. 360 2010 User's Manual*. Tecplot, Inc.

Catálogo Ismatec. *Bombas (Pumps)*

Catálogo Jumo. *Pressure Transmitter*.

Catálogo RS. IPSS series. *Semi – flush mount pressure transmitter*.

Catálogo Sonotec (revisión 2014). *Flow measurement using ultrasound*

Dantec Dynamics. (2010) *DynamicStudio v3.14 User's Guide*. Dantec Dynamics A/S.

Páginas web

Automatización industrial. (2011, consulta en 2018) *Bombas hidráulicas. Bombas de engranajes*. Esquema del funcionamiento de una bomba de engranajes

<http://industrial-automatiza.blogspot.com/2011/08/bombas-hidraulicas-2-bombas-de.html>

CFD con openfoam. (Consultado 2013, consulta febrero 2018) *Category archives: tutoriales*

<https://cfdconopenfoam.wordpress.com/category/tutoriales>

Michael Smith engineers ltd. (2018) *Micropump cavity style pump desing and suction shoe pump desing*. Características de los cabezales de las bombas de engranajes externos.

<https://www.michael-smith-engineers.co.uk/pumps/positive-displacement-pump/micropump-cavity-style-pump-design>

Valvias. (Consulta Febrero 2018) *Válvulas de aguja*.

<http://www.valvias.com/tipo-valvula-de-aguja.php>