



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ESTUDIO DEL PATRON DE FLUJO EN UN  
MODELO DE BIFURCACIÓN CON  
OBSTÁCULOS TRANVERSALES.**

**Autor:**

**Pascual García, César**

**Tutor: Castro Ruiz, Francisco**

**Departamento de Ingeniería  
Energética y Fluidomecánica**

**Valladolid, Septiembre 2017.**



# RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

---

## Resumen

En este trabajo fin de grado se estudia el patrón de flujo en un modelo de bifurcación, en la que se han introducido una serie de obstáculos transversales. El estudio se realiza en la zona de la bifurcación y en una zona aguas arriba de esta donde se encuentra un obstáculo. A modo comparativo se realiza el estudio con los resultados de una bifurcación sin obstáculos.

## Palabras clave

Bifurcación

Flujo laminar

PIV

Biofluidos

Obstáculo



# ÍNDICE

---



## Índice de capítulos

1. Introducción .....	13
1.1 Presentación .....	13
1.2 Objetivo .....	13
1.3 Contenido .....	13
2. Flujo en bifurcaciones .....	17
2.1 Flujo en bifurcaciones .....	17
3. Descripción de la instalación .....	27
3.1 Introducción .....	27
3.2 Elementos de la instalación .....	27
3.2.1 Fluido .....	27
3.2.2 Partículas .....	28
3.2.3 Depósito .....	29
3.2.4 Circuito hidráulico .....	30
3.2.5 Bomba hidráulica .....	33
3.2.6 Cámara oscura .....	34
3.2.7 Modelo .....	35
3.2.8 Guillotina .....	36
3.2.9 Cámara digital .....	36
3.2.10 Láser .....	38
3.2.11 Sensores de presión .....	39
3.2.12 Caudalímetro .....	41
3.2.13 Sincronizador .....	43
3.2.14 Controlador .....	43
3.2.15 Unidad de procesado .....	43
3.3 PIV .....	44
3.3.1 Principio de funcionamiento .....	45
3.3.2 Aspectos de la técnica PIV .....	46
4. Puesta a punto .....	53
4.1 Montaje de la instalación hidráulica .....	53
4.2 Montaje del modelo .....	54
4.3 Montaje del dispositivo láser .....	54
4.4 Montaje de la cámara .....	55
4.5 Montaje y ajuste de la guillotina .....	55
4.6 Arranque del sistema de generación de flujo .....	55

4.7 Ajuste de la cámara.....	56
4.7.1 Enfoque.....	56
4.7.2 Centrado .....	57
4.7.3 Control de la iluminación .....	58
4.8 Ajuste de paralelismo del modelo .....	59
4.9 Calibración del caudalímetro y bomba.....	59
5. Resultados.....	67
5.1 Modelo con obstáculos .....	68
5.1.1 Resultados en la zona de la bifurcación.....	68
5.1.2 Resultados en la zona del obstáculo .....	77
5.1.3 Comparativa para la misma relación de caudal .....	79
5.1.4 Comparativa para el mismo número de Reynolds a la entrada.....	84
5.1.5 Comparativa modelo con obstáculos y modelo sin obstáculos .....	88
6. Conclusiones .....	93
7. Bibliografía .....	97
ANEXO .....	101

## Índice de tablas

Tabla 3. 1: Propiedades de las partículas .....	28
Tabla 3. 2: Propiedades bomba hidráulica .....	33
Tabla 3. 3: Propiedades cámara digital.....	37
Tabla 3. 4: Propiedades del dispositivo láser .....	38
Tabla 3. 5: Propiedades del sensor de presión salida secundaria.....	40
Tabla 3. 6: Propiedades del sensor de presión de la salida principal.....	41
Tabla 3. 7: Propiedades Caudalímetro .....	42
Tabla 4. 1: Caudales del caudalímetro y calculado. ....	61
Tabla 4. 2: Diferentes caudales. Caudal de la bomba corregido.....	63
Tabla 5. 1: Relación de caudales $r=0,5$ ; $Re=110$ .....	69
Tabla 5.2: Relación de caudales $r=1$ ; $Re=110$ .....	71
Tabla 5. 3: Relación de caudal $r=1,5$ ; $Re=110$ .....	73
Tabla 5. 4: Relación de caudales $r=\infty$ ; $Re=110$ .....	74
Tabla 5. 5: Relación de caudales $r=0$ ; $Re=110$ .....	76

Tabla 5. 6: Relación de caudales $r=0,706$ ; $Re=110$ .....	78
---	----

## Índice de figuras

Figura 2. 1: Diferentes gradientes de presiones (Rubenstein, Wei, & Frame, 2012). 18	
Figura 2. 2: Longitud de entrada .....	19
Figura 2. 3: Perfiles de velocidad en una bifurcación (Buchmann et al. 2007) .....	20
Figura 2. 4: Líneas de corriente y vectores de velocidad para la posición A (a),(d); B (b), (e); C (c), (f). (Buchmann et al. 2007) .....	21
Figura 2. 5: Líneas de corriente en una bifurcación (Bharadvaj et al., 1982a).....	21
Figura 2. 6: Perfiles de velocidad en una bifurcación variando la relación de caudales (Bharadvaj et al., 1982a) .....	22
Figura 2. 7: Perfiles de velocidad en una bifurcación variando el número de Reynolds (Bharadvaj et al., 1982a) .....	23
Figura 3. 1: Depósito de la instalación .....	29
Figura 3. 2: Instalación antigua .....	30
Figura 3. 3: Instalación actual.....	31
Figura 3. 4: Posición válvulas.....	32
Figura 3. 5: Unidad de control de bomba de engranajes.....	34
Figura 3. 6: Modelo bifurcación .....	35
Figura 3. 7: Cámara digital .....	37
Figura 3. 8: Dispositivo láser .....	39
Figura 3. 9: Sensor de presión de la entrada (izq.) y su pieza de acople (der.).....	40
Figura 3. 10: Sensor de presión de la salida principal.....	41
Figura 3. 11: Caudalímetro .....	42
Figura 3. 12: Esquema PIV .....	45
Figura 3. 13: Diagrama de dispersión de luz .....	47
Figura 4. 1: Gráfica de los caudales para las diferentes velocidades de giro de la bomba.....	62
Figura 5. 1: Modelo sin obstáculos (a) y modelo con obstáculos (b) .....	67
Figura 5. 2: Esquema de la bifurcación con sus flujos.....	68
Figura 5. 3: Perfil de velocidades; Relación de caudales $r=0,5$ ; $Re=110$ .....	70
Figura 5. 4: Perfil de velocidades; Relación de caudales $r=1$ ; $Re=110$ .....	72
Figura 5. 5: Perfil de velocidades; Relación de caudal $r=1,5$ ; $Re=110$ .....	73

Figura 5. 6: Perfil de velocidades; Relación de caudales $r=\infty$ ; $Re=110$ .....	75
Figura 5. 7: Perfil de velocidades; Relación de caudales $r=0$ ; $Re=110$ .....	76
Figura 5. 8: Perfil de velocidades; Relación de caudales $r=0,706$ ; $Re=110$ .....	78
Figura 5. 9: Relación de caudales $r=\infty$ .....	80
Figura 5. 10: Relación de caudales $r=0$ .....	81
Figura 5. 11: Relación de caudales $r=0,5$ .....	83
Figura 5. 12: $Re=110$ .....	85
Figura 5. 13: $Re=110$ .....	87
Figura 5. 14: Campo de velocidades para el modelo sin obstáculos. $r=1,3$ , en forma de mapa de colores.....	88
Figura 5. 15: Campo de velocidades para el modelo con obstáculos. $r=1,5$ , en forma de mapa de colores.....	88

# 1. INTRODUCCION

---



# 1. Introducción

## 1.1 Presentación

En este trabajo fin de grado se estudia el patrón de flujo en un modelo de bifurcación, en la que se han introducido una serie de obstáculos transversales. El estudio se realiza en la zona de la bifurcación y en una zona aguas arriba de esta donde se encuentra un obstáculo. A modo comparativo, también se realiza el estudio con los resultados de una bifurcación sin obstáculos.

El estudio experimental de este proyecto se ha llevado a cabo en el laboratorio de Mecánica de Fluidos del departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid.

El equipo experimental del laboratorio de Mecánica de Fluidos utilizado en este trabajo consta de una instalación hidráulica y un velocímetro de imagen de partículas (PIV).

El estudio del patrón de flujo en una bifurcación es de interés, entre otras aplicaciones, para procesos de mezclado en la industria química y en el análisis del comportamiento de la sangre en bifurcaciones de arterias en las que se ha implantado un stent.

## 1.2 Objetivo

El objetivo de este estudio es determinar el patrón del flujo a través de una bifurcación con un ángulo de bifurcación  $\alpha=45^{\circ}$  y en presencia de un cuerpo como transversal; para diferentes números de Reynolds y diferentes relaciones de caudal. Se analiza con detalle la influencia de la presencia de obstáculos en el patrón del flujo.

## 1.3 Contenido

La memoria del presente trabajo fin de grado está compuesta además de este, por los siguientes capítulos:

- **Capítulo 2. Flujo en bifurcaciones:** Se realiza análisis de las principales características del flujo a través de una bifurcación.
- **Capítulo 3. Descripción de la instalación:** En este capítulo se hace una descripción de cada componente de la instalación experimental, a continuación se hace una breve introducción a la técnica de Velocimetría de imagen de partículas (PIV).
- **Capítulo 4. Puesta a punto:** Se hace una descripción de cómo llevar a cabo el montaje de la instalación desde cero y de la calibración de los equipos de medida para poder obtener incertidumbres bajas en las medidas.
- **Capítulo 5. Resultados:** Se realiza una descripción de las medidas realizadas y un análisis de los resultados obtenidos.
- **Capítulo 6. Conclusiones:** Se presentan las conclusiones del estudio realizado.

## 2. FLUJO EN BIFURCACIONES

---



## 2. Flujo en bifurcaciones

En este capítulo se describe el movimiento que tiene un flujo laminar cuando circula a través de un conducto circular que se divide en otros dos conductos.

Se entiende como bifurcación a la región del conducto en la que este se divide en dos ramales que forman un ángulo  $\alpha$ .

### 2.1 Flujo en bifurcaciones

El hecho de que el flujo cambie su dirección a medida que se mueve a través de una bifurcación, provoca que adquiera un movimiento secundario, semejante al movimiento que se produce en el flujo en un conducto curvo. Al cambiar de dirección el flujo, los gradientes transversales de presión que aparecen originan un movimiento secundario de rotación. Con esta rotación, el movimiento adquiere un carácter claramente tridimensional. La rotación induce un momento cinético que provoca que la velocidad del fluido se aumente en la zona de la pared interior de los ramales.

El patrón de flujo se verá influenciado también por el ángulo  $\alpha$  de la bifurcación, aumentándose los efectos de flujos secundarios cuanto mayor sea el ángulo de la bifurcación. De manera análoga a lo que sucede en un codo de una tubería cuanto más pronunciado sea el ángulo, más brusco será el cambio de dirección.

Los esfuerzos tangenciales a los que están sometidas las paredes interiores de los ramales son mayores ya que se originan gradientes de velocidad mayores. El esfuerzo tangencial viene dado por la Ecuación (2.1):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

Donde  $\tau$  es la tensión tangencial,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido y  $\frac{du}{dy}$  es el gradiente de velocidad.

Otro de los aspectos a tener en cuenta a la hora de estudiar el flujo a través de una bifurcación es la relación de caudales entre un ramal y otro, ya que los flujos secundarios serán más extensos en el ramal por el que menos caudal circule.

El fenómeno de desprendimiento de la capa límite es cuando hay un gradiente de presión adverso, es decir, en un flujo viscoso, la ecuación de la cantidad de movimiento en la pared viene dada por la expresión:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) representa que para que el flujo se mantenga exento de recirculaciones la curvatura de la pared debe tener el mismo signo que el gradiente de presiones. En condiciones normales, el gradiente de presión es negativo y por lo tanto la ecuación se satisface y no se producen recirculaciones. Sin embargo a medida que el gradiente se aproxima a cero el flujo va separándose de la pared, llegándose a formar un punto de inflexión en el perfil de velocidades, que cuando el gradiente de presiones se vuelve positivo provoca un cambio de sentido en la velocidad, formándose así una zona de recirculación (Figura 2.1).

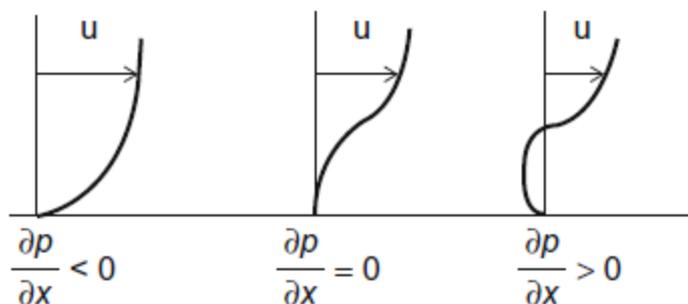


Figura 2. 1: Diferentes gradientes de presiones (Rubenstein, Wei, & Frame, 2012)

Otro fenómeno a destacar en el flujo en una bifurcación es el que aparece cuando los ángulos de la bifurcación son suficientemente grandes. Debido a la velocidad que lleva el fluido al entrar a la bifurcación, el fluido tiende a distribuirse hacia las paredes interiores de la bifurcación, alejándose de las paredes exteriores, esto provoca que el perfil de velocidades ya no sea una parábola con su punto máximo en la línea media del conducto, sino que este punto máximo se desplaza hacia las paredes interiores, esto conlleva que la velocidad del fluido en las paredes exteriores sea menor que en las paredes interiores. El flujo en este tramo no será desarrollado.

Existe una característica de los flujos en este tipo de configuraciones que se denomina longitud de entrada o región de entrada (Figura 2.2), esta característica es la distancia que requiere el fluido para volver a tener flujo completamente desarrollado después de desviarse en la bifurcación.

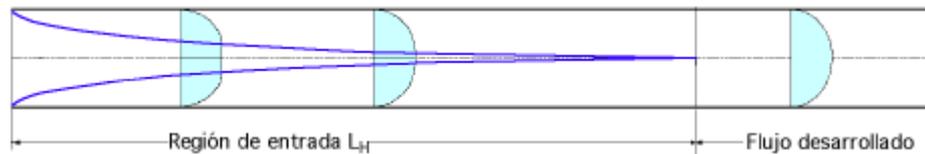


Figura 2. 2: Longitud de entrada

Aproximadamente, se puede decir que, si el área transversal del conducto permanece constante después de la bifurcación, se alcanza la condición de flujo completamente desarrollado a una distancia de dos a cinco veces el diámetro del conducto. Para flujo laminar el valor está próximo a  $5D$ .

En la figura 2.3 Se representa un modelo de bifurcación en el cual se puede ver los perfiles de velocidad en diferentes secciones del modelo.

En ella puede verse como en la zona de separación de los ramales el perfil de velocidad cambia del parabólico totalmente desarrollado a un perfil de velocidad con su máximo muy cercano a la pared interior del ramal.

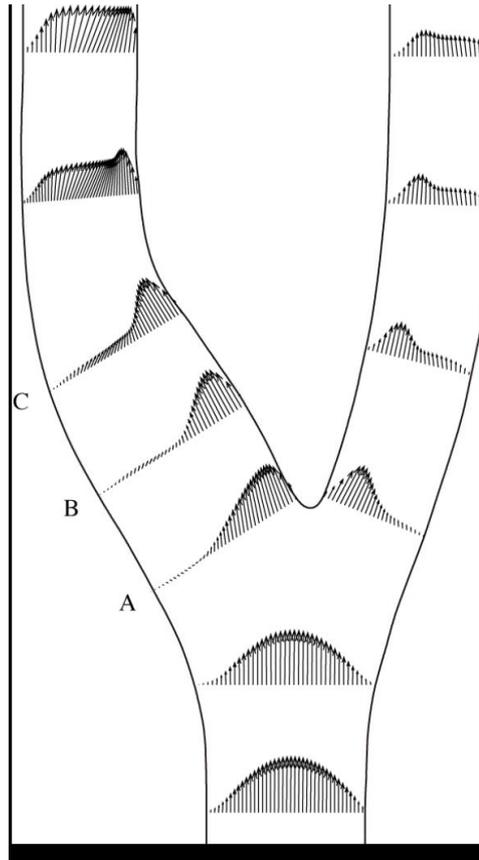


Figura 2. 3: Perfiles de velocidad en una bifurcación (Buchmann et al. 2007)

Las zona del modelo de la Figura 2.3 que comprende las marcas A, B y C se conoce como seno de la bifurcación, es la zona justo de inicio del ramal de salida de la bifurcación, en esta zona es donde se producen los fenómenos de interés para el estudio del flujo en bifurcaciones.

En el seno de la bifurcación puede verse como el fluido tiende a desplazarse hacia la pared interior del ramal debido a la rotación que le da el giro, anteriormente comentada, y en la pared exterior se produce una zona de baja velocidad.

En el seno de la bifurcación se producen movimientos helicoidales pudiendo hacer que exista una recirculación del fluido.

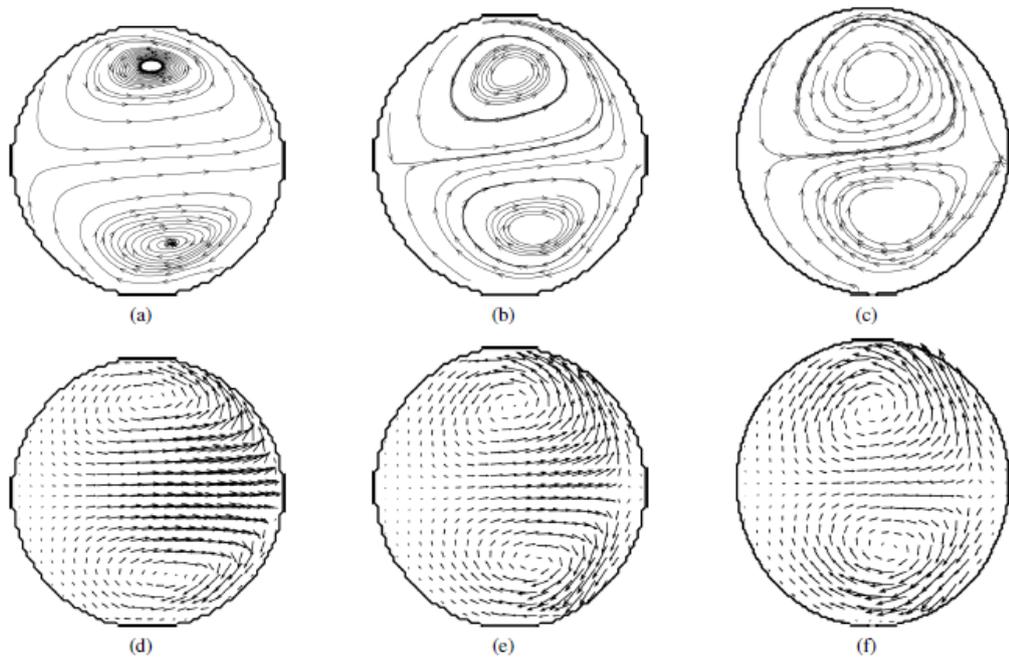


Figura 2. 4: Líneas de corriente y vectores de velocidad para la posición A (a),(d); B (b), (e); C (c), (f). (Buchmann et al. 2007)

En la Figura 2.4 se representa las líneas de corriente y los vectores de velocidad para diferentes secciones transversales del ramal de salida A, B y C (Figura 2.3). Se puede ver el movimiento helicoidal que se produce debido a los gradientes de presión y como va propagándose este fenómeno según avanza el fluido por el ramal.

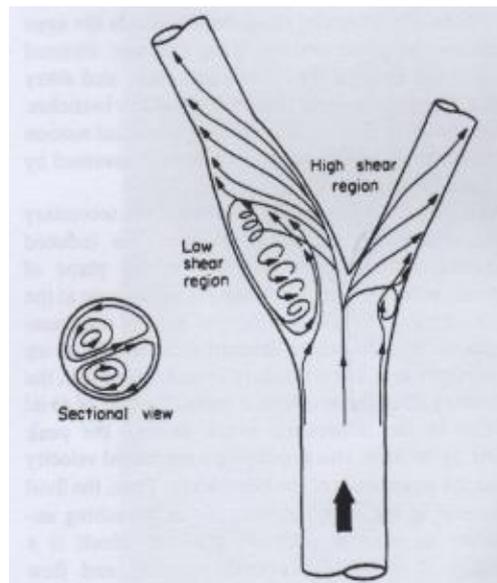


Figura 2. 5: Líneas de corriente en una bifurcación (Bharadvaj et al., 1982a)

En la Figura 2.5 puede observarse lo comentado anteriormente pero en forma de líneas de corriente. En ella puede verse la zona de la pared exterior del ramal, que será una zona de bajos esfuerzos tangenciales y la zona de la pared interior, que será una zona de mayores esfuerzos tangenciales al tener mayores gradientes de velocidad. En la Figura 2.5 también está representado el flujo en un plano transversal al eje del ramal. Se puede observar el movimiento secundario de rotación.

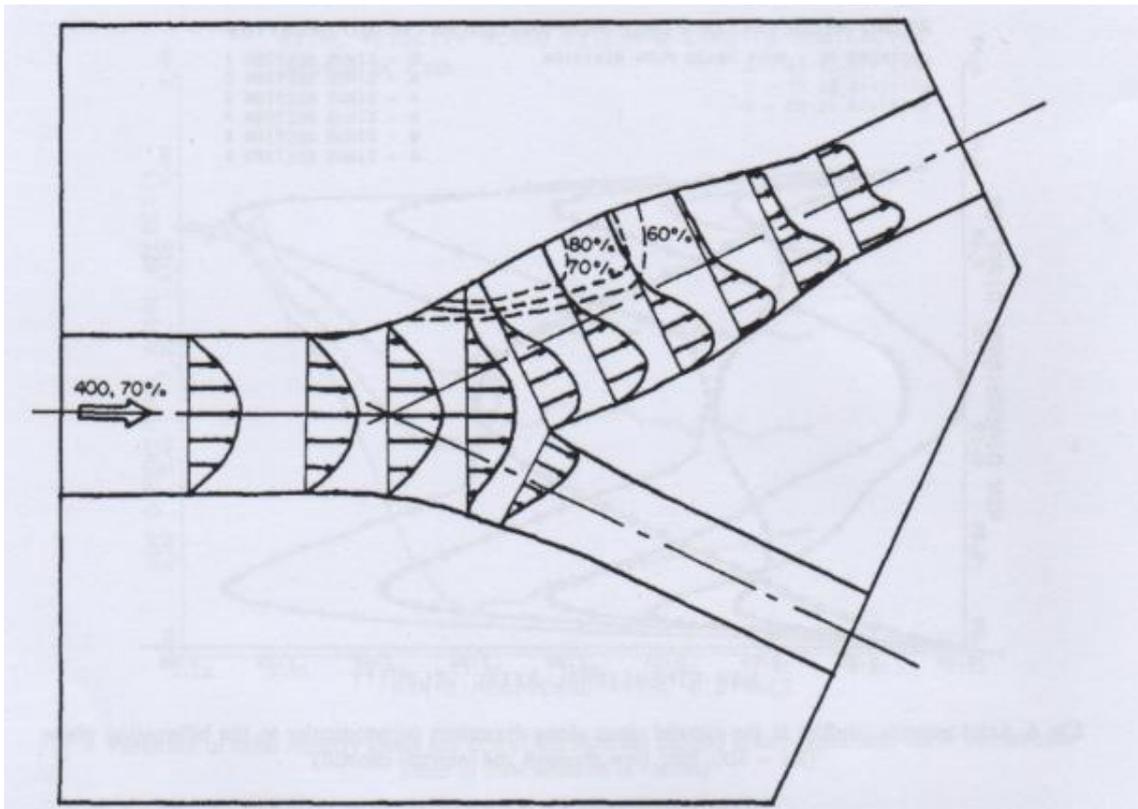


Figura 2. 6: Perfiles de velocidad en una bifurcación variando la relación de caudales (Bharadvaj et al., 1982a)

En la Figura 2.6 se representa los diferentes perfiles de velocidad para un modelo de bifurcación en la que se ha ido variando la relación de caudales, dando lugar a la zona de líneas discontinuas. En esta Figura 2.6 puede verse como cuando pasa por el ramal de estudio el 80% del caudal total que circula por el modelo se tiene una zona de bajas velocidades menor y según va disminuyendo el tanto por cien del caudal que circula por este ramal esta zona va aumentando de tamaño, pudiendo decir que cuanto menor caudal circule por el ramal mayor será el fenómeno de flujo secundario y más extensa será la zona de bajas velocidades.

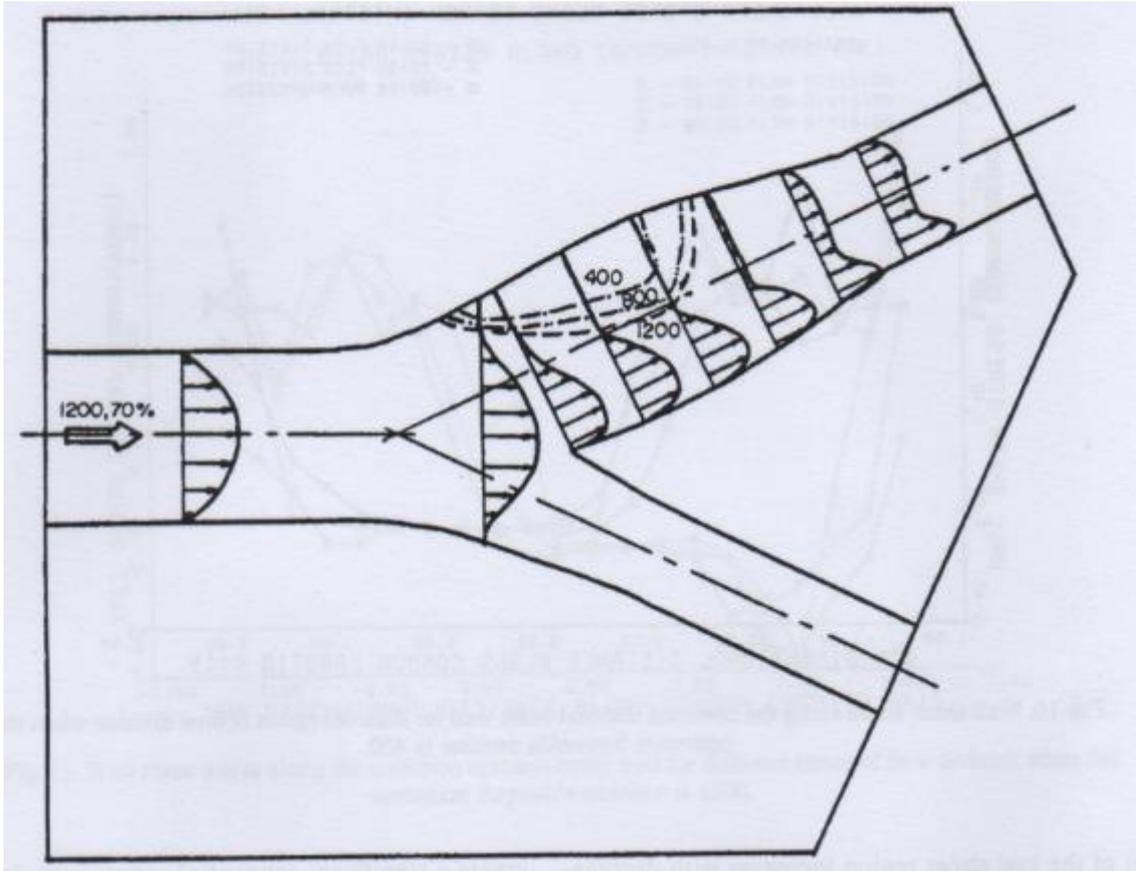


Figura 2. 7: Perfiles de velocidad en una bifurcación variando el número de Reynolds (Bharadvaj et al., 1982a)

Por último en la Figura 2.7 se representa los perfiles de velocidad en un modelo de una bifurcación para la cual se ha ido variando el número de Reynolds en el ramal de estudio, dando lugar a las líneas discontinuas. Se puede decir que para números de Reynolds bajos, al ser el flujo más laminar, este se adapta mejor ante las perturbaciones, como puede ser ante un giro. Esto provoca como puede verse en la Figura 2.7 que la zona de bajas velocidades sea una zona menor cuanto menor es el número de Reynolds.

En todas estas situaciones puede verse como la zona de separación de los dos ramales y las paredes interiores de los mismos son zonas de fuertes esfuerzos tangenciales, por lo tanto esta será una zona a tener en cuenta a la hora de estudiar la bifurcación ya que muchos de estos estudios están orientados al campo de la medicina, en bifurcaciones de arterias coronarias. Siendo de gran importancia conocer los esfuerzos que se producen en las paredes de las mismas.



### 3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

---



## 3. Descripción de la instalación

### 3.1 Introducción

En este capítulo se describen los elementos que componen la instalación de una manera detallada y su funcionamiento.

La instalación simula el flujo en un modelo de una bifurcación de arteria coronaria en posición vertical. Ha sido montado sobre una mesa de la forma más compacta posible.

Se puede dividir en varias partes: un recinto llamado cámara oscura en el cual se situará el modelo que simula la bifurcación y una cámara digital para registrar instantáneas del movimiento de las partículas fluorescentes. Una fuente láser de alta potencia, en el exterior de la cámara oscura, que proyectará un haz de luz que incidirá sobre el modelo y así conseguir iluminarlo y poder enfocar el plano de estudio deseado. El depósito, situado en la parte superior de la cámara oscura, donde se encontrará el fluido utilizado con las partículas fluorescentes, junto con la bomba de engranajes programable, con la que se conseguirá impulsar el fluido a través de la instalación.

La instalación ha sido diseñada para que el modelo pueda funcionar como bifurcación o como unión. Para ello en la parte superior de la cámara oscura se ha dispuesto de una serie de válvulas de esfera, de tal forma que abriendo unas y cerrando otras, se pueda pasar fácilmente de unión a bifurcación o viceversa.

### 3.2 Elementos de la instalación

#### 3.2.1 Fluido

El fluido utilizado es una mezcla formada en un 39% de agua destilada y un 61% de glicerina.

La mezcla posee una densidad de  $1158.23 \text{ kg/m}^3$  y una viscosidad de  $0,0098 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ .

El índice de refracción de la mezcla es muy importante que sea similar al del modelo (silicona), ya que si esto no es así las imágenes obtenidas son imágenes distorsionadas por la refracción y corregir este error es muy laborioso. Para este caso se tiene un índice de refracción de la mezcla de  $1,4129$ , compatible con el índice de refracción del modelo que tiene un valor de  $1,457$ .

En esta mezcla de agua destilada y glicerina se le añaden unas partículas fluorescentes para poder tomar instantáneas de las partículas.

### 3.2.2 Partículas

Las partículas utilizadas para la simulación son pequeñas esferas sólidas que acompañan al fluido en su movimiento. De manera que así se consiga representar la velocidad del fluido, pero sin alterar sus propiedades. Esto es posible si la densidad de las partículas y la de la mezcla es similar, ya que si son valores disimilares las partículas no representarían correctamente la velocidad del fluido.

Otro de los requisitos que deben tener estas partículas es que deben dispersar suficiente luz como para poder ser registradas con el programa de estudio y así poder obtener resultados.

Y por último debe haber una concentración suficiente de partículas en el fluido para poder obtener buenos resultados a la hora de tomar las instantáneas.

El estudio se realizará con partículas de 15  $\mu\text{m}$  de tamaño.

Las partículas empleadas están compuestas de Polímero Fluorescente (FPP). Poseen forma esférica y una densidad cercana a la del fluido de trabajo.

La longitud de onda reflejada por las partículas debe ser la suficiente para que la cámara pueda detectarlas y debe ser superior a la longitud de onda del haz de luz del láser.

El proveedor será Dantec Dynamics.

Tabla 3. 1: Propiedades de las partículas

Proveedor	Dantec Dynamics
Tipo	Partículas de Polímero Fluorescente (FPP)
Tamaño medio	15 $\mu\text{m}$
Densidad	1,19 $\text{g}/\text{cm}^3$
Velocidad terminal en el fluido de trabajo	34,5 $\mu\text{m}/\text{min}$

### 3.2.3 Depósito

El depósito utilizado es un recipiente de plástico ubicado en la parte superior de la cámara oscura. Está compuesto por un tapón con un orificio por el cual entra el tubo proveniente del conjunto de válvulas después de la salida del modelo. Este está sujeto en un perfil metálico, colocado también en la parte superior de la cámara oscura donde están ubicadas las válvulas de aguja, mediante una brida de plástico en la parte inferior a un refuerzo de madera (Figura 3.1).



*Figura 3. 1: Depósito de la instalación*

### 3.2.4 Circuito hidráulico

El circuito inicial del que se partió para la realización de este trabajo, fue el siguiente (Figura 3.2):



*Figura 3. 2: Instalación antigua*

Pero debido a la introducción de la posibilidad de cambiar el sentido del flujo (pasar de unión a bifurcación) cuando fuera necesario, se decidió poner la bomba en la parte superior de la cámara oscura y no como estaba anteriormente debajo de la mesa (Figura 3.3).

De esta manera se consigue que la aspiración esté puesta muy cerca del depósito que contiene el fluido y disponer una serie de válvulas y tuberías para que la instalación funcione en el modo deseado.



*Figura 3. 3: Instalación actual*

La instalación como se ha descrito, está alimentada por un depósito en la parte superior de la cámara oscura, este tiene una válvula que permite o impide el paso del fluido según se requiera. El fluido llega a la bomba que está situada justo a la salida del depósito y es impulsado por las diferentes tuberías hasta que llega al modelo.

Para este caso se trabaja con la disposición de válvulas en bifurcación, por lo tanto, las válvulas 1 y 3 estarán cerradas y las válvulas 2 y 4 estarán abiertas (Figura 3.4).

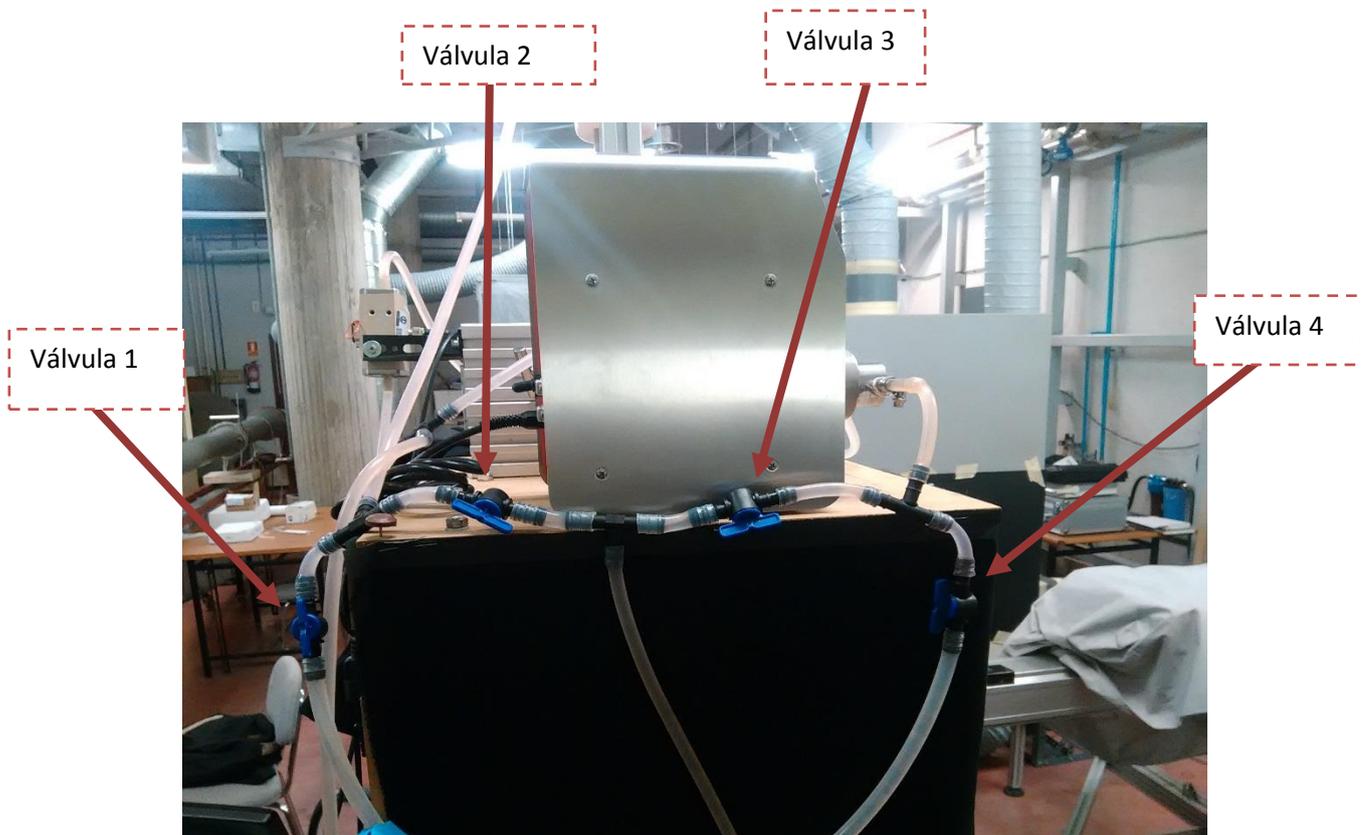


Figura 3. 4: Posición válvulas

A la entrada del modelo se dispone de un sensor de presión que mide la presión en el ramal principal del modelo.

En el ramal principal de salida está ubicado el sensor de presión que únicamente mide presiones por encima de la atmosférica y un caudalímetro dispuesto en vertical para su correcto funcionamiento.

En el ramal secundario de salida está el otro sensor de presión, similar al que se encuentra en la entrada al modelo.

A continuación de los sensores de presión y anterior al caudalímetro, cada ramal tiene unas válvulas de aguja, estas permiten estrangular con mucha precisión y así poder regular el caudal en cada ramal de manera independiente al otro. Esto permite realizar el estudio imponiendo la relación de caudales deseada.

Estas dos salidas conectan de nuevo en el conjunto de válvulas situadas para poder cambiar de unión a bifurcación y de esta manera llegar al depósito de nuevo.

### 3.2.5 Bomba hidráulica.

La bomba utilizada para la realización de este estudio es una bomba programable de engranajes externos con carcasa de acero inoxidable del fabricante *Ismatec* (Figura 3.5).

Esta bomba permite tener un control sobre los parámetros que intervienen en el estudio, como pueden ser, la presión, el caudal, la velocidad de giro...

Tabla 3. 2: Propiedades bomba hidráulica

Marca	Ismatec
Modelo	MCP-Z Process
Tipo de motor	Motor de corriente continua
Potencia eléctrica consumida	200 W
Rango de velocidades	60 – 6000 rpm (resolución de 1 rpm)
Caudal máximo (depende del cabezal empleado)	3840 mL/min, pero con el cabezal utilizado es 504 mL/min
Dimensiones (profundidad/ancho/altura)	260 x 160 x 262 mm (sin el cabezal)
Peso	6.9 kg (sin el cabezal de la bomba)



Figura 3. 5: Unidad de control de bomba de engranajes

Fuente: Catálogo de Ismatec, 2015

También permite su control a través de programas externos para realizar flujo pulsante programado.

### 3.2.6 Cámara oscura

El objetivo de la cámara oscura es conseguir que dentro exista la máxima oscuridad posible.

Para conseguir este objetivo se dispone de un tablero de madera donde van apoyados el depósito y la bomba y otro tablero de madera, el cual tiene una rendija realizada con el fin de dejar pasar el haz de luz del láser y que este incida sobre el modelo.

Para conseguir la máxima oscuridad se colocan unas telas negras en los demás lados del tablero superior, formando una especie de prisma con tres caras de tela y dos de tableros de madera.

Dentro de la cámara oscura se sitúan la cámara digital y el modelo. Así el haz incide sobre el modelo y la cámara realiza las instantáneas con la mayor iluminación posible sobre el modelo.

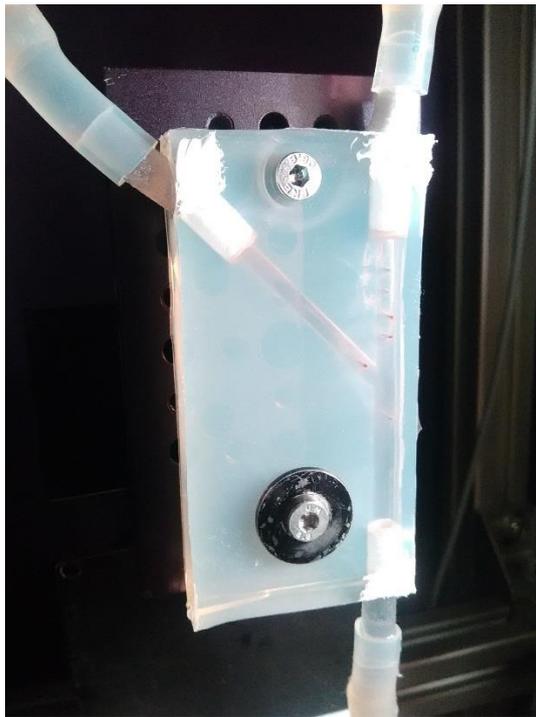
### 3.2.7 Modelo

El modelo utilizado para el estudio es de silicona (Figura 3.6). Esto es así principalmente por qué se necesita que el modelo permita el paso de la luz a través de él y que el índice de refracción de la luz sea similar al del fluido utilizado para el estudio. Con esto se consigue tener unas instantáneas de buena calidad, ya que si no se distorsionaría la luz a su paso por el modelo.

El modelo está formado por un ramal de entrada y dos de salida, uno vertical y el otro inclinado  $45^\circ$  con respecto al ramal vertical de salida.

Los diámetros interiores de los ramales son:

- Ramal principal de entrada: 6,6 mm
- Ramal principal de salida: 5,2 mm
- Ramal inclinado de salida: 4,6 mm



*Figura 3. 6: Modelo bifurcación*

### 3.2.8 Guillotina

La función de este elemento es reducir el espesor de la lámina de luz que incide sobre la cámara oscura. Sobre la holgura de la guillotina incide la parte de mayor intensidad del haz. Consiguiendo así que el haz que incida sobre el modelo sea el de mayor intensidad posible. Esta se colocará dentro de la cámara oscura, entre el modelo y la fuente laser.

### 3.2.9 Cámara digital

Esta es la encargada de registrar las imágenes para poderlas procesar luego en el ordenador. La cámara funciona de tal manera que recoge la luz que desprenden las partículas fluorescentes cuando el haz de luz incide sobre ellas.

Está dispuesta sobre una mesa de tres ejes para que se pueda mover en el eje vertical, en el eje horizontal y en el eje de profundidad. Además, esta posee un objetivo con el cual se puede controlar la profundidad de campo y el enfoque (Figura 3.7).

Se le pueden acoplar diferentes dispositivos para conseguir diversas posibilidades.

Estos elementos son:

- Filtro: La función de este elemento es la de eliminar el ruido procedente de la iluminación natural, dejando pasar solamente la iluminación de las partículas fluorescentes. El filtro está polarizado a 570 nm de longitud de onda, lo cual quiere decir que solo deja pasar luz con longitudes de onda superiores a 570 nm.
- Fuelle: La función de este dispositivo es variar la distancia focal de la cámara. El funcionamiento de este es muy sencillo, basta con estirarlo o comprimirlo. Si el fuelle se estira, se aumenta la distancia focal y por lo tanto se consigue ampliar la imagen. Si el fuelle por el contrario se comprime, se disminuye la distancia focal y por lo tanto la imagen se reduce.
- Objetivo adicional: Este es un objetivo a mayores del que lleva incorporado la cámara. Con él se consigue un mayor enfoque de la imagen debido a la distancia entre las lentes de los objetivos.

Tabla 3. 3: Propiedades cámara digital

Proveedor	Dantec Dynamics
Modelo	FlowSense 4M MkII
Tipo	Full Frame
Resolución	2048 x 2048
Resolución de datos	8, 10 o 12 bits por píxel
Tiempo mínimo entre capturas	Limitado por el láser: 14,5 Hz (en modo Single Frame) y 7 Hz (en modo Double Frame)
Tarjeta de comunicación	PCIe 1427

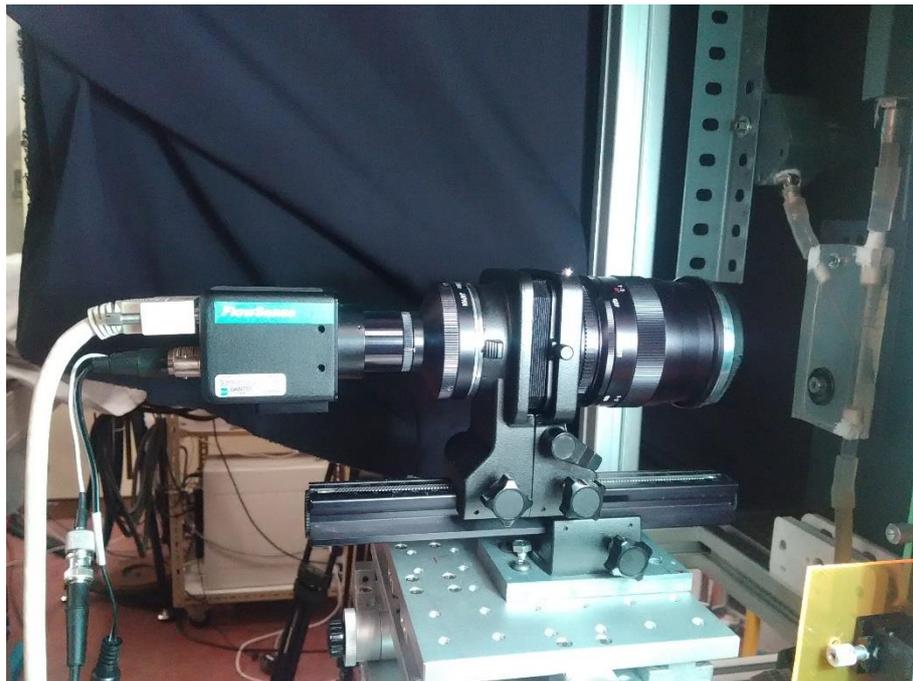


Figura 3. 7: Cámara digital

### 3.2.10 Láser

El láser es el encargado de emitir el haz de luz que ilumine el modelo para poder realizar su estudio.

Está formado por dos generadores láser que permiten que el tiempo entre disparos sea muy pequeño. En la boquilla posee una lente que consigue transformar el haz circular en una lámina.

Se tiene la posibilidad de regular la potencia del láser mediante un controlador manual, así se consigue la iluminación deseada, ya que si es muy fuerte el reflejo sería muy grande y si es muy baja no se conseguiría ver nada.

Está apoyado sobre un elevador mecánico para conseguir su altura adecuada y que incida de la mejor manera posible sobre la ranura realizada en la cámara oscura (Figura 3.8).

Tabla 3. 4: Propiedades del dispositivo láser

Proveedor	Dantec Dynamics
Tipo	Dual Power Nd: YAG 500 mJ (250 mJ cada uno)
Frecuencia máxima entre disparos	14,5 Hz (en modo Single Frame) y 7 Hz (en modo Double Frame)
Longitud de onda	532 nm
Ancho de lámina láser	2 mm (reducido a 0,2 o 0,1 mm mediante la guillotina)



*Figura 3. 8: Dispositivo láser*

### **3.2.11 Sensores de presión**

Se dispone de tres sensores de presión, uno a la entrada del modelo y dos en las salidas de este, uno en la principal y otro en la secundaria.

Los captadores de presión utilizados son capaces de tomar medidas por debajo y por encima de la presión atmosférica, exceptuando el situado en la salida de la rama principal.

Estos aparatos de medida al instalarlos hay que realizar una calibración de ellos con diferentes columnas de agua y así asegurar su correcto funcionamiento.

Los sensores están formados por dos partes, el captador y el acoplamiento al conducto (ver Figura 3.9), el captador va roscado al acoplamiento y este a su vez tiene dos conexiones en sus laterales en las que irán los tubos.

Tabla 3. 5: Propiedades del sensor de presión salida secundaria.

Marca	RS
Modelo	SS-GM1P1-5C
Tipo de sensor	Cerámico
Rango de medidas (presiones manométrica)	Desde -1 hasta 1 bar
Precisión	± 0.156% BFSL
Material de la carcasa	Acero inoxidable
Temperatura de operación	De -20°C a 125°C
Salida analógica	4 - 20 mA (corriente máxima 28 mA)
Tensión de alimentación	9 - 32 V (corriente continua)



Figura 3. 9: Sensor de presión de la entrada (izq.) y su pieza de acople (der.)

Tabla 3. 6: Propiedades del sensor de presión de la salida principal.

Marca	JUMO		
Modelo	JUMO dTRANS p30 TYP404366/000 TN43006500		
Material de la carcasa	Acero inoxidable		
Rango de medidas (presiones manométrica)	Desde 0 hasta 0.25 bar		
Precisión	± 0.156% BFSL		
Rango de Temperaturas	Fluido: 30 – 140°C	Ambiente: -20 – 100°C	Almacenaje: -40 – 125°C
Tensión de alimentación	10 – 30 V (corriente continua)		
Salida analógica	4 – 20 mA		



Figura 3. 10: Sensor de presión de la salida principal

Fuente: <http://www.jumo.co.uk/products/as-per-approvals/ehedg/404366/jumo-dtrans-p30--pressure-transmitter-404366.html?parentId=4061>

### 3.2.12 Caudalímetro

El caudalímetro utilizado es un sensor de caudal por ultrasonidos que permite medir caudales no estacionarios para flujos pulsátiles y medir la temperatura (Figura 3.11).

Este caudalímetro tiene una posición concreta de funcionamiento especificada por el fabricante, viene indicada mediante una flecha en un lateral, esta flecha indica el sentido correcto por el que debe ir el fluido de estudio. Si se coloca de manera contraria dará valores erróneos.



Figura 3. 11: Caudalímetro

Fuente: <http://www.sonotec.eu/products/non-invasive-fluid-monitoring/flow-rate-measurement/>

Tabla 3. 7: Propiedades Caudalímetro

Marca	Sonotec		
Modelo	SONOFLOW IL.52/4		
Principio de medición	Ultrasonidos		
Caudal máximo de medida	6 L/min		
Precisión para el agua a 23°C ± 2°C y a 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	Diámetros: exterior 8 mm/interior: 4 mm		
Medición de Temperatura	Sensor integrado (± 1°C)		
Tensión de alimentación	12 – 30 V (corriente continua)		
Corriente requerida	100 mA como máximo		
Rango de Temperaturas	Fluido: 0 – 140°C	Ambiente: – 70°C	0 Almacenaje: - 20 – 70°C

### **3.2.13 Sincronizador**

Es el dispositivo encargado de sincronizar la cámara y la fuente laser. Su objetivo es conseguir que los disparos de la fuente laser y las imágenes que toma la cámara sean en los mismo instantes de tiempo, si no es así la cámara podría tomar una instantánea cuando el láser no se dispara y no se vería nada.

El sincronizador utilizado debe ser compatible con la cámara y la fuente laser.

### **3.2.14 Controlador**

Este dispositivo da la posibilidad de hacer funcionar la bomba en flujo pulsátil mediante ciclos. Se controla mediante el software “Control Laser I.E.F.”. Este controlador recibe la información del caudalímetro y de los diferentes sensores de presión colocados en la entrada y las salidas del modelo. Con estos datos se puede hacer funcionar la bomba en un rango de velocidades deseado en un tiempo determinado.

El controlador es una caja la cual tiene un display en el que se puede ver diferentes lecturas que nos da el software, una luz de tipo LED la cual se enciende cuando el controlador esta encendido y en la parte trasera las diferentes conexiones que vienen del caudalímetro, la bomba y los sensores de presión. También tiene dos conexiones que son las correspondientes al sincronizador, para que lance el láser en el momento de inicio del ciclo, y otra conexión que va al motor desplazador del modelo.

### **3.2.15 Unidad de procesado**

El software escogido para el procesado de la información es DynamicStudio v3.14 (DANTEC Dynamics). Es el encargado de controlar el sincronizador y de actuar sobre la fuente laser y la cámara digital.

Este software permite variar el tiempo entre disparos de la fuente laser, trabajar con dos ventanas de imágenes de instantes de tiempo consecutivos, o con solo una.

En este software es donde a las imágenes se les aplica las operaciones de procesado necesarias, para obtener los resultados buscados.

### 3.3 PIV

La técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas, conocida como PIV permite determinar el campo instantáneo de velocidades en un plano del fluido. Con este propósito se introducen unas partículas trazadoras en el flujo que son arrastradas por el mismo, adquiriendo así la velocidad del fluido.

Con un láser y una óptica adecuada se puede conseguir una delgada lámina de luz que atraviese el flujo, iluminando de esta manera las partículas que contiene. Las partículas dispersan la luz del láser indicando su posición dentro del flujo. Esta posición puede ser captada por una cámara fotográfica digital (cámara CCD).

Si el láser es disparado en un intervalo de tiempo conocido, se registrará la posición de cada partícula en dos instantes de tiempo conocidos, conociendo así el desplazamiento que ha sufrido cada partícula durante ese intervalo. Posteriormente se deduce la velocidad de cada partícula del fluido como el cociente entre el desplazamiento y el intervalo de tiempo.

Un esquema típico del PIV sería el siguiente (Figura 3.12):

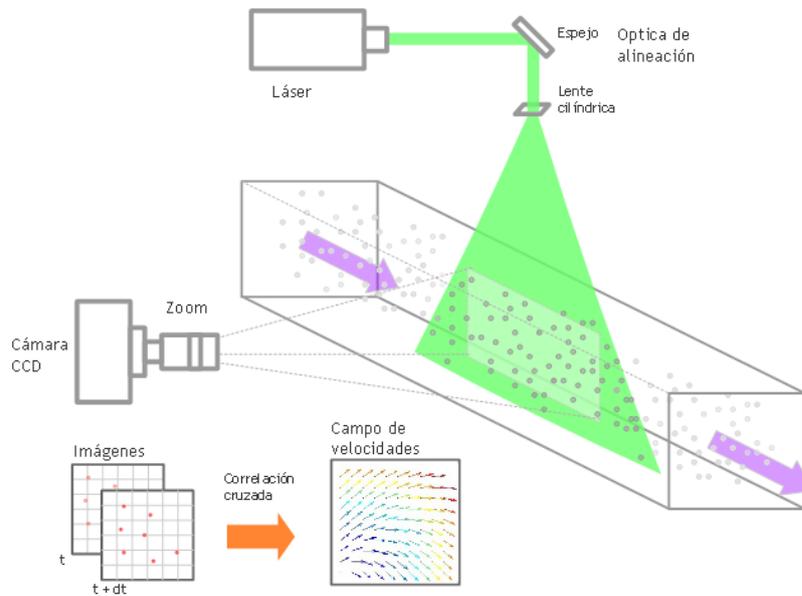


Figura 3. 12: Esquema PIV

### 3.3.1 Principio de funcionamiento

La Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) se basa en la medida de la velocidad de las partículas trazadoras transportadas por el fluido. Para poder medir la velocidad de estas partículas, se ilumina el plano deseado mediante una lámina de luz láser, de esta forma se consigue visualizar las partículas y se puede registrar su imagen.

Los registros de las imágenes de las partículas en dos instantes de tiempo conocidos como pueden ser el instante  $t$  y el instante  $t'$ , separados  $\Delta t$ , permite determinar el desplazamiento de las partículas  $\Delta X$ .

El principio básico de funcionamiento de esta técnica es muy simple, la velocidad de un fluido es una medida del desplazamiento de las partículas trazadoras iluminadas por el haz de luz. Esto puede expresarse:

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

### 3.3.2 Aspectos de la técnica PIV

La idea de la medida de velocidades mediante la técnica PIV aparentemente es muy sencilla, pero su realización no lo es tanto. Los aspectos más importantes de esta técnica son:

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

#### 3.3.2.1 Partículas trazadoras

Como ya se comentó en apartados anteriores las partículas trazadoras deben seguir adecuadamente el flujo para que su velocidad pueda representar la de este. También deben poder dispersar adecuadamente la luz para poder ser registradas correctamente para su análisis. Para obtener unos buenos resultados, se necesitará una cantidad suficiente de partículas.

Las partículas trazadoras son partículas esféricas, moviéndose en el seno de un fluido. Como el régimen en el que se encuentra este movimiento es de números de Reynolds bajos, régimen laminar, se puede aplicar la ley de Stokes para la fuerza de resistencia de una esfera en un fluido.

Es sabido que la diferencia de la densidad de las partículas y la del fluido provoca una velocidad de sedimentación o velocidad de caída, esta velocidad según la ley de Stokes viene dada por la siguiente expresión (Ecuación 3.2):

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_p^2}{18\mu_f} \quad (3.2)$$

Donde  $v_s$  es la velocidad de sedimentación,  $g$  es la gravedad,  $\mu_f$  es la viscosidad dinámica del fluido,  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $\rho_p$  es la densidad de las partículas y  $d_p$  es el diámetro de las partículas.

Esta velocidad se opone al movimiento deseado en este estudio por ello el efecto de la sedimentación se puede minimizar utilizando partículas de densidad similar a la del fluido, de esta

forma se consigue aproximar lo máximo posible la velocidad de las partículas a la velocidad del fluido.

Para el estudio de la dispersión de la luz por pequeñas partículas suele definirse el diámetro normalizado (Ecuación 3.3):

$$q = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad (3.3)$$

Para la técnica de PIV el valor de  $q$  suele ser muy próximo a uno y la dispersión de la luz por partículas esféricas sigue la teoría de Mie, cuyo diagrama aparece en la figura 3.13:

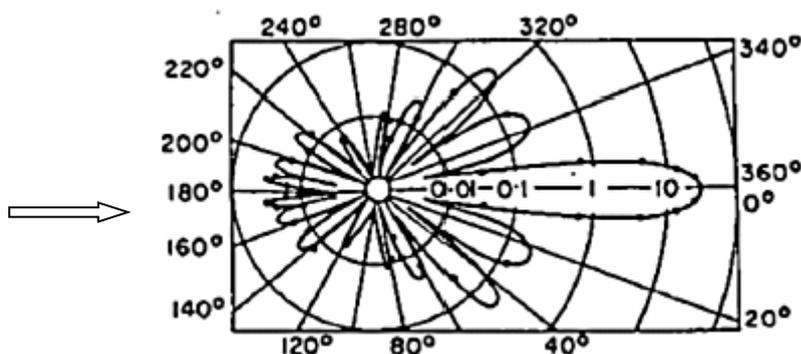


Figura 3. 13: Diagrama de dispersión de luz

La flecha indica la dirección de procedencia del haz de luz. Según puede observarse, se dispersa más luz hacia delante, lo cual supone una desventaja para la técnica PIV, ya que en la configuración habitual del equipo es tal que el registro se realiza a 90° respecto de la dirección de incidencia del haz de luz del láser. Esto implica la necesidad de utilizar láseres más potentes.

### 3.3.2.2 Sistema de iluminación

Las fuentes láser más utilizadas en PIV son las pulsadas, porque ofrecen la ventaja de que el pulso de luz es de muy corta duración, del orden de nanosegundos, de forma que las partículas parecen “congeladas”, con lo que su imagen aparece nítida sobre el sensor del sistema de registro.

En cuanto a la formación de una lámina de luz, esta puede conseguirse fácilmente empleando una lente cilíndrica y otra esférica. La lente cilíndrica expande el láser en una dirección, mientras que la lente esférica lo enfoca a una distancia aguas abajo igual a la longitud focal, haciéndolo converger, hasta alcanzar el mínimo espesor, para luego diverger.

### ***3.3.2.3 Sistema de registro***

En los orígenes del PIV el sistema de registro era fotográfico, este sistema ofrecía buena calidad, pero requería de un láser más potente y conllevaba un proceso de revelado de las imágenes muy tedioso. Actualmente se utiliza el sistema de registro mediante cámaras digitales CCD gracias a la mejora en la resolución de dichas cámaras y la disminución de su precio.

### ***3.3.2.4 Proceso de análisis de imágenes***

El proceso de análisis de las imágenes en el PIV tiene como objetivo la determinación del desplazamiento de las partículas contenidas en el flujo, lo que determinará la velocidad del flujo. Para poder realizar esta tarea se necesita saber la cantidad que se han desplazado las partículas entre los dos pulsos de luz del láser. El método de análisis más extendido en PIV es el método de correlación. Esta técnica de correlación no requiere buscar la pareja de cada partícula individual, sino que determina el desplazamiento medio de grupos de partículas contenidas en pequeñas regiones conocidas como “áreas de interrogación”. La imagen del PIV se divide en estas áreas de interrogación, formando una especie de malla uniforme sobre la imagen del flujo, la función de correlación se calcula secuencialmente sobre todas las áreas de interrogación, proporcionando un vector desplazamiento por área de análisis.

El post-procesado consistirá en el análisis de las imágenes, conocido el desplazamiento, el propio software automáticamente calcula la velocidad, introduciéndole el tiempo que ha transcurrido entre un pulso y el siguiente. Una vez calculada la velocidad, el software permite aplicar diferentes operaciones. Los resultados finales se suelen dar en forma de mapas de vectores velocidad,

donde se puede apreciar perfectamente la tendencia del flujo y la magnitud de la velocidad en cada punto.



## 4. PUESTA A PUNTO

---



## 4. Puesta a punto

Para obtener unos resultados validos es necesario montar, preparar y ajustar la instalación previamente a la toma de datos.

El paso inicial es conseguir conectar todas las tuberías de la instalación de la forma más sencilla posible, una vez realizado este paso se procede a colocar el modelo en su posición correcta. Cuando ya esté todo perfectamente enlazado se coloca la fuente láser en una posición correcta así como la cámara fotográfica. Por último, se lleva a cabo el montaje de la guillotina y su ajuste.

Cuando esté todo esto realizado ya se tendrá la instalación lista para su uso.

El primer paso antes de arrancar la bomba es llenar la instalación de fluido, consiguiendo eliminar todo el aire que pueda haber en la misma. Una vez conseguido esto, se arranca la bomba, lo ideal será arrancarla a una velocidad baja e ir aumentando su velocidad con el tiempo para que se vaya adaptando.

Una vez realizado todo esto ya se puede ajustar el enfoque y centrado de la cámara disparando el láser. Observando la calidad de la imagen y de su enfoque se puede realizar el pre ajuste de paralelismo del modelo.

Cuando ya estén todos los elementos a punto, mediante el programa *DynamicStudio* y el programa *Control Láser I.E.F.* se calibra la bomba y el caudalímetro.

### 4.1 Montaje de la instalación hidráulica

Lo principal será llevar a cabo el montaje de todas las tuberías de la instalación para que esta sea lo menos compleja posible, intentando que las tuberías no tengan curvaturas muy pronunciadas ni dobleces. Se tendrá en cuenta que no estén en una posición intermedia entre el dispositivo láser y el modelo ni entre la cámara fotográfica y el modelo.

La conexión de las tuberías con el modelo, para que sea lo más estanca posible, se refuerza con teflón.

Ya que la instalación ha sido ideada para su uso en unión y bifurcación se dispone de una serie de válvulas justo a la salida de la bomba para que permitan llevar a cabo este cambio de la manera más sencilla posible.

La instalación en su parte inferior, dispone de una T con una válvula, esto permite el vaciado de la instalación de una manera sencilla, ya que se vacía por gravedad y así no es necesario bombear fluido para vaciarla.

También se realiza la conexión de las tuberías con los diferentes captadores de presión que lleva la instalación.

## **4.2 Montaje del modelo**

El modelo a estudio está colocado dentro de la cámara oscura.

Se realizan una serie de taladros que deben estar situados en zonas donde no interfiera con el láser ni con la sección a estudio. Estos taladros se realizan para poder atornillar el modelo mediante unos tornillos a un soporte metálico. Este soporte metálico va atornillado a su vez a una chapa metálica doblada 90°, que está situada sobre un desplazador que permite desplazar el modelo en el eje de profundidad y de esta manera poder realizar el estudio en diferentes planos de profundidad del modelo.

## **4.3 Montaje del dispositivo láser**

El dispositivo láser está montado sobre un elevador mecánico que le permite desplazarse en el eje vertical, de esta forma se consigue ajustar el haz para que incida correctamente sobre el modelo.

Antes de su encendido se debe comprobar que el nivel de agua refrigerante este por encima del mínimo marcado. Una vez comprobado esto ya se puede encender.

Para encenderlo hay que accionar un interruptor en la parte trasera de la caja y girar la llave de encendido en la parte delantera. Con estos pasos ya tendríamos el láser en marcha.

Para su manejo se utiliza una mesa controladora. Antes de encender desde ahí el láser hay que accionar la bomba de refrigerante.

Esta mesa controladora permite variar la potencia del láser y cerrar la boquilla de salida del haz sin parar el láser. Esto es muy útil en tema de seguridad.

El láser debe entrar en la cámara oscura por la rendija realizada en esta. Se debe conseguir que el haz de luz sea paralelo a la rendija y entre

perfectamente por ella. Mediante el elevador mecánico se consigue hacer que incida al modelo la parte central del haz, esto debe ser así ya que la parte central del haz es la de mayor intensidad. Tampoco es necesario que sea muy preciso ya que la parte central del haz es lo suficientemente amplia como para cubrir el modelo.

**ADVERTENCIA:** Para el correcto uso del láser y para la seguridad de los que lo están usando, se deberá usar gafas protectoras siempre que se dispare el láser. Si esto no se hace las consecuencias pueden ser muy graves para la vista de las personas que están usando el láser.

#### **4.4 Montaje de la cámara**

La cámara fotográfica ira montada sobre una mesa la cual se puede desplazar en el eje horizontal, vertical y de profundidad. Con esto se consigue desplazar la cámara según se requiera y así poder estudiar diferentes zonas del modelo y poder realizar un buen enfoque según el alcance del objetivo que se monte en la cámara.

La mesa tiene una serie de taladros para poder colocar la cámara en la zona de superficie que mejor se ajuste, mediante unos tornillos.

#### **4.5 Montaje y ajuste de la guillotina**

Para realizar el ajuste de la guillotina se dispara el láser, haciendo coincidir la sección central con la ranura de la guillotina.

La ranura de la guillotina se controla con un desplazador que permite separar más o menos las láminas.

Para obtener un correcto haz de luz del láser se debe realizar un ajuste manual de la inclinación de la guillotina, esta debe estar lo mejor alineada posible con el haz de luz. Si esto se realiza de forma incorrecta se obtendrá un haz de menor intensidad al deseado.

#### **4.6 Arranque del sistema de generación de flujo**

Previamente a este paso como ya se ha comentado, se debe llenar la instalación del fluido utilizado y conseguir quitar todo el aire que pueda quedar ocluido en las tuberías, hasta entonces no se podrá encender la bomba de engranajes. Este paso es muy importante para el mantenimiento y correcto funcionamiento de la bomba, ya que si no se consigue sacar el aire y se enciende la bomba esta podría sufrir algún desperfecto.

También es importante darse cuenta de que la válvula situada en la parte inferior de la instalación está cerrada, ya que si está abierta se saldrá todo el fluido por ahí.

A la hora de encender la bomba, se deben abrir todas las válvulas de la impulsión para tener un correcto llenado de todas las tuberías de la instalación. Cuando esto se haya conseguido se cierran las correspondientes a la configuración deseada, para este caso, bifurcación. Si se tienen las válvulas cerradas a la hora de encender la bomba puede dar lugar a que reviente alguna tubería, por lo tanto este punto es importante.

## **4.7 Ajuste de la cámara**

El ajuste de la cámara fotográfica se realiza para poder obtener las imágenes a estudio lo más nítidas posibles. Para conseguir esto se deben seguir una serie de pasos.

### **4.7.1 Enfoque**

El primer paso será colocar la cámara en una posición en la que más o menos quede el modelo centrado.

El modelo se debe colocar de la mejor manera posible, esta es con el ramal principal en una posición totalmente vertical y la pared del modelo lo más perpendicular posible al eje de la cámara.

Para enfocar la cámara se necesita iluminación, por ello este paso se puede realizar de dos formas:

- Iluminar el modelo mediante una fuente constante de luz, como puede ser una bombilla.

Este ajuste puede ser preliminar, ya que no es posible ver el modelo y las partículas correctamente, por lo tanto se realiza poniendo en la pared del modelo una plantilla con cuadrados

negros y blancos de lado conocido y acercando la cámara hasta que se vean nítidamente. En este punto se está enfocando la pared del modelo, solo se necesita acercar la cámara la mitad del espesor y más o menos el enfoque está en la sección media del modelo.

-Iluminar el modelo mediante el dispositivo láser, disparándolo.

Este ajuste se puede realizar directamente sin hacer el ajuste mediante una fuente constante de luz, o después de haber realizado dicho ajuste. Mediante este procedimiento se ve el modelo y las partículas muy nítidamente, por lo tanto se puede enfocar la sección de estudio deseada. El objetivo principal a priori es estar en la sección por la cual entra el haz de luz de láser. Cuando se vea perfectamente las paredes del modelo y las partículas se puede decir que esa es la sección por la cual está incidiendo el láser.

Hay que tener en cuenta que en la primera opción no es necesario llevar protección visual, no existe riesgo de dañar la vista, pero sin embargo en la segunda opción sí que es necesario llevar unas gafas de protección específicas para la longitud de onda del láser durante todo el procedimiento.

Se debe tener cuidado de no iluminar en exceso el modelo durante mucho tiempo, ya que esto puede originar problemas en el sensor de la cámara. Esto es importante sobre todo cuando se trabaja con la primera opción.

El programa utilizado para el análisis de las imágenes y utilizado para su visualización es *DynamicStudio*. En este programa existen dos opciones de visualización, se utiliza la opción *Free Run* cuando se realice el enfoque mediante una fuente constante de luz (bombilla) y se utiliza la opción *Preview* cuando se esté trabajando con la fuente láser.

#### **4.7.2 Centrado**

Una vez que se ha realizado el enfoque del modelo por uno de los dos procedimientos posibles, se debe elegir la zona del modelo a estudio.

Para realizar este paso se debe mover la mesa en la que está apoyada la cámara en función de donde este la zona del modelo de interés.

Se debe comprobar que el ramal principal está perfectamente vertical, para ello en el programa *DynamicStudio* existe una opción que consiste en colocar una rejilla sobre la imagen, dividiéndola en cuadrados del tamaño en pixels que se desee, para utilizar esta opción se debe pinchar con el botón derecho del ratón sobre la imagen y elegir la opción *Show grid*.

Este ajuste es muy importante, ya que de esta forma los vectores de velocidad verticales que se obtengan en el análisis serán vectores axiales y los vectores horizontales de velocidad serán vectores radiales. Si no se tuviera el modelo correctamente posicionado los vectores obtenidos serían una combinación de axiales y radiales, esto complicaría su descomposición.

#### 4.7.3 Control de la iluminación

Por último una vez enfocada y centrada la imagen se debe ajustar su iluminación, ya que con una pobre iluminación no se verán a penas partículas y con una excesiva iluminación se reflejara demasiada luz.

El control de la iluminación se realiza a través de la mesa controladora del dispositivo láser, variando la potencia de disparo del láser. Es muy importante comprobar la potencia en los dos instantes de disparo del laser, ya que puede pasar que se dispare con una potencia y en el siguiente instante esa potencia sea mayor o menos. Para comprobar esto, se pincha sobre la imagen en el programa *DynamicStudio* y se pulsa la tecla "T" del teclado, con eso se puede ver las imágenes que está tomando la cámara y su instante posterior.

Otra posibilidad es, una vez fijada la potencia del láser en el valor deseado, dentro del programa *DynamicStudio* pinchar sobre la imagen a estudio con el botón derecho y elegir la opción *Color map and histogram*, de esta forma se puede variar la iluminación de la zona de estudio. Esto es muy útil cuando se ha fijado una potencia de láser adecuada, pero en la imagen aparece demasiado o poco iluminada, jugando con esta opción se puede solventar ese desajuste.

Todo esto se debe realizar con la cámara oscura completamente cerrada, para que entre la menor luz ambiental posible, y toda la iluminación del modelo sea debida al láser.

## 4.8 Ajuste de paralelismo del modelo

De manera preliminar se coloca el soporte del modelo de la forma más paralela posible al haz de luz del láser. Colocándolo en una posición media del desplazador mecánico, para poder tener posibilidad de movimiento en los dos sentidos. Para este paso no se requiere una precisión muy elevada, ya que se realizara un ajuste más preciso a continuación.

El soporte del modelo tiene dos desplazadores muy precisos en dos esquinas opuestas, esto permite variar la inclinación respecto a varios ejes de movimiento. Estos desplazamientos son del orden de los micrómetros.

El desplazador de la esquina inferior izquierda (visto desde la cara frontal del modelo) permite el desplazamiento de las placas a lo largo del ancho.

EL desplazador de la esquina superior derecha (visto desde la cara frontal del modelo) permite el desplazamiento de las placas a lo largo de su longitud.

Una vez que se tenga paralelo el soporte del modelo y el haz de luz, se debe encontrar la sección media del modelo, que será la deseada para el estudio. Para conseguir estar en esta posición se utiliza el desplazador.

Se lleva el modelo a lo largo de su eje de profundidad, enfocando la cámara en los tres ramales de estudio del modelo, el ramal principal de entrada, el ramal principal de salida y el ramal secundario. Para cada una de estas posiciones de enfoque de la cámara se realiza un análisis de la velocidad en el conducto a diferentes profundidades, obteniendo un perfil de velocidad que abarca todo el diámetro de la tubería, de esta forma se puede obtener el punto de máxima velocidad, en ese punto se encontrará la sección central del conducto.

El perfil de velocidad se obtiene llevando los datos de velocidades obtenidos en el análisis en el programa *DynamicStudio* a una hoja de "Excel" y realizando una grafica posición-velocidad. Se obtiene un perfil de velocidades de tipo parabólico.

## 4.9 Calibración del caudalímetro y bomba

La calibración de estos elementos se lleva a cabo utilizando el programa de análisis *DynamicStudio* y el programa "*Control Láser I.E.F.*". El objetivo es calibrar la bomba y el caudalímetro, obteniendo una función de tal manera que los caudales que mida el caudalímetro sean coherentes con la velocidad

a la que este girando la bomba. Esto se realiza porque tanto la bomba como el caudalímetro pueden estar desajustados y estar midiendo caudales que no corresponden.

La calibración se realiza haciendo girar la bomba en un rango de velocidades. Para cada velocidad de giro de la bomba se anota el caudal supuesto que está dando la bomba, esta es una función que tiene la bomba, se puede sacar a través del panel digital el caudal que está dando. Por otro lado se introduce en la instalación el fluido de estudio mezclado con las partículas, de este fluido se conoce su densidad, ya que se sabe el porcentaje en volumen de cada fluido que hay en la mezcla. A través del programa *Control Láser I.E.F.* se obtienen las medidas que da el caudalímetro en cada instante de tiempo.

A continuación se abre la parte final de la instalación, cuando ya descarga en el depósito y se vierte durante un determinado tiempo el fluido en un recipiente de peso conocido, de esta manera el fluido vertido en ese periodo de tiempo se pesa en una báscula de precisión. Con este dato, la densidad de la mezcla y el tiempo se puede calcular el caudal que está circulando por la instalación para esa velocidad de giro de la bomba con la siguiente expresión (Ecuación 4.1):

$$Q_{instalación} = \frac{m/\rho}{t} \quad (4.1)$$

Siendo:

- Q = Caudal de la instalación (mL/min)
- m = Masa en gramos de fluido
- $\rho$  = Densidad de la mezcla en (g/mL)
- t = Tiempo transcurrido en minutos.

De esta forma se obtiene el caudal que mide el caudalímetro y el caudal real que está circulando por la instalación.

Estos datos se pueden representar en una gráfica (velocidad de giro – caudal) obteniendo una serie de puntos. Realizando una línea de tendencia se obtiene la función de corrección que se estaba buscando (Figura 4.1).

Los datos que se obtienen en el ensayo de calibración son:

Tabla 4. 1: Caudales del caudalímetro y calculado.

Velocidad de giro (rpm)	tiempo (s)	Masa (g)	Caudal calculado (mL/min)	Caudal caudalímetro (mL/min)
1000	30	20	34,54	34
2000	30	53	91,52	91
3000	30	85,5	147,64	148
4000	20	70,1	181,57	197
5000	20	99	256,43	248
6000	15	83	286,64	293
Densidad mezcla (g/mL)	1,16			

La densidad se calcula sabiendo el % de cada fluido en volumen. Para este caso se tiene una concentración del 61% de glicerina. Por lo tanto la densidad de la mezcla, glicerina – agua es (Ecuación 4.2):

$$\rho_{mezcla} = (\rho_{glicerina}C_{glicerina}) + (\rho_{agua}(1 - C_{glicerina})) \quad (4.2)$$

Siendo:

- $C_{glicerina}$  = Concentración de glicerina en la mezcla.
- $\rho_{glicerina}$  = Densidad de la glicerina en (kg/m<sup>3</sup>).
- $\rho_{agua}$  = Densidad del agua en (kg/m<sup>3</sup>).
- $\rho_{mezcla}$  = Densidad de la mezcla en (kg/m<sup>3</sup>).

Densidad de la glicerina = 1261,3 kg/m<sup>3</sup>

Densidad del agua = 997,003 kg/m<sup>3</sup>

Densidad mezcla = 1158,23 kg/m<sup>3</sup>

La grafica con los caudales:

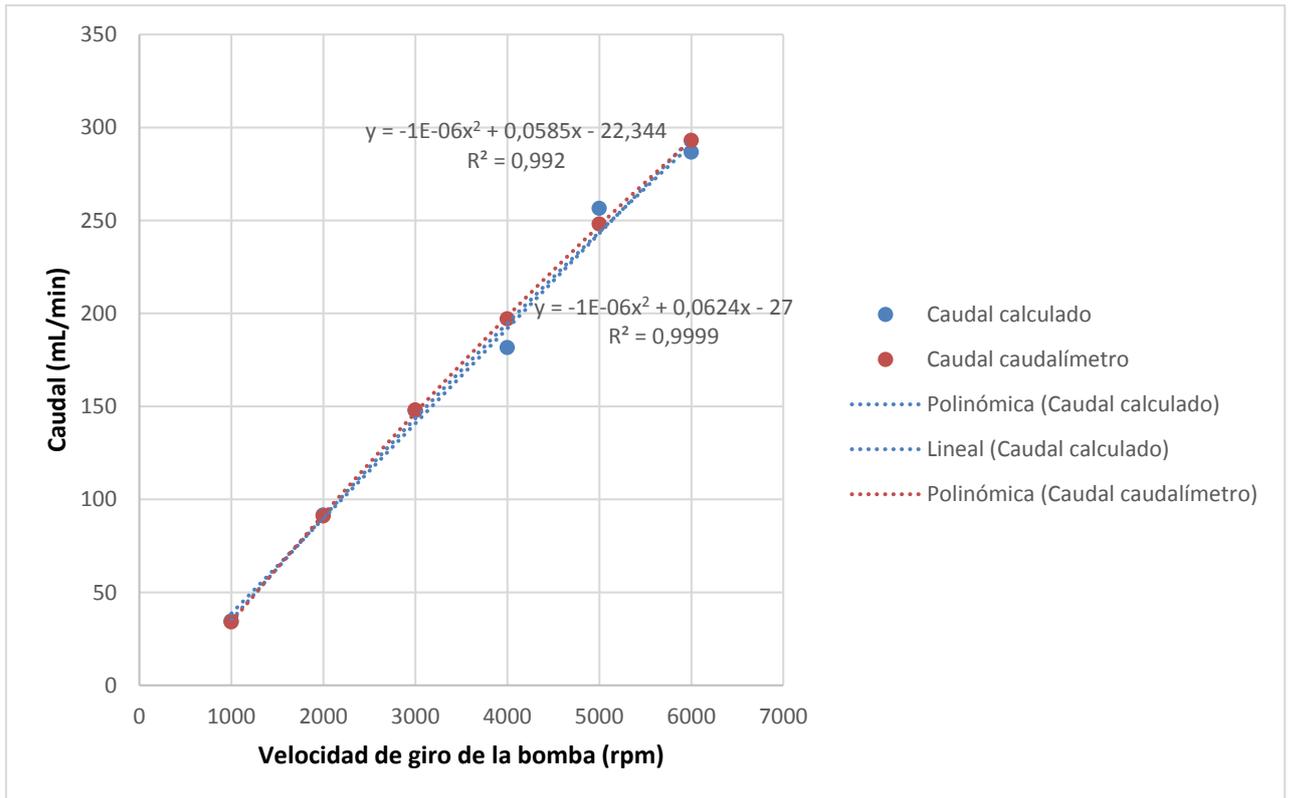


Figura 4. 1: Gráfica de los caudales para las diferentes velocidades de giro de la bomba.

La función de ajuste que se obtiene es:

$$y = -10^{-6}x^2 + 0,0585x - 22,344 \quad (4.3)$$

Siendo  $x$  el valor de la velocidad de giro en revoluciones por minuto de la bomba en un instante de tiempo determinado. Y siendo  $y$  el valor del caudal corregido que está dando la bomba.

Este caudal corregido es el que se usará para futuras mediciones.

*Tabla 4. 2: Diferentes caudales. Caudal de la bomba corregido.*

Velocidad de giro (rpm)	tiempo (s)	Masa (g)	Caudal calculado (mL/min)	Caudal caudalímetro (mL/min)	Caudal Bomba (mL/min)	Caudal Bomba corregido (mL/min)
1000	30	20	34,54	34	56,67	35,16
2000	30	53	91,52	91	113,3	90,66
3000	30	85,5	147,64	148	170	144,16
4000	20	70,1	181,57	197	226,7	195,66
5000	20	99	256,43	248	283	245,16
6000	15	83	286,64	293	340	292,66

La curva de calibración de la bomba respecto al caudal real depende de la presión de impulsión de la bomba. A mayor presión mayor caudal de fugas de la bomba, por ello esta curva depende de la configuración del circuito hidráulico.



## 5. RESULTADOS

---



## 5. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en el estudio del campo de velocidad mediante la técnica PIV para un modelo de bifurcación con obstáculos transversales al flujo y sin ellos (Figura 5.1).

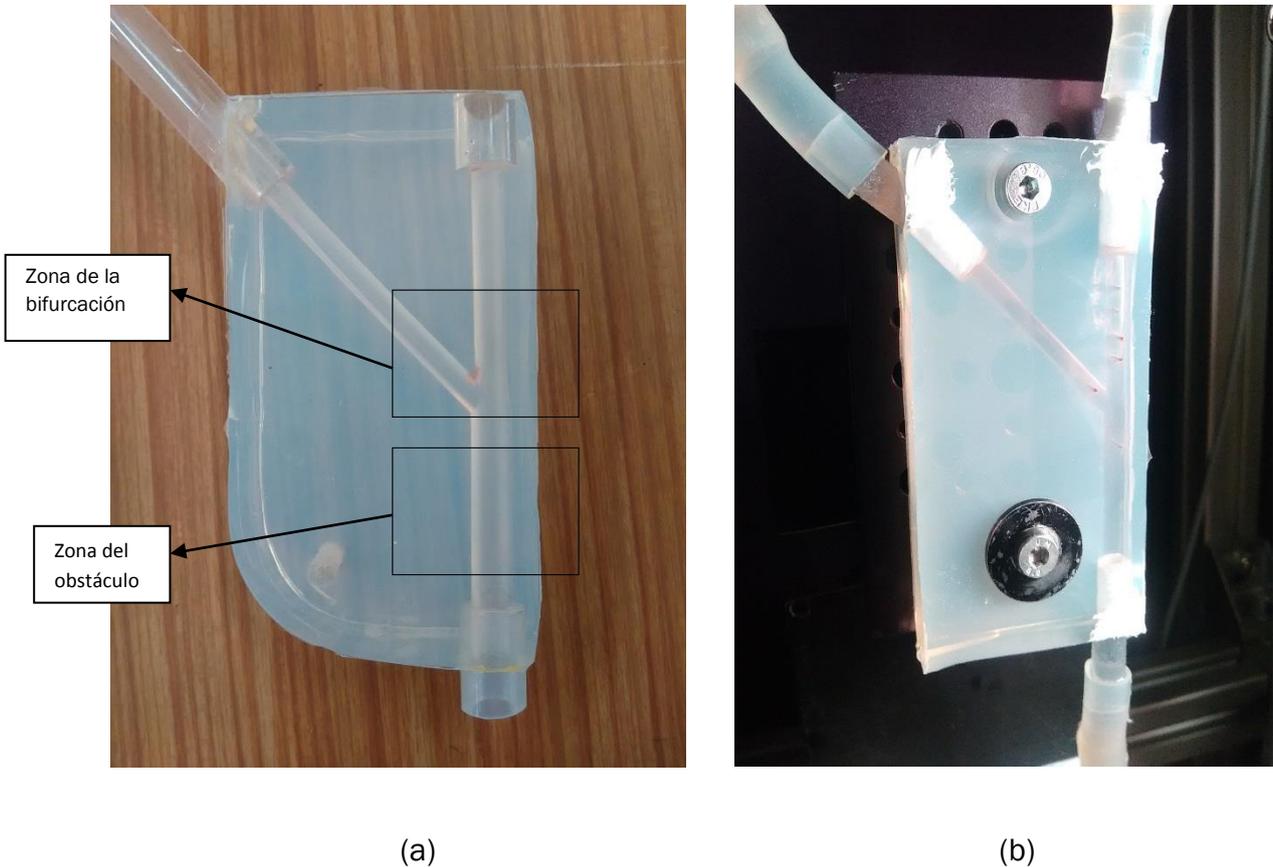


Figura 5. 1: Modelo sin obstáculos (a) y modelo con obstáculos (b)

Para cada configuración del modelo se muestra el campo de velocidad obtenido, a diferentes números de Reynolds y a diferentes relaciones de caudal. Las zonas de estudio para cada caso son dos, una es la zona de la bifurcación y otra es una zona situada aguas arriba de la bifurcación, en la cual se encuentra un obstáculo transversal al flujo en la parte central de la sección del tubo.

Para cada ensayo se elabora una tabla en la que se recogen las condiciones de medida, características del flujo y características del procesado.

Para futuros apartados la nomenclatura de caudales utilizada será la representada en la Figura 5.2:

$Q_1$ = Caudal del ramal de entrada principal

$Q_2$ = Caudal del ramal de salida principal

$Q_3$ = Caudal del ramal de salida lateral

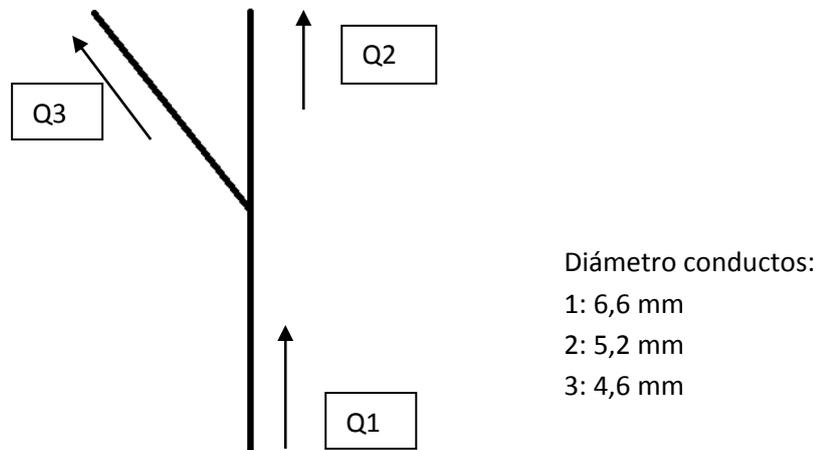


Figura 5. 2: Esquema de la bifurcación con sus flujos

## 5.1 Modelo con obstáculos

El modelo con obstáculos utilizado en el estudio de este apartado es el descrito anteriormente en el capítulo 3 (Figura 5.1 (b)).

### 5.1.1 Resultados en la zona de la bifurcación

La zona de estudio es la correspondiente a la bifurcación del modelo (Figura 5.1). Para estudiar el comportamiento del flujo, se ha realizado el ensayo a diferentes velocidades de giro de la bomba y a diferentes relaciones de caudal. La velocidad de giro de la bomba impone el caudal que circula por la instalación y por ello el número de Reynolds en el conducto de entrada.

La relación de caudal  $r$ , se define como la relación entre el caudal de salida del ramal principal y el del ramal lateral (Ecuación 5.1)

$$r = \frac{Q_2}{Q_3} \quad (5.1)$$

Se ha intentado tomar siempre parecidas relaciones de caudal para cada número de Reynolds para así poder comparar los resultados.

La bifurcación en el modelo es la zona donde se divide el conducto principal en dos, es una zona sin obstáculos.

Los resultados analizados en este apartado son los obtenidos para una número de Reynolds en el conducto principal de  $Re=110$ . Resultados semejantes para  $Re=74$  y  $Re=34$  se describen en el Anexo.

El primer caso corresponde a una relación de caudales de  $r=0,5$ . Esta se consigue estrangulando la válvula de aguja del ramal principal de salida, de esta forma se tiene mayor caudal por el ramal lateral de salida.

Las condiciones de ensayo aparecen reflejadas en la Tabla 5.1:

*Tabla 5. 1: Relación de caudales  $r=0,5$ ;  $Re=110$*

$r(Q2/Q3)$	0,49
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	96,70
Caudal Q3 (mL/min)	195,96
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	46
Re3	106
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

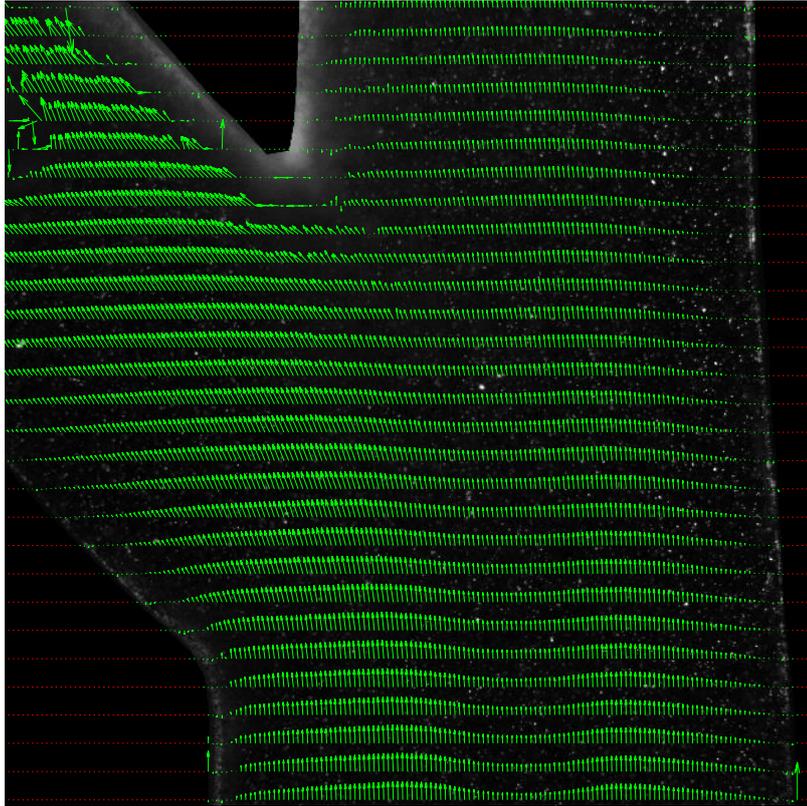


Figura 5. 3: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0,5$ ;  $Re=110$

Como se puede observar en la Figura 5.3, el perfil de velocidades no tiene la forma parabólica de Hagen Poiseuille en todo el ancho de la sección, sino que está compuesto por dos parábolas, teniendo en la parte media de la sección un mínimo. Esto se debe a que el flujo aguas arriba de esta zona inferior de la Figura 5.3 está atravesando una zona que tiene un obstáculo, el cual está situado en la zona media de la sección, provocando una estela. Esta estela es una zona de desprendimiento de la capa límite, lo que provoca unas pérdidas en el flujo.

Cuanto más asciende el flujo más se va recuperando y tomando la forma de nuevo del perfil parabólico. Se puede observar que en el vértice de la bifurcación, donde se produce la división del conducto, se existe un punto de remanso lo que hace que el fluido en esta zona se frene.

También puede observarse que al ser la relación de caudales  $r=0,5$  por el ramal lateral de salida circula el doble de caudal que por el ramal principal de salida y por lo tanto en el ramal principal de salida se tienen perfiles de velocidad más pequeños, especialmente en la zona de la pared exterior.

En la zona del ramal lateral, se puede ver como el fluido debe ir adquiriendo el giro condicionado por el conducto, esto provoca que el perfil de velocidades se estire, disminuyendo así la velocidad en esta zona debido al ensanchamiento de la sección.

Puede verse como en la zona de pared exterior de inicio del ramal principal y del ramal lateral se producen los movimientos secundarios, dando lugar a zonas de bajas velocidades y movimientos tridimensionales.

A continuación se pasa a relación de caudales igual a uno, para ello se abre del todo la válvula del ramal principal de salida y se estrangula la válvula del ramal lateral de salida hasta obtener la relación buscada.

Las condiciones de ensayo aparecen reflejadas en la Tabla 5.2:

*Tabla 5.2: Relación de caudales  $r=1$ ;  $Re=110$*

r(Q2/Q3)	1,01
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	147,30
Caudal Q3 (mL/min)	145,36
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	70
Re3	79
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

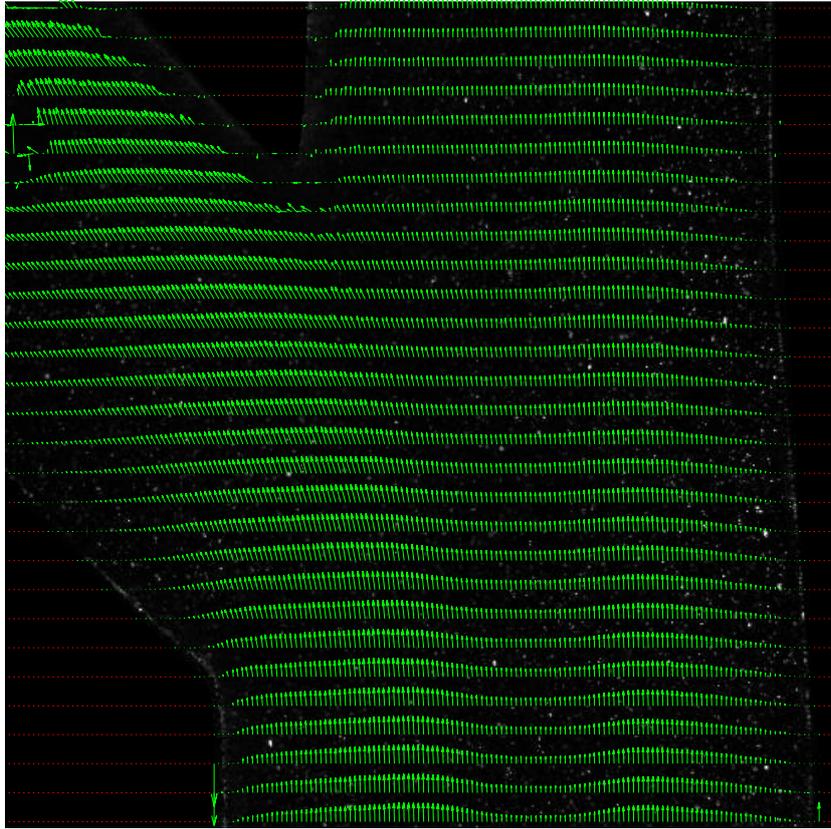


Figura 5. 4: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=1$ ;  $Re=110$

En la Figura 5.4 se puede observar que el flujo tiene un comportamiento muy similar al de la Figura 5.3 con relación de caudales  $r=0,5$ . Para este caso, al haber aumentado esta relación se puede ver como el flujo ya no tiende tanto a irse por el ramal lateral. En este caso, en el ramal principal de salida se tienen perfiles de velocidad más grandes, desplazándose el pico de la parábola hacia la pared exterior de este ramal.

Puede observarse también, que en la pared exterior del ramal lateral, cuando empieza justo, destacan los fenómenos de movimientos tridimensionales debido a que el caudal que pasa por este ramal es menor con respecto al total.

El siguiente punto de estudio es para una relación de caudales  $r=1,5$ . Para llegar a este punto se tendrá la válvula de la salida principal abierta completamente y la válvula correspondiente al ramal lateral de salida estrangulada hasta obtener el caudal deseado.

Las condiciones de ensayo aparecen reflejadas en la Tabla 5.3:

Tabla 5. 3: Relación de caudal  $r=1,5$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	1,521
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	176,60
Caudal Q3 (mL/min)	116,06
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	84
Re3	63
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

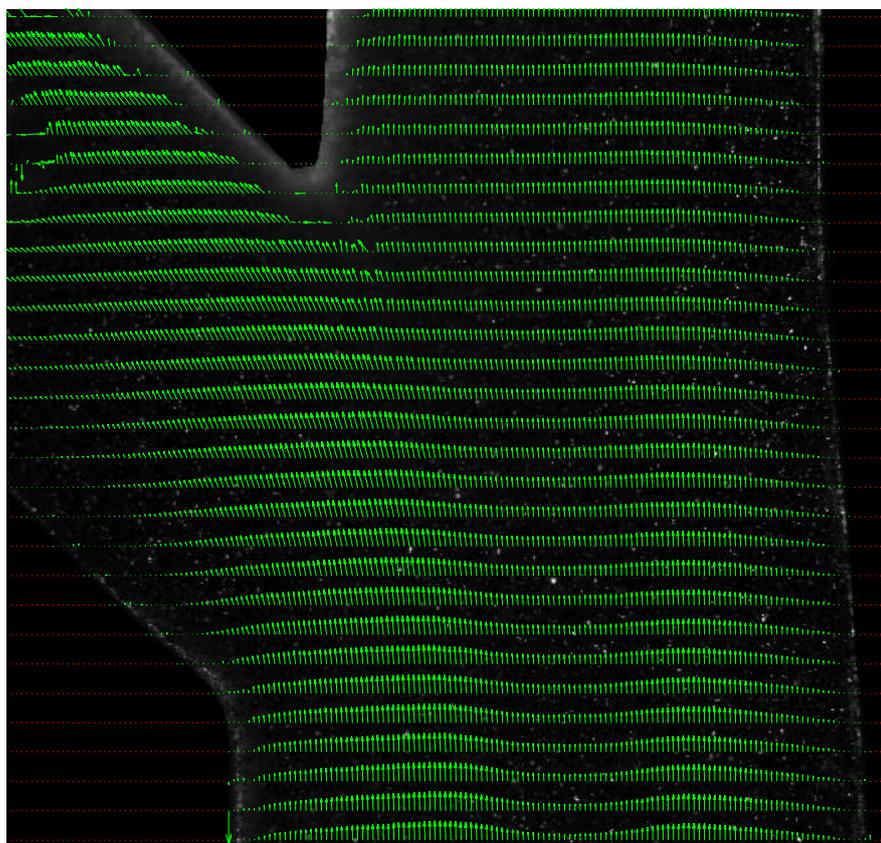


Figura 5. 5: Perfil de velocidades; Relación de caudal  $r=1,5$ ;  $Re=110$

En la Figura 5.5 se tiene la situación en la que el caudal que circula por el ramal principal de salida es 1,5 veces mayor que el caudal que se tiene en el ramal lateral de salida, esto provoca que el flujo tienda a ir por el ramal principal, provocando la misma situación que en la figura 5.4 de movimientos tridimensionales pero incrementando su efecto, al haber aumentado la relación de caudales. Se desplaza el perfil de velocidades hacia la derecha de la imagen.

En el ramal principal se tienen perfiles de velocidad más completos que para las relaciones de caudal anteriores.

Por último se estudian los dos puntos más críticos en cuanto a caudales, estos son cuando todo el flujo va por el ramal principal de salida ( $r=\infty$ ) y cuando todo el flujo va por el ramal lateral de salida ( $r=0$ ).

Para el caso de  $r=\infty$ , las condiciones de ensayo aparecen reflejadas en la tabla 5.4:

Tabla 5. 4: Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	$\infty$
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	292,66
Caudal Q3 (mL/min)	0
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	140
Re3	0
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

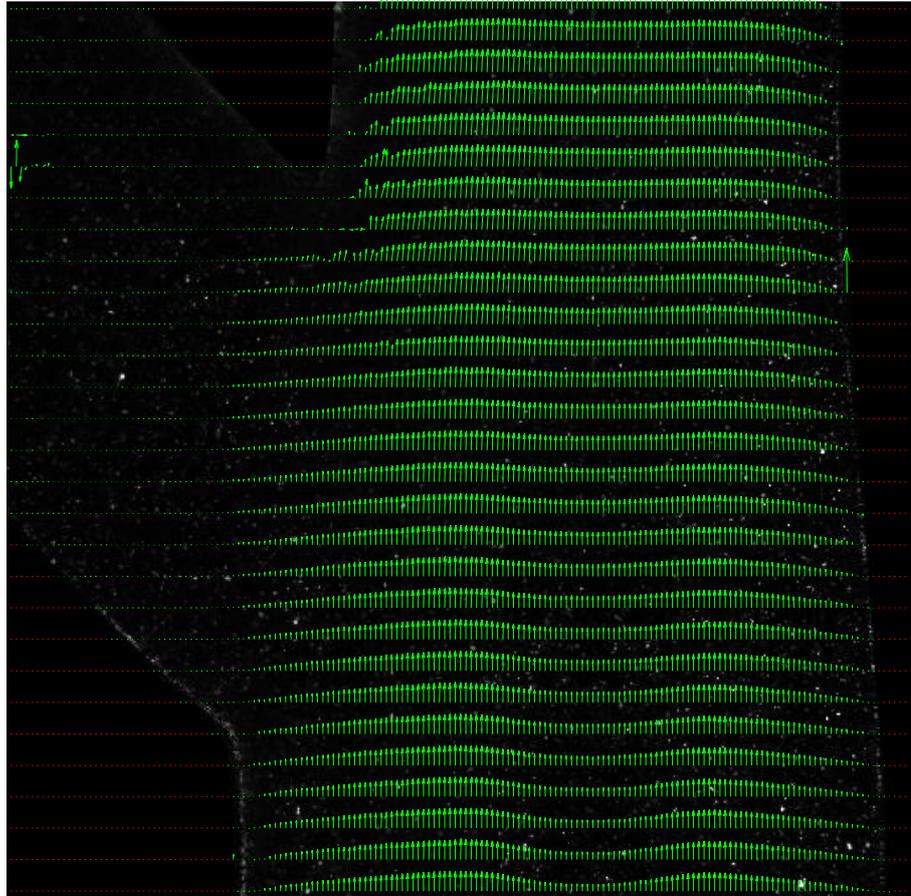


Figura 5. 6: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=110$

Este es un caso extremo, en el cual no pasa nada de fluido por el ramal lateral de salida, esto provoca como se puede ver en la Figura 5.6 que en la zona de inicio del ramal lateral de salida se tenga un efecto de “pared” haciendo que el fluido se frene, provocando zonas de recirculación, ya que el fluido en esta zona está parado, pero entra en contacto con el fluido que está en movimiento. Se puede observar como el perfil de velocidades se estira en esta zona, efecto que no se daría si en vez de fluido lo que hubiera fuera la pared.

En el ramal principal de salida se puede observar cómo se recupera casi por completo el flujo de la perturbación introducida por el obstáculo aguas arriba de la bifurcación.

Para el caso de relación de caudales nula, las condiciones de ensayo aparecen reflejadas en la Tabla 5.5:

Tabla 5. 5: Relación de caudales  $r=0$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	0
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	0
Caudal Q3 (mL/min)	292,66
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	0
Re3	159
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

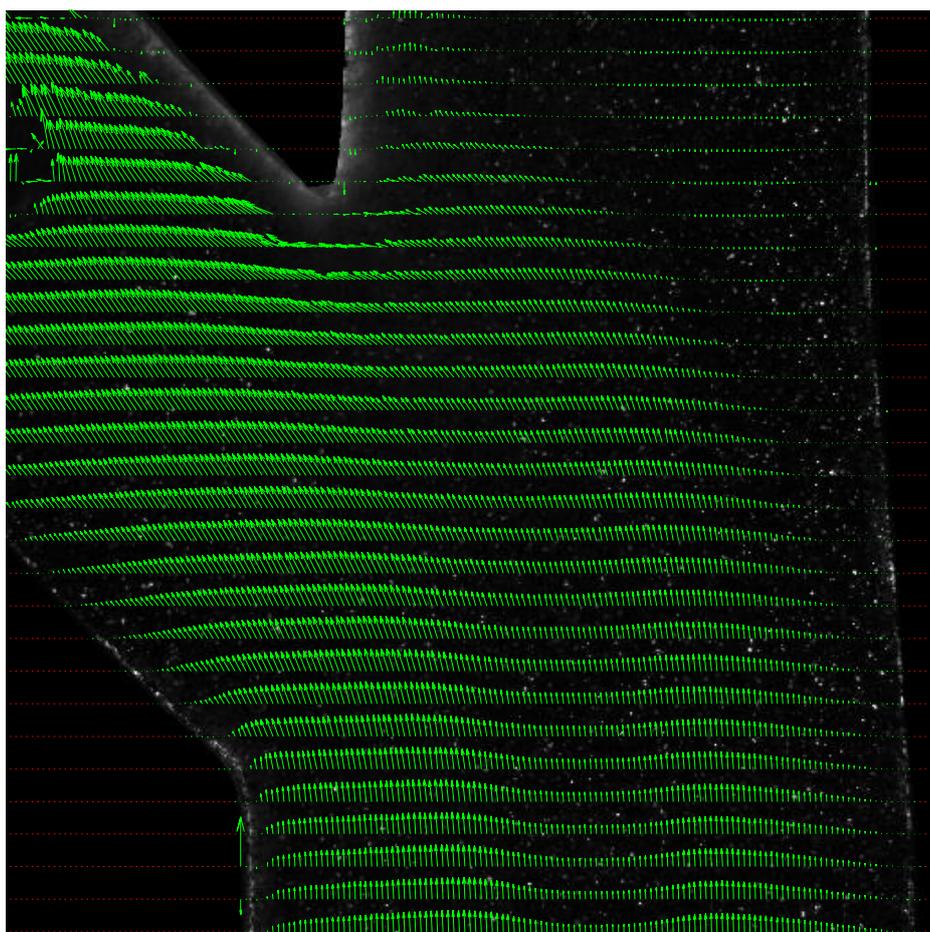


Figura 5. 7: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0$ ;  $Re=110$

Esta es la otra situación extrema posible, cuando por el ramal principal de salida no circula fluido. Se puede observar en la Figura 5.7 como el fluido al no poder ir por este ramal se tiene que girar para ir por el ramal lateral de salida.

La zona más interesante en este caso es la zona de inicio del ramal principal, donde puede verse como el fluido se frena debido al rozamiento con el fluido en reposo que se tiene en este ramal.

En el ramal lateral, puede verse como el perfil de velocidades una vez dentro es un perfil completamente desarrollado, con la forma parabólica y el respectivo giro debido a la dirección del ramal. Al ser el 100% de caudal el que circula en este caso, la zona de movimientos tridimensionales en la pared exterior del ramal lateral es prácticamente inexistente.

### **5.1.2 Resultados en la zona del obstáculo**

El modelo lleva añadidos 6 obstáculos transversales al flujo, uno aguas arriba de la bifurcación, en el ramal de entrada principal, cuatro aguas abajo de la bifurcación, en el ramal de salida principal y uno aguas abajo de la bifurcación en el ramal de salida lateral (Figura 5.1). En este apartado, el estudio se realiza en la zona aguas arriba de la bifurcación, para ello se ha realizado el mismo procedimiento que para el estudio en la zona de la bifurcación, tomando los mismos puntos de funcionamiento de la instalación (mismos números de Reynolds y misma relación de caudales).

El obstáculo se ha introducido en el punto medio de la sección del modelo. Se ha representado mediante un cuadrado azul con bordes redondeados sobre la imagen, ya que no se aprecia en las imágenes.

Los resultados obtenidos para este apartado son para un número de Reynolds  $Re=110$  en el ramal principal. Las condiciones de ensayo aparecen reflejadas en la Tabla 5.6:

Tabla 5. 6: Relación de caudales  $r=0,706$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	0,728
Caudal Q1 (mL/min)	292,65
Caudal Q2 (mL/min)	121
Caudal Q3 (mL/min)	171,65
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	58
Re3	93
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

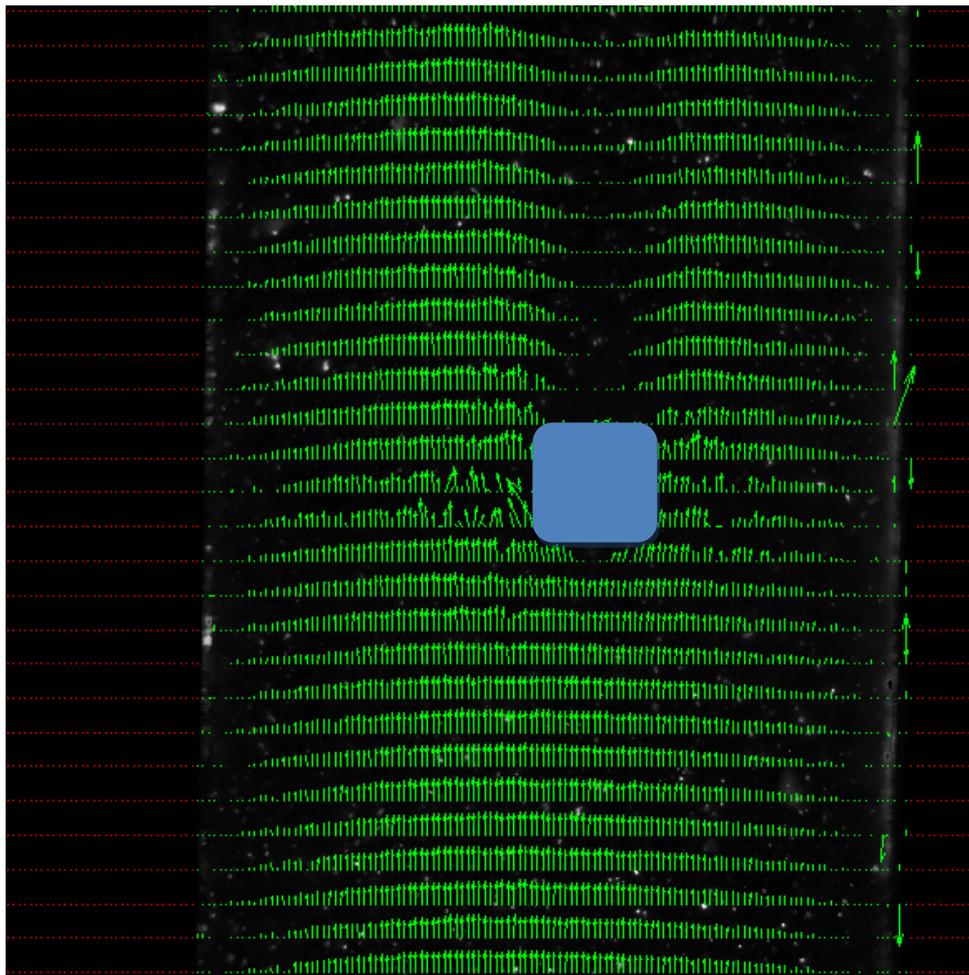


Figura 5. 8: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0,706$ ;  $Re=110$

En la situación de la Figura 5.8 se puede ver como aguas arriba del cuerpo se tiene un perfil parabólico de Hagen-Poiseuille. Este perfil permanece estable hasta que llega a la zona del obstáculo, donde puede verse como el fluido debe adaptarse para poder bordearlo. Al no tener este un perfil aerodinámico, se produce un desprendimiento de la capa límite, provocado una estela. Esta zona de la estela es una zona turbulenta, donde se producen torbellinos que provocan una pérdida de energía en el flujo, haciendo que este se frene.

Aguas abajo del cuerpo, el perfil de velocidades toma una forma parabólica a ambos lados del obstáculo, recuperándose poco a poco según va avanzando el flujo hasta llegar de nuevo a un perfil parabólico en todo el ancho de la sección del conducto.

Debido a que la relación de caudales no afecta en el comportamiento del fluido frente a este obstáculo, ya que este se encuentra aguas arriba de la bifurcación haciendo que siempre pase por esta zona el mismo caudal, los demás resultados obtenidos para las diferentes relaciones de caudal se encuentran en el ANEXO, así como los diferentes resultados obtenidos para los diferentes números de Reynolds estudiados, siendo como en el apartado anterior la única variación el número de Reynolds, haciendo que el flujo sea más laminar y que se adapte mejor a los cambios.

### **5.1.3 Comparativa para la misma relación de caudal**

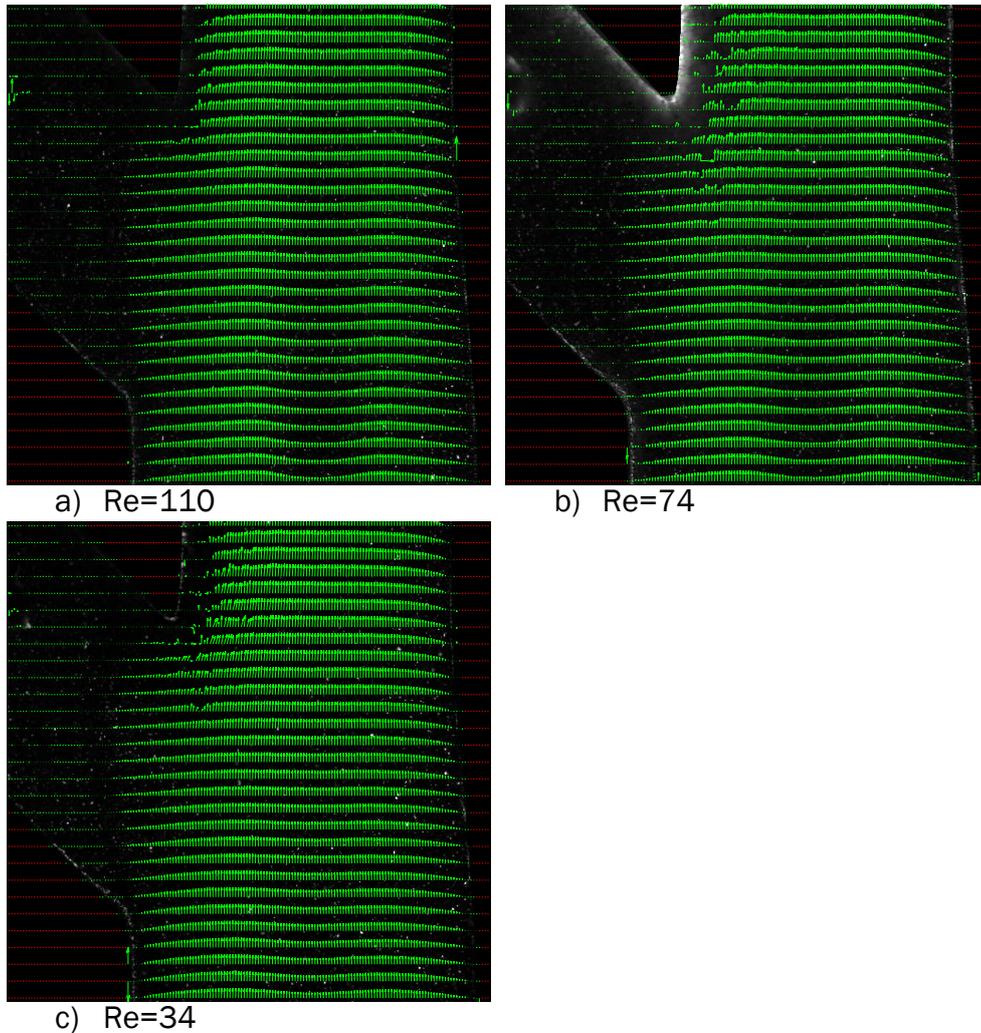
En este apartado se va a analizar los resultados desde un punto de vista comparativo, manteniendo para todos los casos la relación de caudal, tanto para el caso de la zona de la bifurcación como para el caso de la zona del obstáculo. A la hora de realizar el análisis primero se representan todos los campos de velocidades y luego se comentan los resultados.

#### **5.1.3.1 Zona de la bifurcación**

Ya que los efectos al variar la velocidad de giro de la bomba manteniendo la relación de caudales son los mismos exceptuando que al tener números de Reynolds más bajos según se baja la velocidad de giro de la bomba, se tienen flujos más laminares y por lo tanto se adaptan mejor a cambios y perturbaciones en el flujo, se ha escogido

los casos extremos de relación de caudales  $r=\infty$  y  $r=0$  para realizar la comparación de este apartado.

Para la relación de caudales  $r=\infty$  se han obtenido los resultados representados en la Figura 5.9 a los diferentes números de Reynolds.



*Figura 5. 9: Relación de caudales  $r=\infty$*

En esta situación puede verse de una forma más clara como el flujo se recupera más rápido ante la pérdida introducida por el obstáculo situado aguas arriba. El flujo en la Figura 5.9 c) tiene un número de Reynolds más bajo que en las otras dos situaciones, por lo tanto, es un flujo más laminar que los otros dos (Figura 5.9 a) y Figura 5.10 b)) y se recupera con mayor facilidad ante una perturbación.

Puede verse como en la Figura 5.9 a), el flujo adquiere el perfil parabólico de Hagen-Poiseuille justo donde empieza el ramal principal

de salida, sin embargo, en la Figura 5.9 C) puede verse como el flujo adquiere este perfil de velocidad parabólico un poco después de acabar el ramal principal de entrada, recién entrado en la zona de la bifurcación.

La siguiente relación de caudales considerada ha sido  $r=0$ , para esta relación se han obtenido los resultados representados en la Figura 5.10 a los diferentes números de Reynolds.

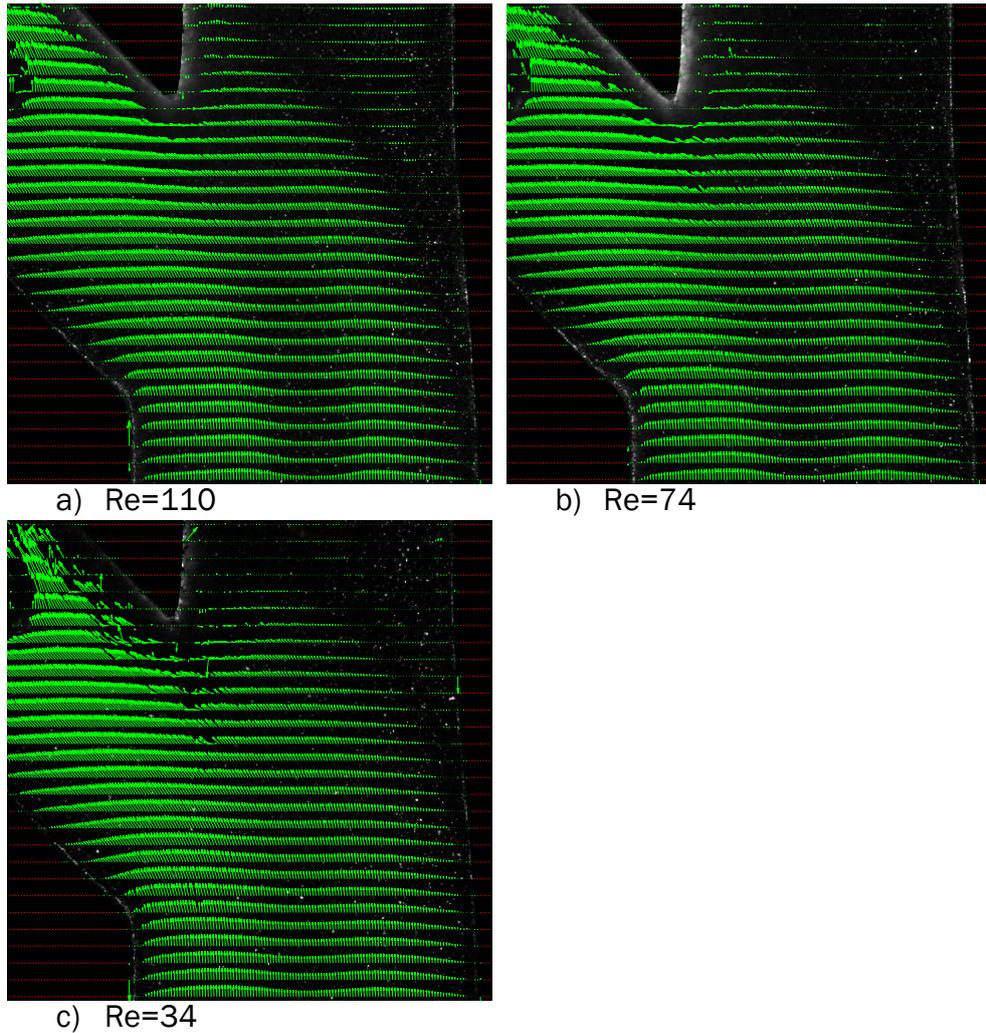


Figura 5. 10: Relación de caudales  $r=0$

En esta situación de relación de caudales  $r=0$ , puede verse como el flujo en la Figura 5.10 c), al ser más laminar se recupera antes de la perturbación como ya se había comentado, pero también puede observarse como a la hora de realizar el giro para circular por el ramal lateral, el flujo en esta situación se adapta mejor. En la Figura 5.10 a) puede verse como a más cantidad de fluido no le da tiempo a adoptar el giro en la parte del flujo correspondiente a la zona del ramal principal de salida, provocando una situación de pérdida de carga. En la Figura 5.10 b) puede observarse este fenómeno, pero con menor claridad. Siendo en la Figura 5.10 c) apenas inexistente esta pérdida.

### 5.1.3.2 Zona del obstáculo

Para este caso se analiza solo la situación en la que la relación de caudales es  $r=0,5$ , ya que los resultados en las demás situaciones son similares. Los resultados obtenidos han sido los representados en la Figura 5.11:

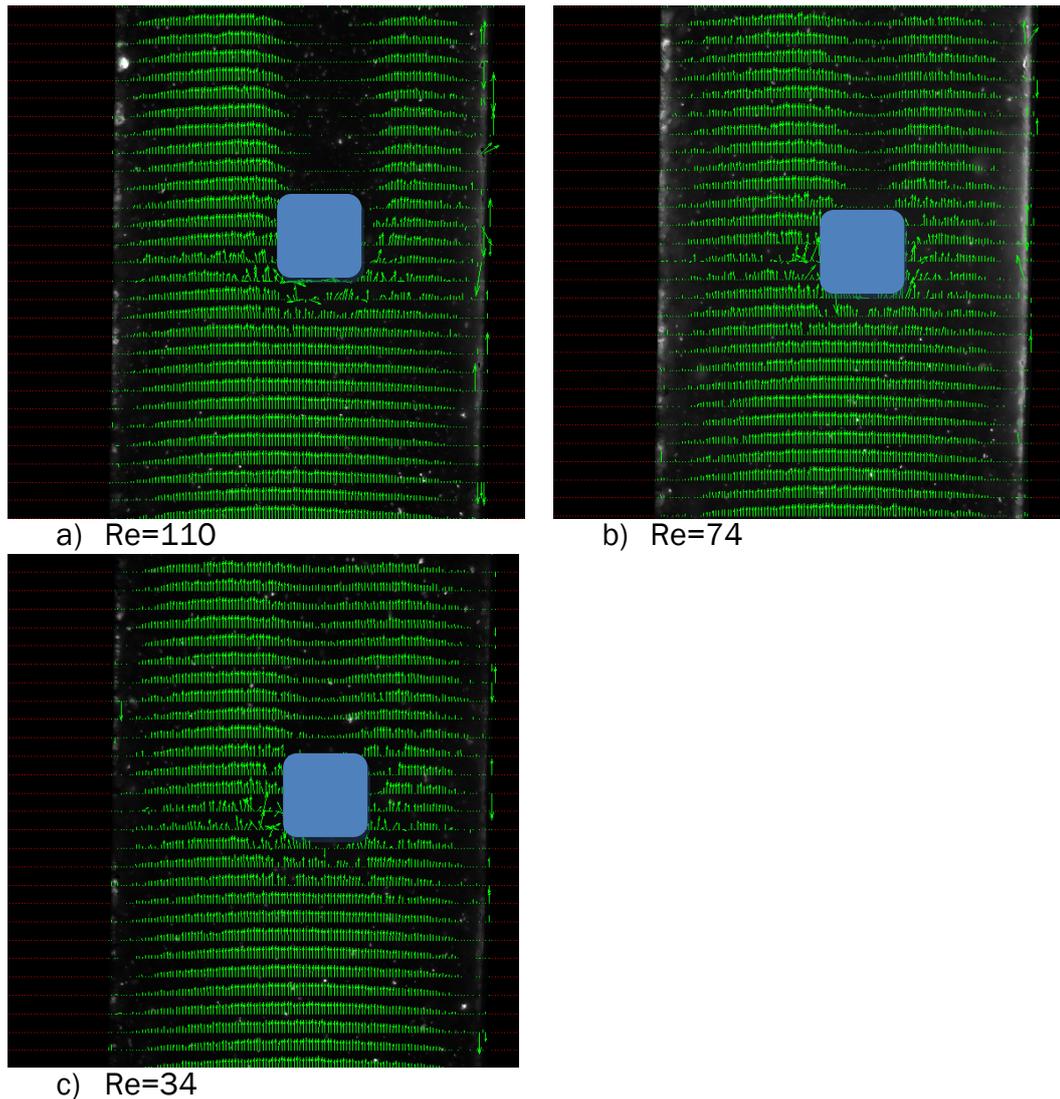


Figura 5. 11: Relación de caudales  $r=0,5$

En esta situación puede observarse lo comentado en apartados anteriores, el flujo se recupera antes de la perturbación introducida por el obstáculo en la situación de la Figura 5.11 c), de número de Reynolds  $Re=34$ , siendo el flujo más laminar. Esto es más evidente en

esta zona del modelo, ya que puede verse la estela que provoca el obstáculo.

#### **5.1.4 Comparativa para el mismo número de Reynolds a la entrada.**

En este apartado se va a analizar los resultados desde un punto de vista comparativo, manteniendo para todos los casos el número de Reynolds a la entrada del modelo, tanto para el caso de la zona de la bifurcación como para el caso en la zona del obstáculo. A la hora de realizar el análisis primero se representan todos los campos de velocidades y luego se comentan los resultados.

##### **5.1.4.1 Zona de la bifurcación**

El primer número de Reynolds para el que se hace el estudio es  $Re=110$ . Para esta situación se obtienen los diferentes campos de velocidad, Figura 5.12:

En la Figura 5.12 b), Figura 5.12 c) y Figura 5.12 d) puede verse la influencia de la relación de caudales en el flujo, para relación de caudal  $r=0,5$  (Figura 5.12 b)) circula el doble de caudal por el ramal lateral que por el principal de salida, esto puede verse en el perfil de velocidad, a medida que se aumenta la relación de caudal, (Figura 5.12 c)) puede verse como el perfil de velocidad se desplaza ligeramente hacia la derecha de la imagen, aumentando la zona de movimientos tridimensionales en la zona del giro que se produce en la pared del ramal lateral al formar la bifurcación. Si se sigue aumentando la relación de caudal (Figura 5.12 d)) este fenómeno se incrementa, teniendo en el ramal principal de salida un perfil de velocidad más desarrollado.

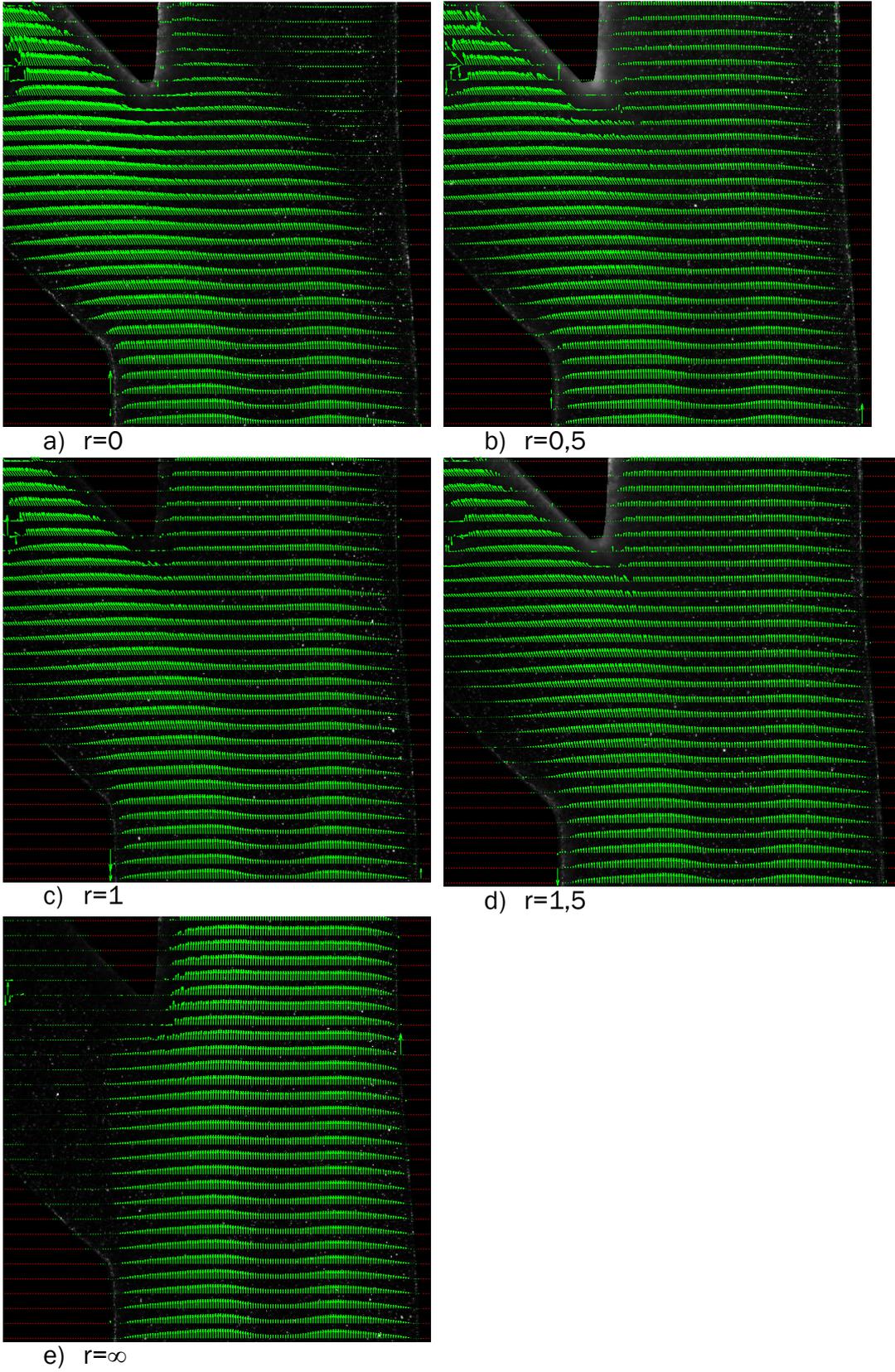


Figura 5. 12:  $Re=110$

Si se sigue aumentando la relación de caudal, hasta llegar a un punto extremo se tiene la situación de la Figura 5.12 e), donde por el ramal lateral de salida no circula fluido. En esta situación, al circular todo el fluido por un ramal el flujo se recupera antes, teniendo un perfil parabólico desarrollado.

La otra situación extrema es la representada en la Figura 5.12 a), donde la relación de caudal es  $r=0$ , por lo tanto, todo el fluido circula por el ramal lateral de salida. En esta situación el flujo debe adoptar el giro de la bifurcación por completo, dando lugar en la zona del ángulo de la bifurcación a una pérdida de carga, ya que el fluido no es capaz de adaptarse a tiempo a esta situación.

Para el resto números de Reynolds, los efectos son los comentados anteriormente.

#### ***5.1.4.2 Zona del obstáculo***

El primer número de Reynolds que se describe es  $Re=110$ . Para este número de Reynolds se obtienen los diferentes campos de velocidad mostrados en la Figura 5.13. Se observa que el patrón de flujo alrededor del obstáculo es prácticamente independiente de la relación de caudales al estar el obstáculo antes de la bifurcación. No obstante, para valores extremos de  $r$ , se notan ligeras diferencias en el patrón.

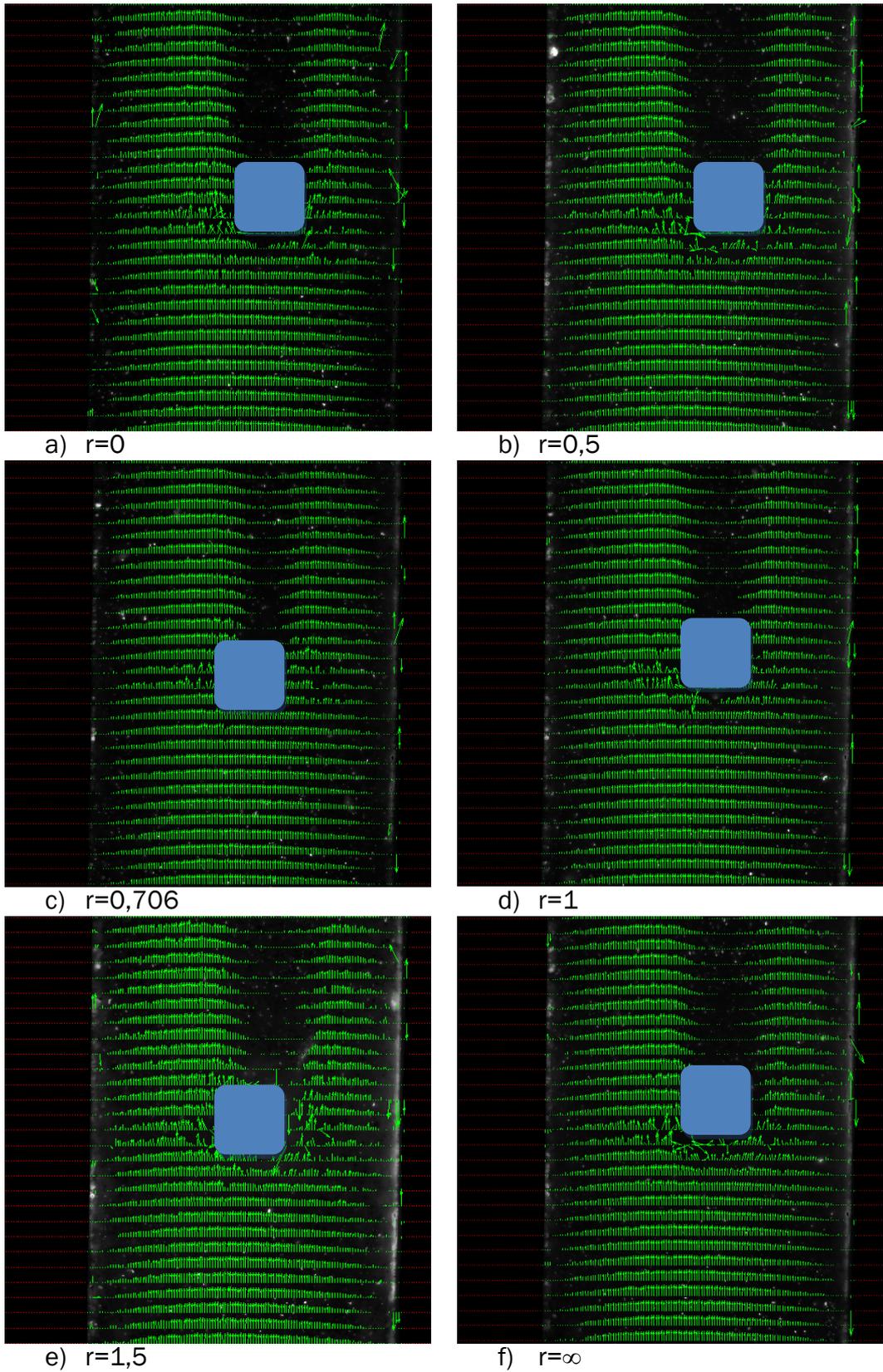


Figura 5. 13:  $Re=110$

### 5.1.5 Comparativa modelo con obstáculos y modelo sin obstáculos

En este apartado se van a comparar los campos de velocidades en la zona de la bifurcación para el modelo con obstáculos y para el modelo sin los obstáculos.

Los resultados obtenidos para el modelo sin obstáculos han sido para una relación de caudales de  $r=1,3$ . Por lo tanto estos resultados se comparan con los obtenidos para el modelo con obstáculos y una relación de caudales de  $r=1,5$  ya que son relaciones de caudales muy similares.

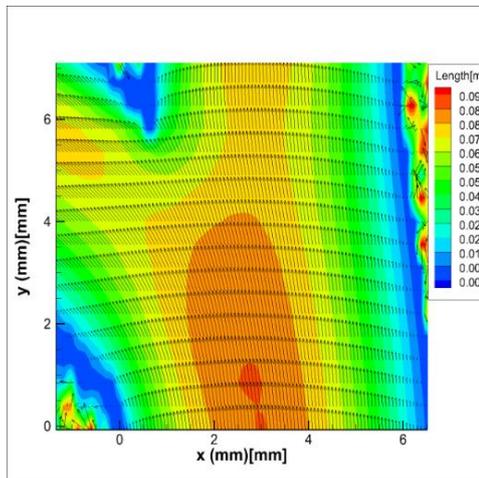


Figura 5. 14: Campo de velocidades para el modelo sin obstáculos.  $r=1,3$ , en forma de mapa de colores

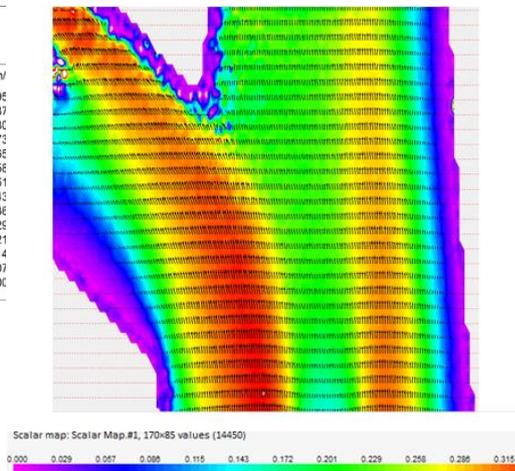


Figura 5. 15: Campo de velocidades para el modelo con obstáculos.  $r=1,5$ , en forma de mapa de colores

En la Figura 5.14 puede verse como en el modelo se tiene un perfil de velocidades parabólico del tipo Hagen-Poiseuille para todo el ancho de la sección del modelo, esto se debe a que aguas arriba de la bifurcación no se tiene ningún obstáculo que perturbe el flujo. En cambio, en la Figura 5.15 puede verse como al tener el obstáculo aguas arriba de la bifurcación se tiene un perfil de velocidades distinto, formándose dos parábolas, con el mínimo en la sección media del modelo, debido a la estela provocada por el cuerpo. Esta zona de bajas velocidades esta provocada por el desprendimiento de la capa límite al rodear el fluido el obstáculo. En las dos figuras puede verse como el fluido debe adoptar un giro para poder circular por el ramal lateral de salida.

En la zona de la pared exterior del ramal lateral, en el seno de la bifurcación, puede verse los movimientos secundarios comentados previamente.



## 6. CONCLUSIONES

---



## 6. Conclusiones

Se ha montado y puesto a punto una instalación para el estudio del patrón de flujo en un modelo de bifurcación. Esta instalación permite controlar el caudal que circula por cada uno de los conductos. Se ha desarrollado una metodología de medida para obtener el campo de velocidades para cada condición de ensayo.

Se ha estudiado la influencia de la relación de caudales y del número de Reynolds en el patrón de flujo en la bifurcación.

Del análisis de los resultados se puede extraer:

- La zona del seno de la bifurcación es una zona de movimientos secundarios inducidos por el giro que origina la bifurcación en el flujo.
- La bifurcación no altera el flujo aguas arriba de esta.
- Cuanto más bajo es el número de Reynolds, mejor se adapta a los cambios de dirección y por tanto menores son las perturbaciones.
- La zona de remanso es mayor en el ramal por el que circula menor caudal.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

---



## 7. Bibliografía

Bharadvaj, B. K., Mabon, R. F., & Giddens, D. P. (1982a). *Steady flow in a model of the human carotid bifurcation. 1. Flow visualization. Journal of Biomechanics*, 15(5), 349-362. doi:10.1016/0021-9290(82)90057-4

Bharadvaj, B. K., Mabon, R. F., & Giddens, D. P. (1982b). *Steady flow in a model of the human carotid bifurcation. 2. Laser-doppler anemometer measurements. Journal of Biomechanics*, 15(5), 363-378. doi:10.1016/0021-9290(82)90058-6

Buchmann, N., & Jermy, M. (2007). *Particle image velocimetry measurements of blood flow in a modeled carotid artery bifurcation*. Paper presented at the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC).

Crespo, A. (2006). *Mecánica de Fluidos*. S.A. Ediciones Paraninfo.

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

Giddens, D. P., Tang, T. D., & Loth, F. (1995). *Fluid mechanics of arterial bifurcations*. Biological Flow.edt.Plenum Press. (1995).

Pozo Álvarez, A. (2016). *Análisis en frecuencia del modelo de una bifurcación de arteria coronaria*. Trabajo fin de grado. Universidad de Valladolid.

Rubenstein, D., Wei, Y., & Frame, M. (2012). *Biofluid mechanics*. Oxford: Elsevier.

Ku, D. N., & Giddens, D. P. (1983). *Pulsatile flow in a model carotid bifurcation. Arteriosclerosis*, 3(1), 31-39.



# ANEXO

---



## ANEXO

### Introducción

En este ANEXO para todos los ensayos realizados se recogen las condiciones de ensayo y las distribuciones de velocidad.

Está estructurado de la siguiente manera, primero se recogen las condiciones de ensayo y las imágenes de los campos de velocidad, obtenidas a la hora de analizar con el PIV la **zona de la bifurcación** para los diferentes números de Reynolds y las diferentes relaciones de caudales.

A continuación se recogen las condiciones de ensayo y las imágenes de los campos de velocidad, obtenidas en el PIV para la **zona del modelo donde se encuentra el obstáculo**. Para esta zona, se ha representado el obstáculo mediante un cuadrado azul.

## Zona bifurcación

6000 rpm:

$r=0.5$

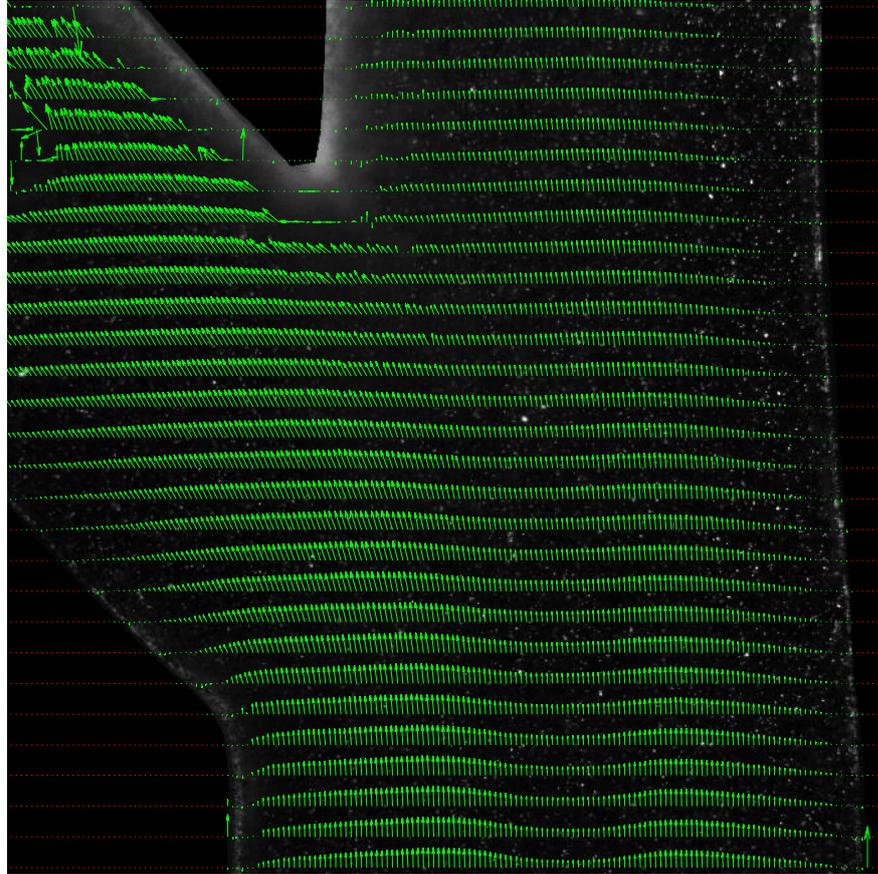


Figura 1: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0,5$ ;  $Re=110$

Tabla 1: Relación de caudales  $r=0,5$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	0,49
Caudal Q1 (mL/min)	292,656
Caudal Q2 (mL/min)	96,7
Caudal Q3 (mL/min)	195,956
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110,85
Re2	46,5
Re3	106,5
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

r=1

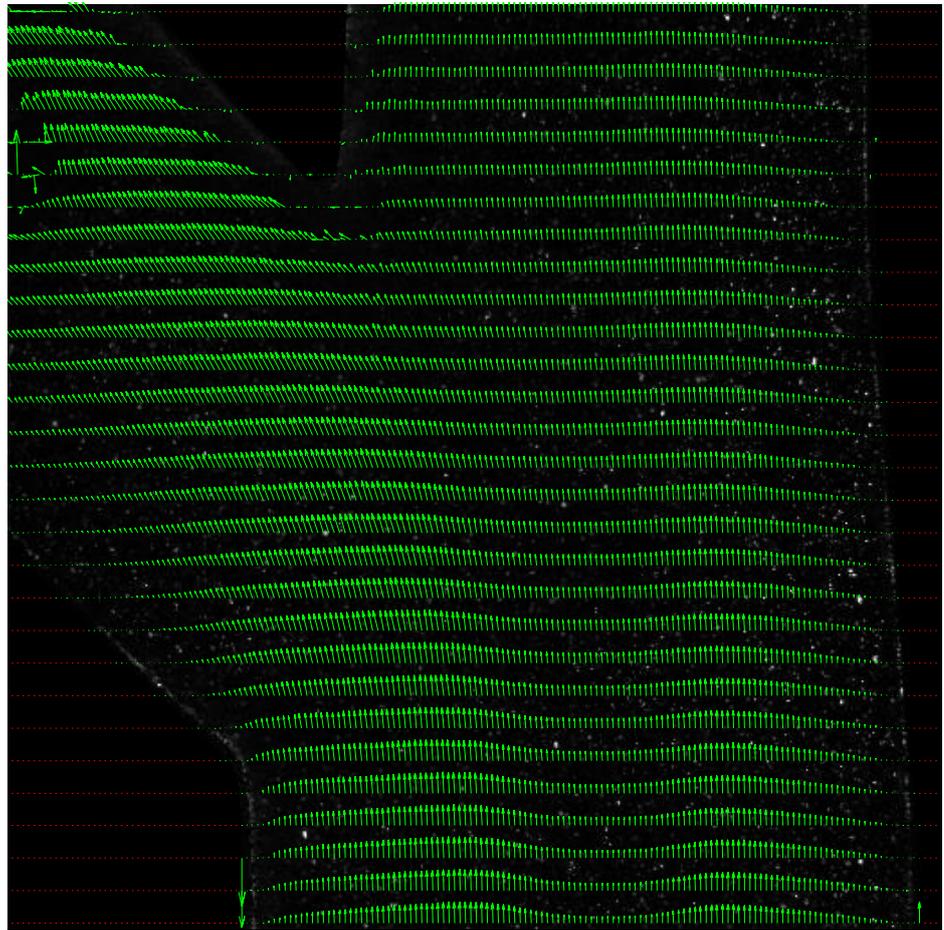


Figura 2: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=1$ ;  $Re=110$

Tabla 2: Relación de caudales  $r=1$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	1,01
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	147,30
Caudal Q3 (mL/min)	145,36
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	70
Re3	79
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	75
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

$r=1,5$

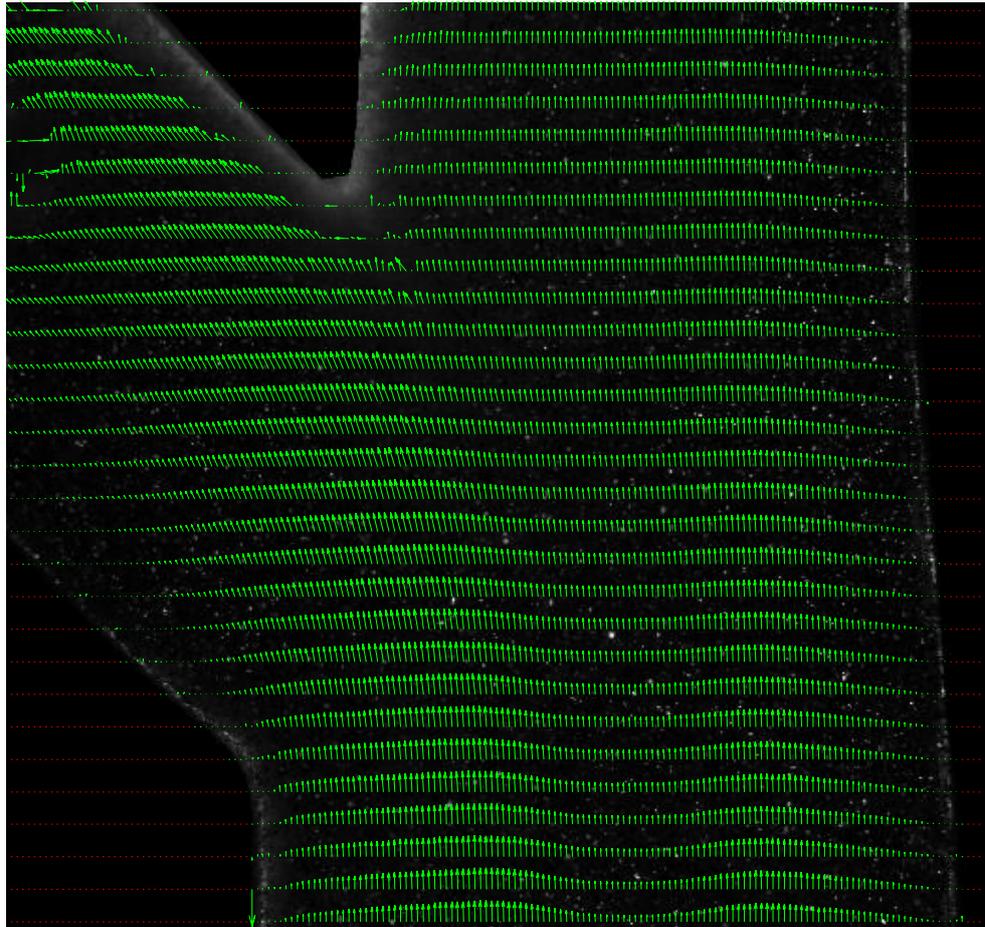


Figura 3: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=1,5$ ;  $Re=110$

Tabla 3: Relación de caudales  $r=1,5$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	1,521
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	176,60
Caudal Q3 (mL/min)	116,06
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	84
Re3	63
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

$r=\infty$

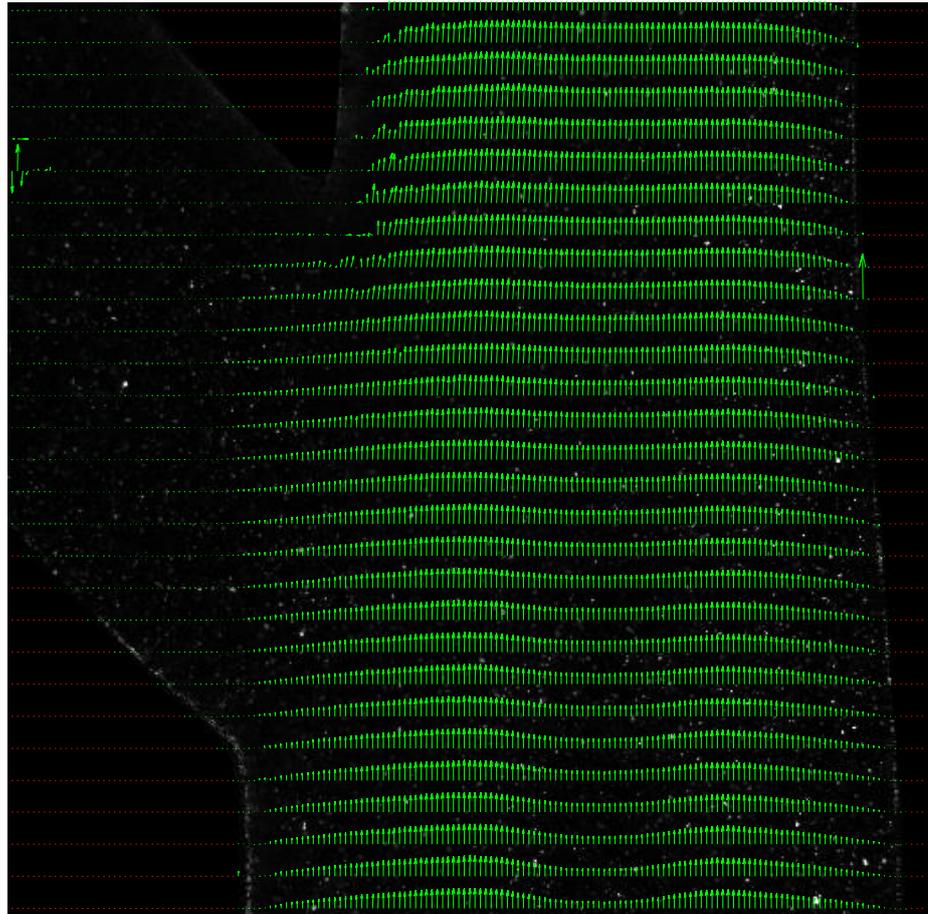


Figura 4: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=110$

Tabla 4: Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	$\infty$
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	292,66
Caudal Q3 (mL/min)	0
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	140
Re3	0
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	75
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

r=0

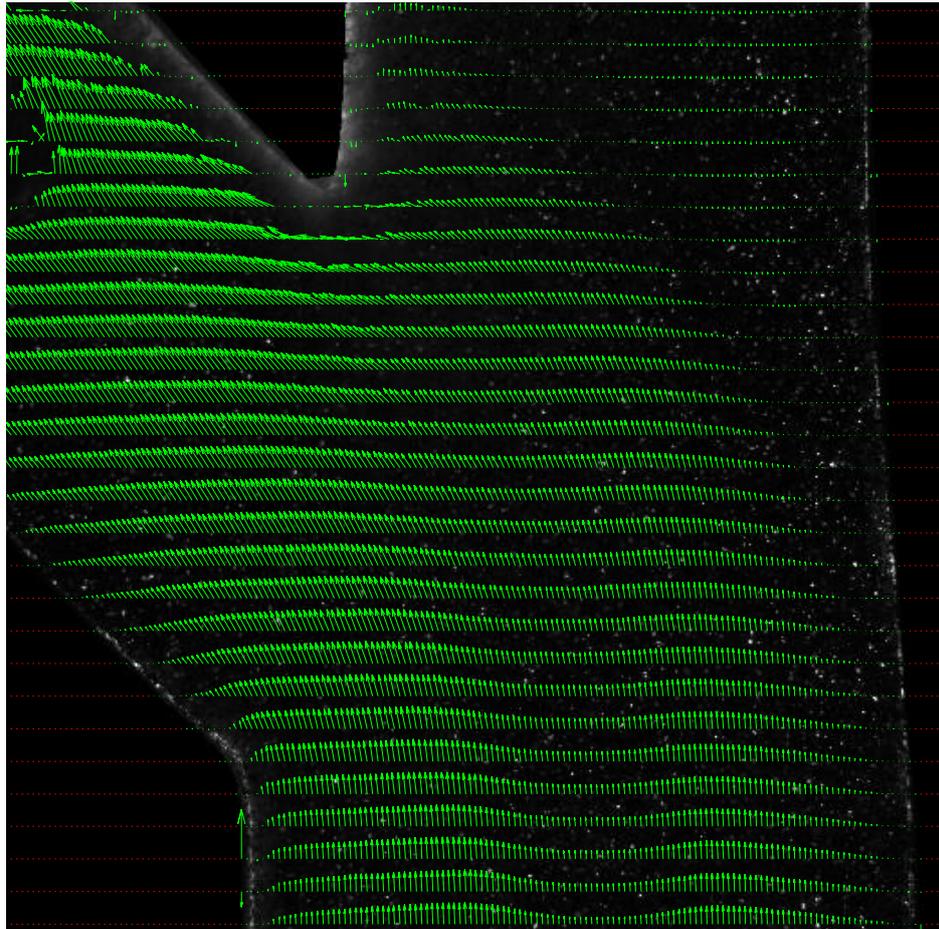


Figura 5: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0$ ;  $Re=110$

Tabla 5: Relación de caudales  $r=0$ ;  $Re=110$

r(Q2/Q3)	0
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	0
Caudal Q3 (mL/min)	292,66
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	0
Re3	159
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	75
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

4000 rpm:

$r=0.728$

Tabla 6: Relación de caudal  $r=0,728$ ;  $Re=74$

$r(Q2/Q3)$	0,728
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	82,40
Caudal Q3 (mL/min)	113,26
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	39
Re3	61
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	100
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

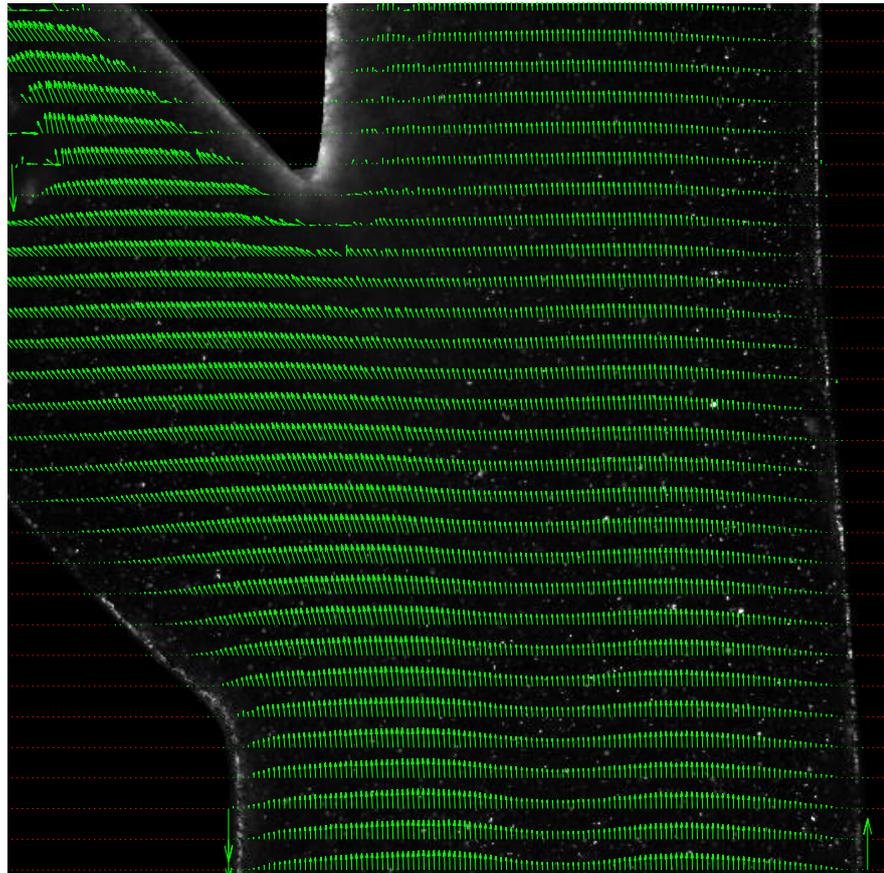


Figura 6: Perfil de velocidades; Relación de caudal  $r=0,728$ ;  $Re=74$

$r=0,5$

Tabla 7: Relación de caudales  $r=0.5$ ;  $Re=74$

$r(Q2/Q3)$	0,492
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	64,50
Caudal Q3 (mL/min)	131,16
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	31
Re3	71
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	100
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

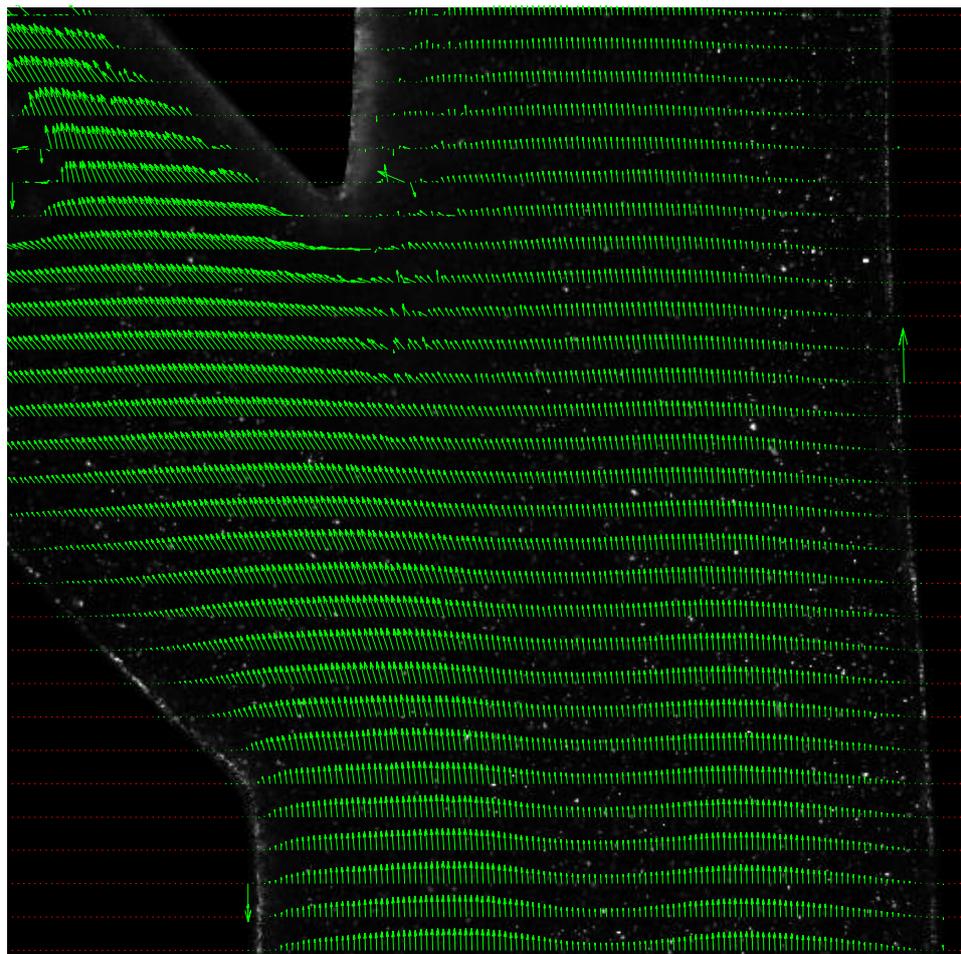


Figura 7: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0.5$ ;  $Re=74$

r=1

Tabla 8: Relación de caudales r=1; Re=74

r(Q2/Q3)	1,06
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	100,70
Caudal Q3 (mL/min)	94,96
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	48
Re3	51
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	110
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

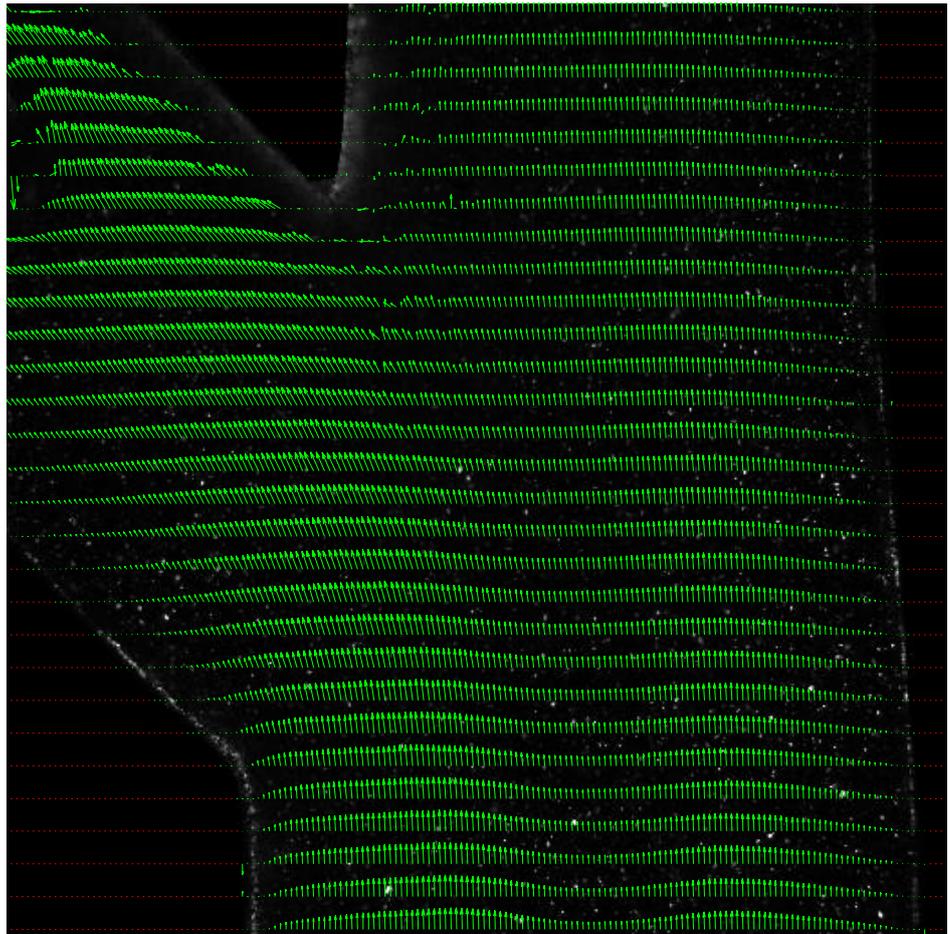


Figura 8: Perfil de velocidades; Relación de caudales r=1; Re=74

r=1,5

Tabla 9: Relación de caudales r=1,5; Re=74

r(Q2/Q3)	1,56
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	119,10
Caudal Q3 (mL/min)	76,56
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	57
Re3	41
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	110
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

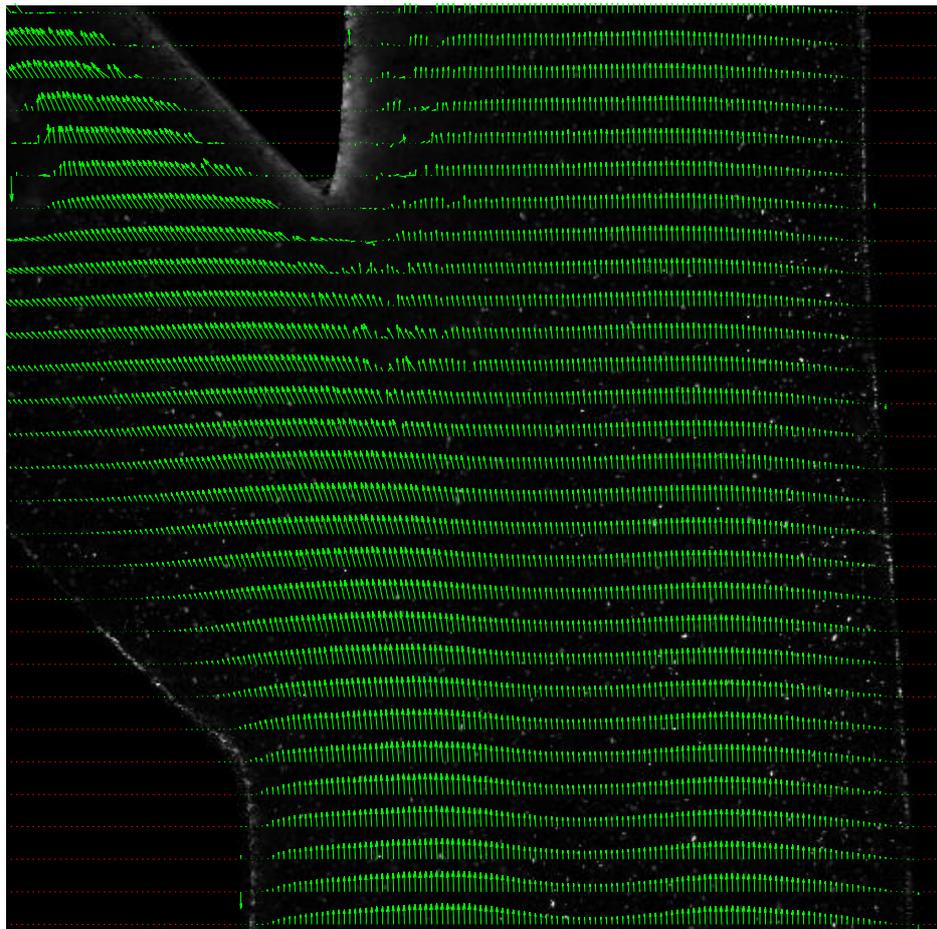


Figura 9: Perfil de velocidades; Relación de caudales r=1,5; Re=74

$r=\infty$

Tabla 10: Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=74$

$r(Q2/Q3)$	$\infty$
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	195,66
Caudal Q3 (mL/min)	0
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	94
Re3	0
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	110
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

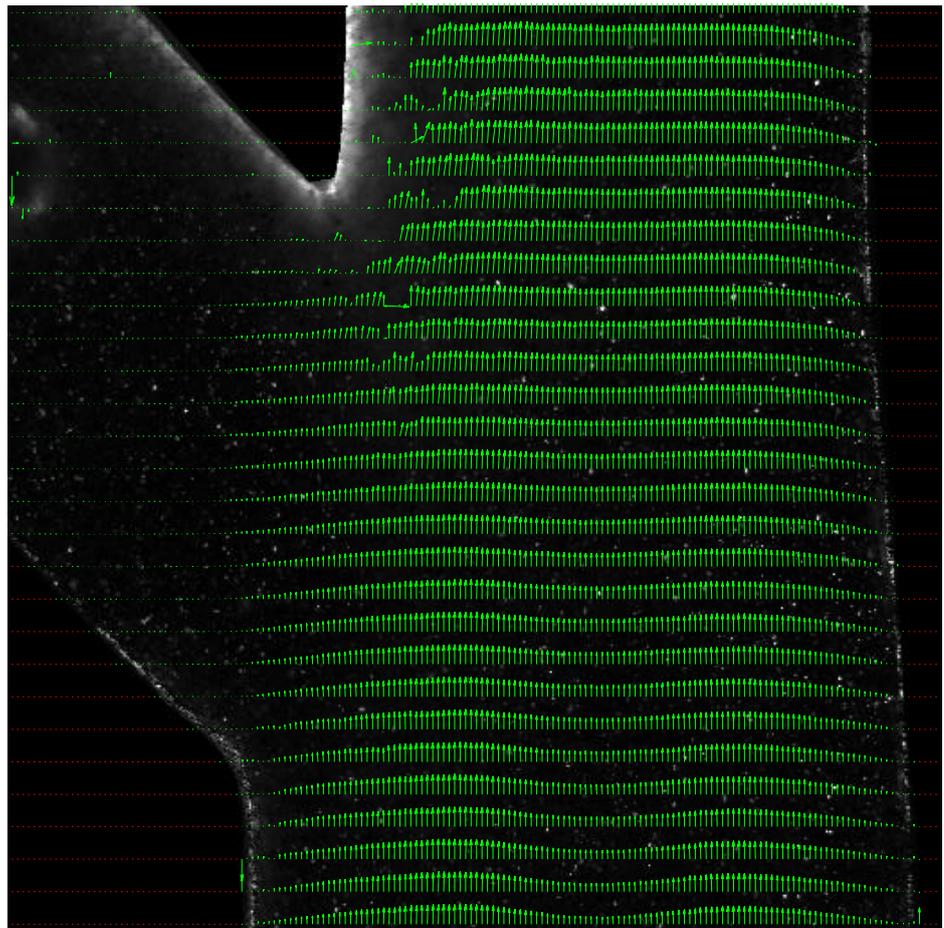


Figura 10: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=74$

r=0

Tabla 11: Relación de caudales  $r=0$ ;  $Re=74$

r(Q2/Q3)	0
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	0
Caudal Q3 (mL/min)	195,66
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	0
Re3	106
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	110
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

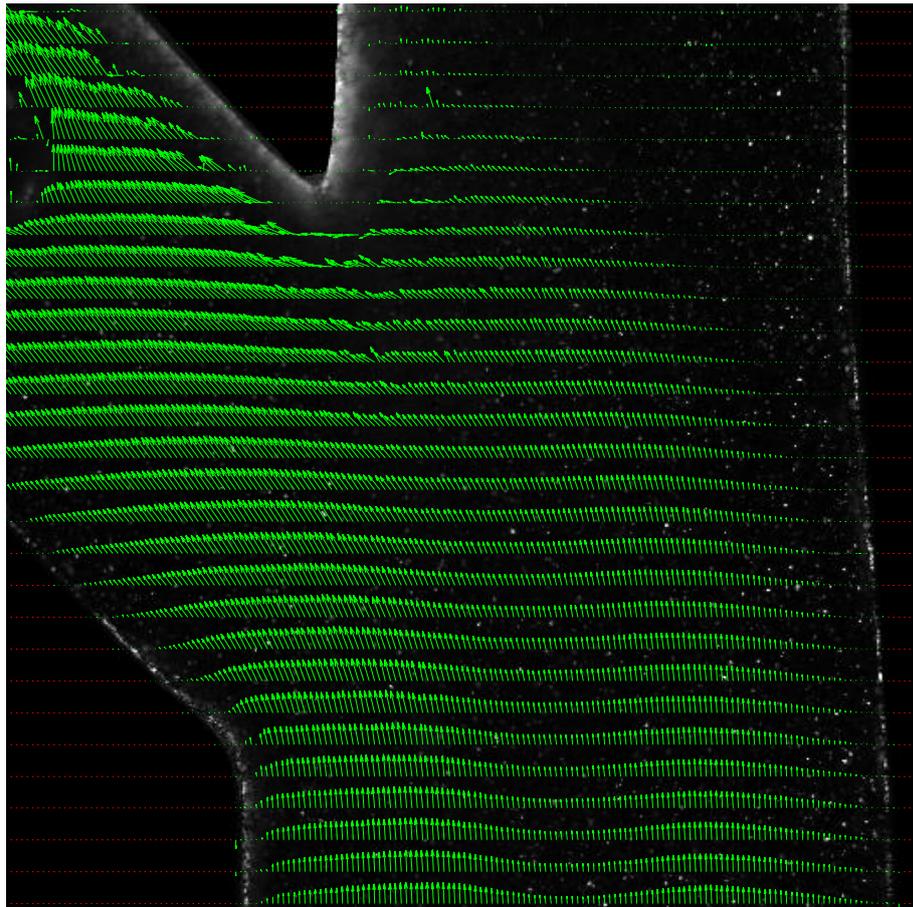


Figura 11: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0$ ;  $Re=74$

2000 rpm:

$r=0,65$

Tabla 12: Relación de caudales  $r=0.65$ ;  $Re=34$

$r(Q2/Q3)$	0,68
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	36,70
Caudal Q3 (mL/min)	53,96
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	17
Re3	29
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	250
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

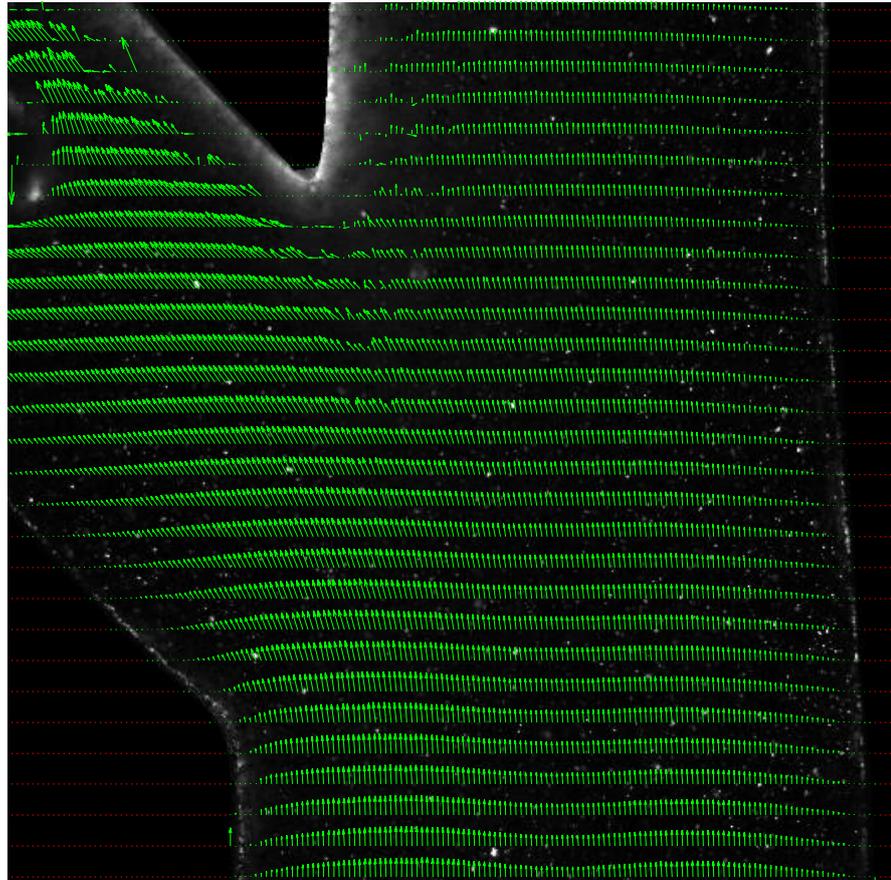


Figura 12: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0.65$ ;  $Re=34$

$r=0,51$

Tabla 13: Relación de caudales  $r=0,51$ ;  $Re=34$

$r(Q2/Q3)$	0,51
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	30,80
Caudal Q3 (mL/min)	59,86
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	14
Re3	32
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	250
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

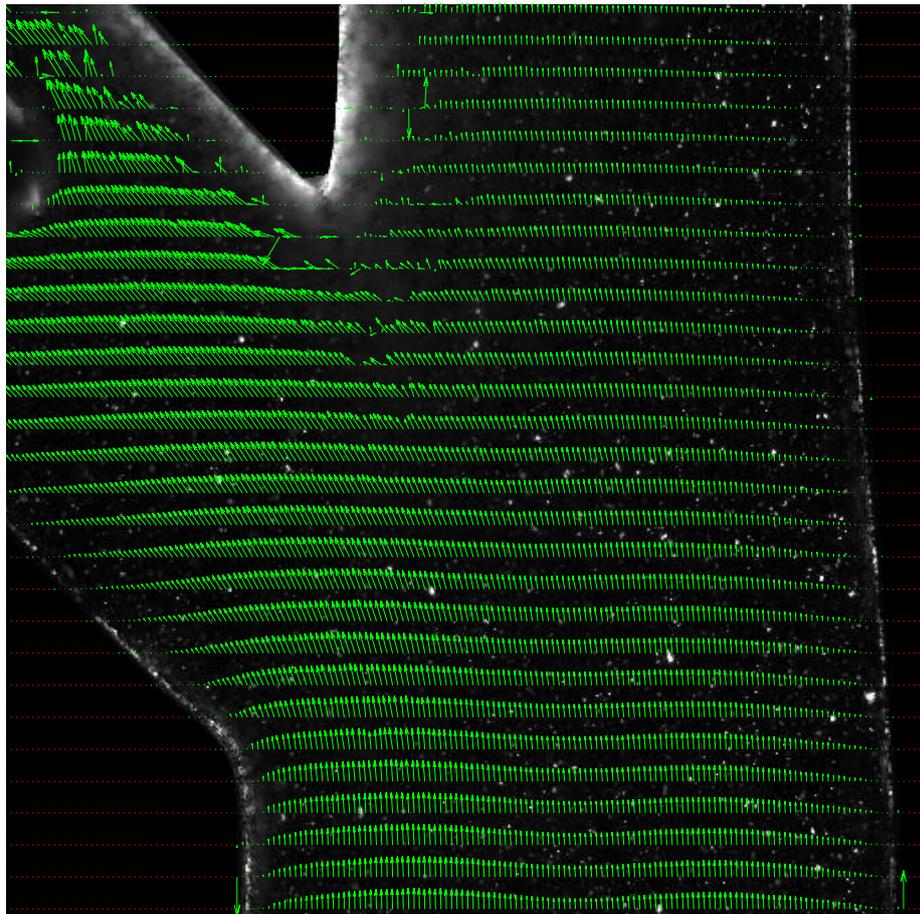


Figura 13: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0,51$ ;  $Re=34$

r=1

Tabla 14: Relación de caudales r=1; Re=34

r(Q2/Q3)	1,058
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	46,60
Caudal Q3 (mL/min)	44,06
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	22
Re3	23
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	250
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

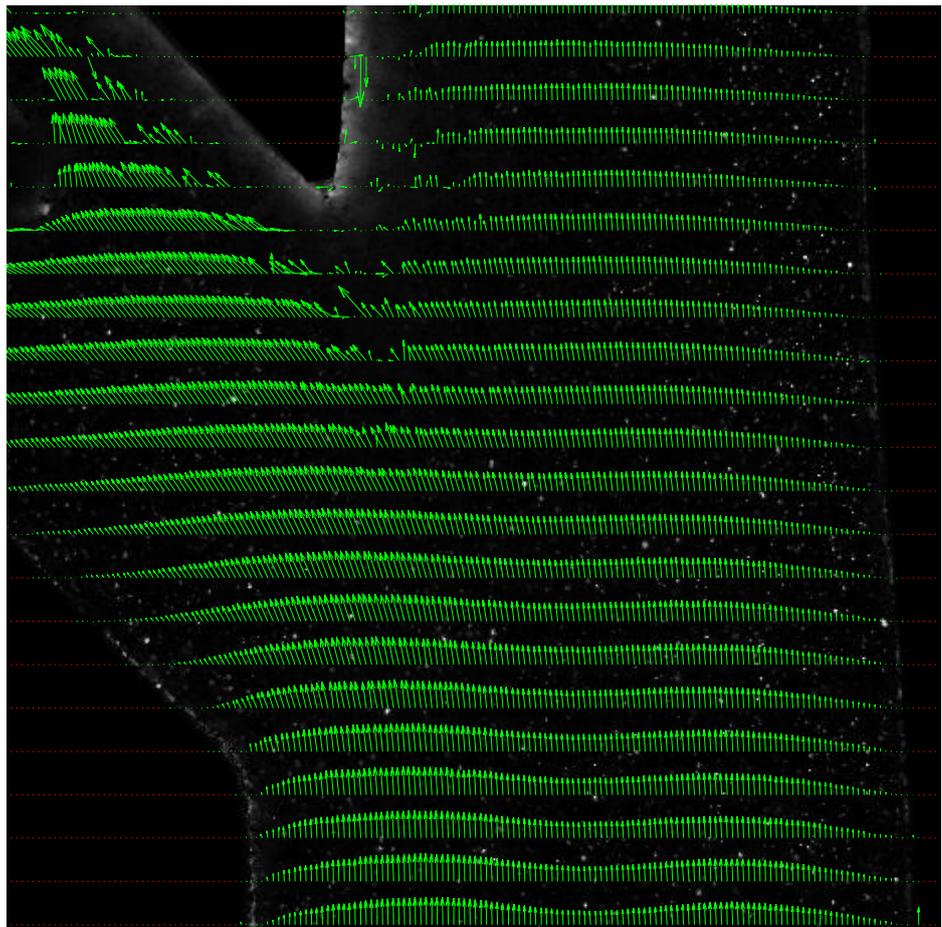


Figura 14: Perfil de velocidades; Relación de caudales r=1; Re=34

r=1,5

Tabla 15: Relación de caudales r=1,5; Re=34

r(Q2/Q3)	1,55
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	55,10
Caudal Q3 (mL/min)	35,56
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	26
Re3	19
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	250
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

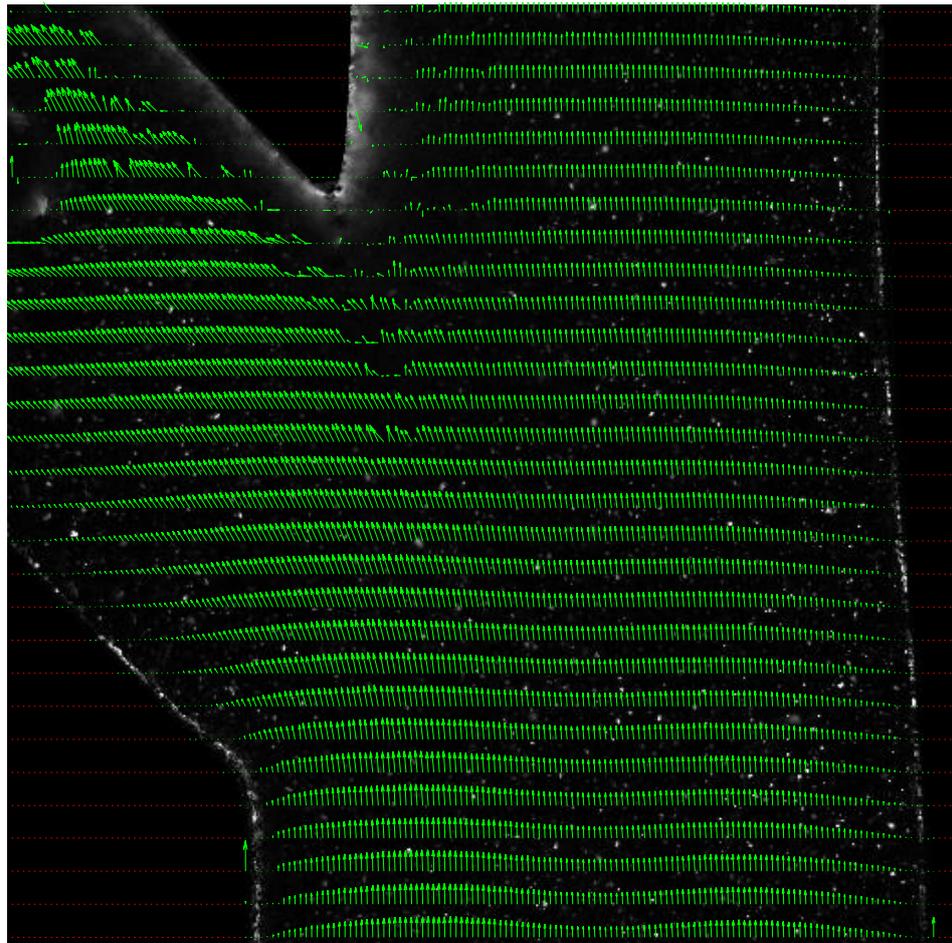


Figura 15: Perfil de velocidades; Relación de caudales r=1,5; Re=34

$r=\infty$

Tabla 16: Relación de caudales  $r = \infty$ ;  $Re=34$

$r(Q2/Q3)$	$\infty$
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	90,66
Caudal Q3 (mL/min)	0
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	43
Re3	0
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	250
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

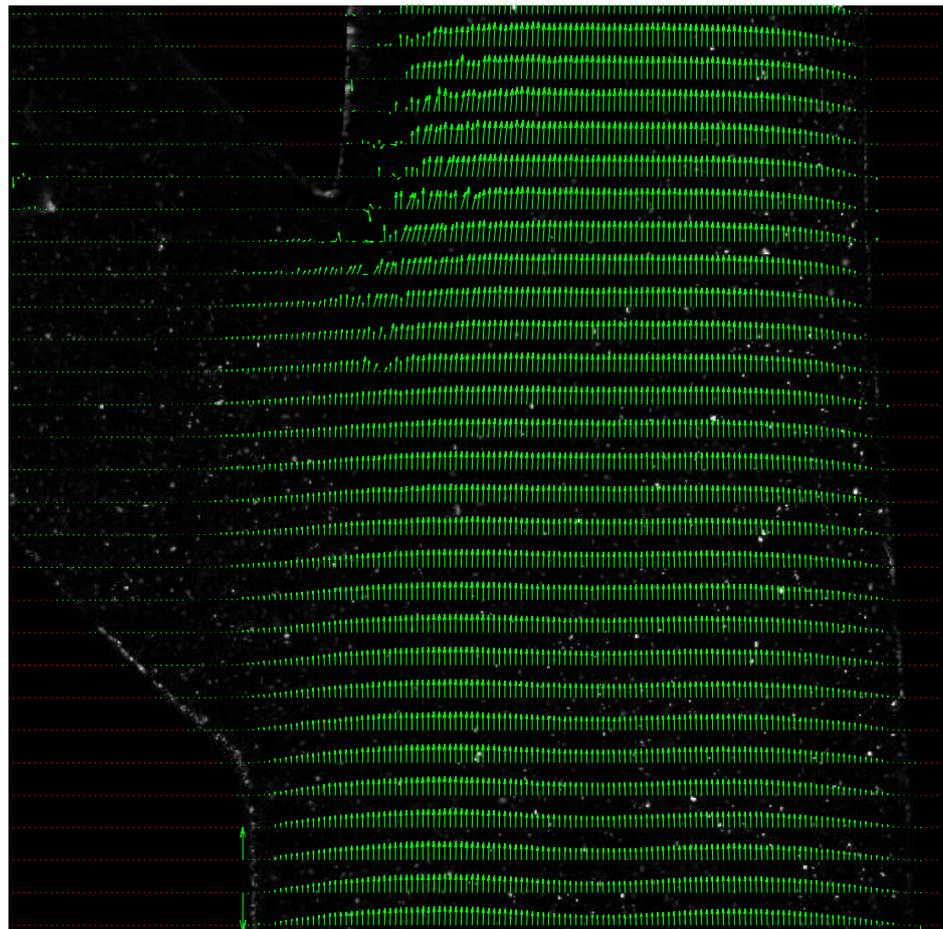


Figura 16: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r = \infty$ ;  $Re=34$

r=0

Tabla 17: Relación de caudales  $r=0$ ;  $Re=34$

r(Q2/Q3)	0
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	0
Caudal Q3 (mL/min)	90,66
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	0
Re3	49
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	250
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

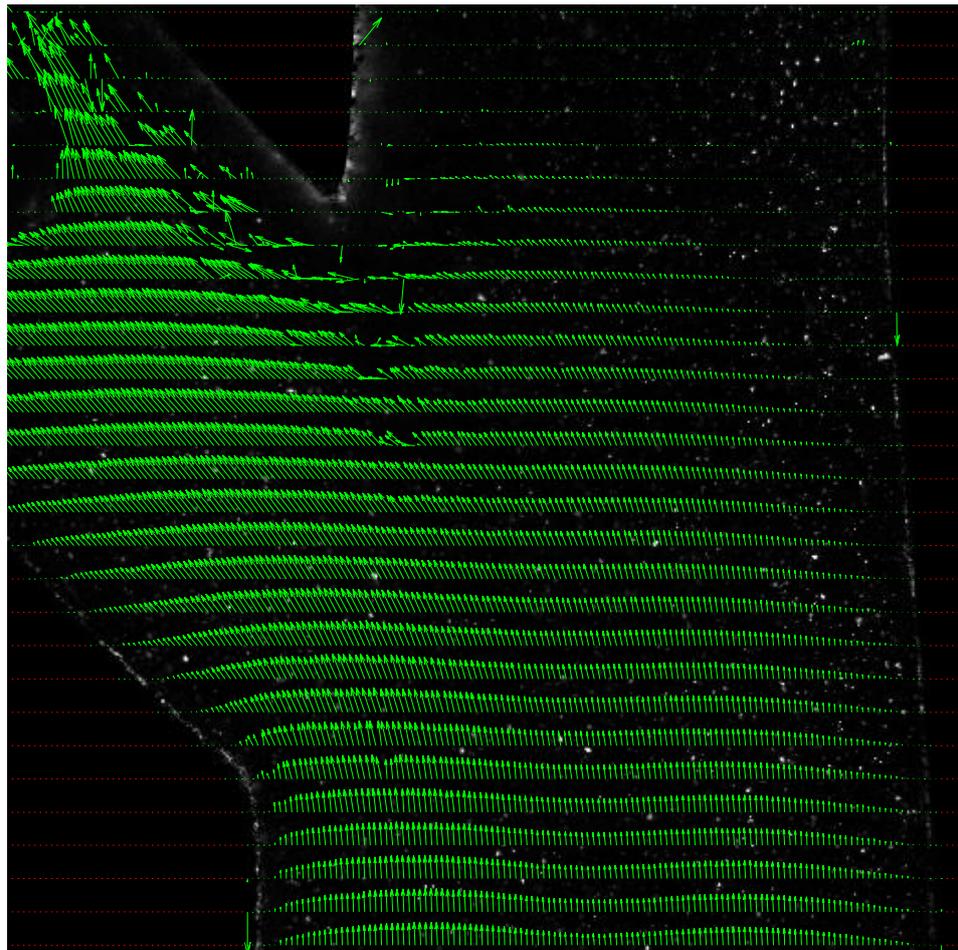


Figura 17: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0$ ;  $Re=34$

## Zona del obstáculo

6000 rpm:

$r=0.706$

Tabla 18: Relación de caudales  $r=0,706$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	0,706
Caudal Q1 (mL/min)	292,65
Caudal Q2 (mL/min)	121
Caudal Q3 (mL/min)	171,65
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	58
Re3	93
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

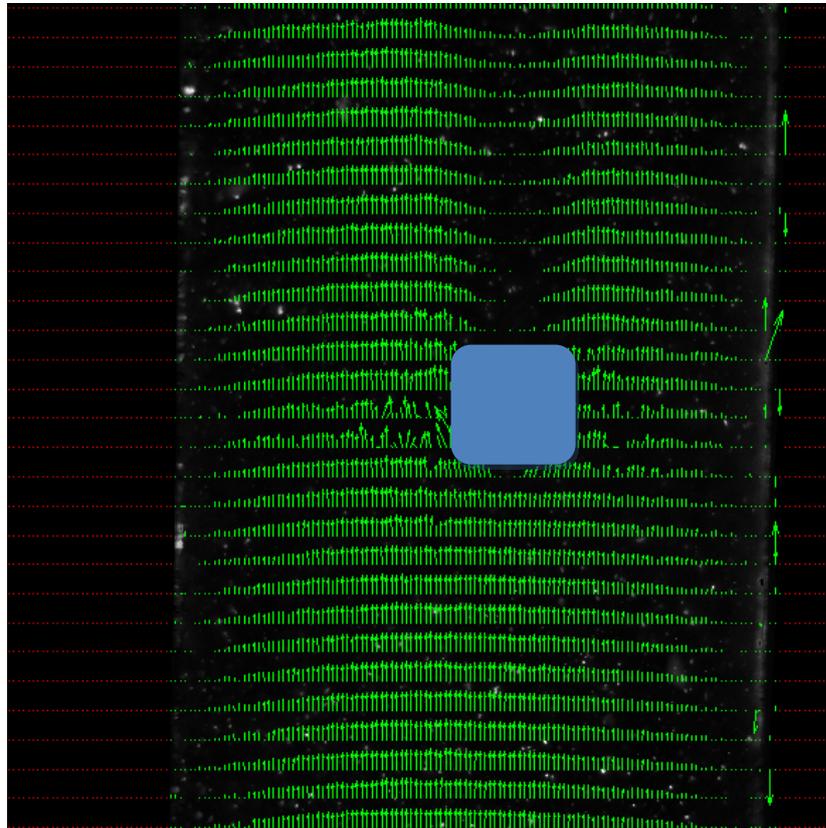


Figura 18: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0,706$ ;  $Re=110$

$r=0.5$

Tabla 19: Relación de caudales  $r=0,5$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	0,49
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	96,70
Caudal Q3 (mL/min)	195,96
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	46
Re3	106
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

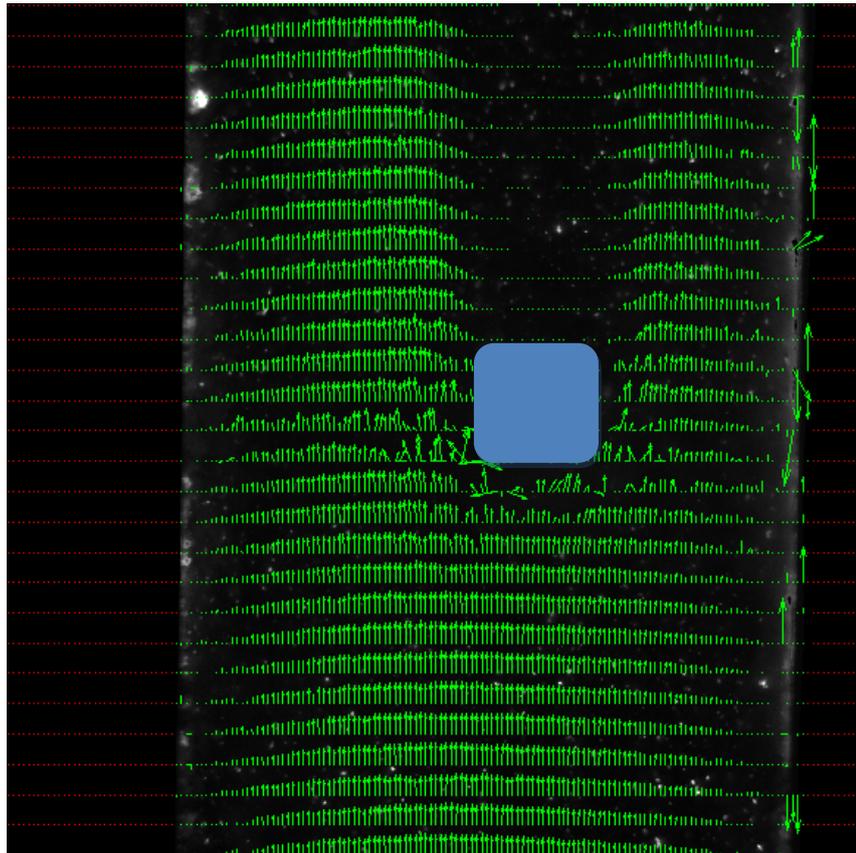


Figura 19: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=0,5$ ;  $Re=110$

r=1

Tabla 20: Relación de caudales r=1; Re=110

r(Q2/Q3)	1,01
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	147,30
Caudal Q3 (mL/min)	145,36
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	70
Re3	79
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	75
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

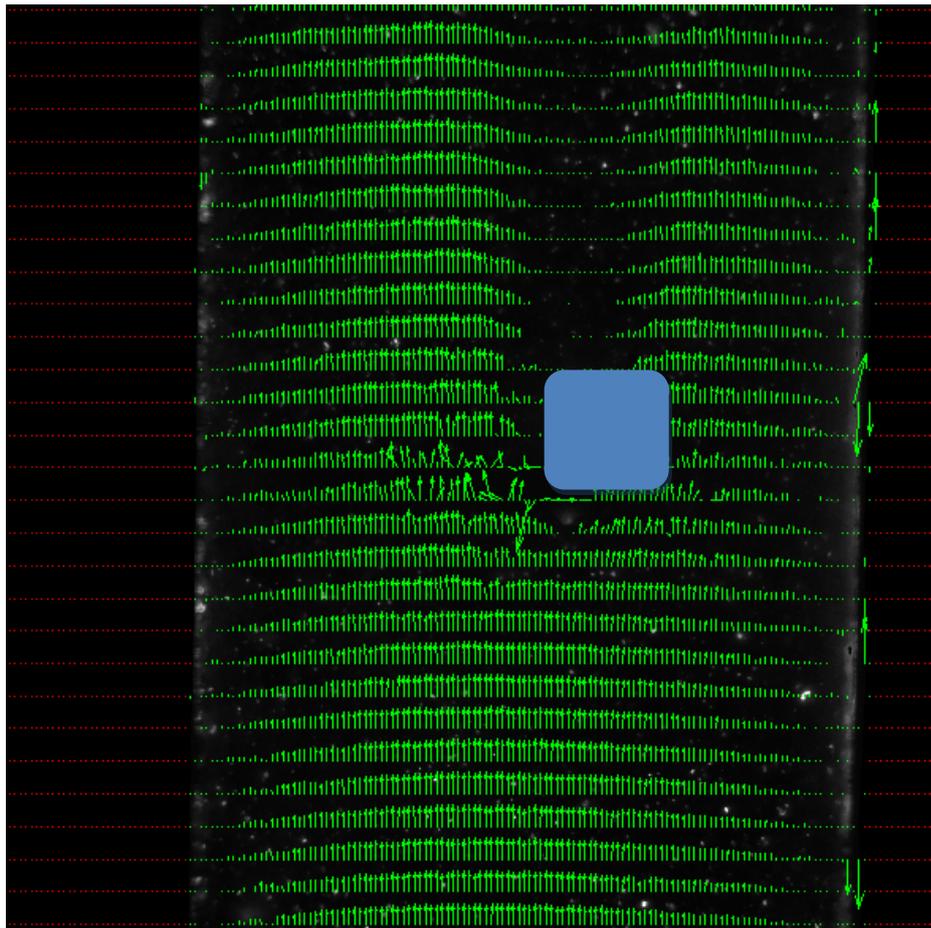


Figura 20: Perfil de velocidades; Relación de caudales r=1; Re=110

r=1.5

Tabla 21: Relación de caudales r=1,5; Re=110

r(Q2/Q3)	1,521
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	176,60
Caudal Q3 (mL/min)	116,06
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	84
Re3	63
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

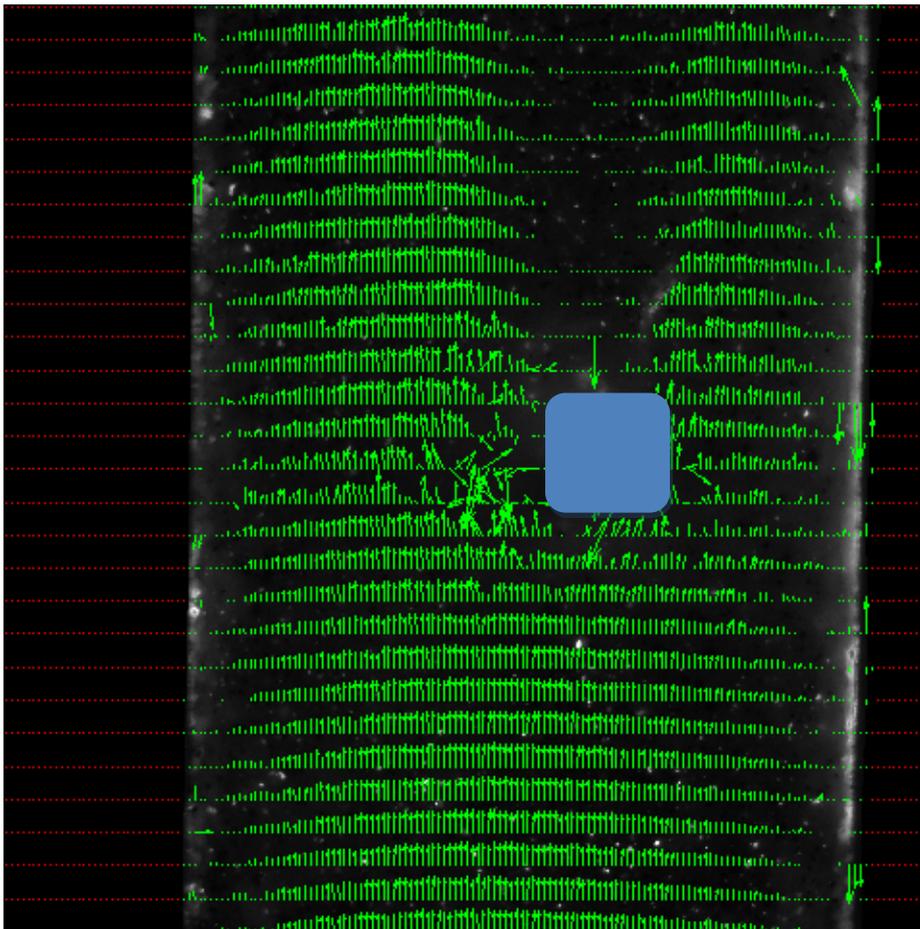


Figura 21: Perfil de velocidades; Relación de caudales r=1,5; Re=110

$r=\infty$

Tabla 22: Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=110$

$r(Q2/Q3)$	$\infty$
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	292,66
Caudal Q3 (mL/min)	0
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	140
Re3	0
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	75
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

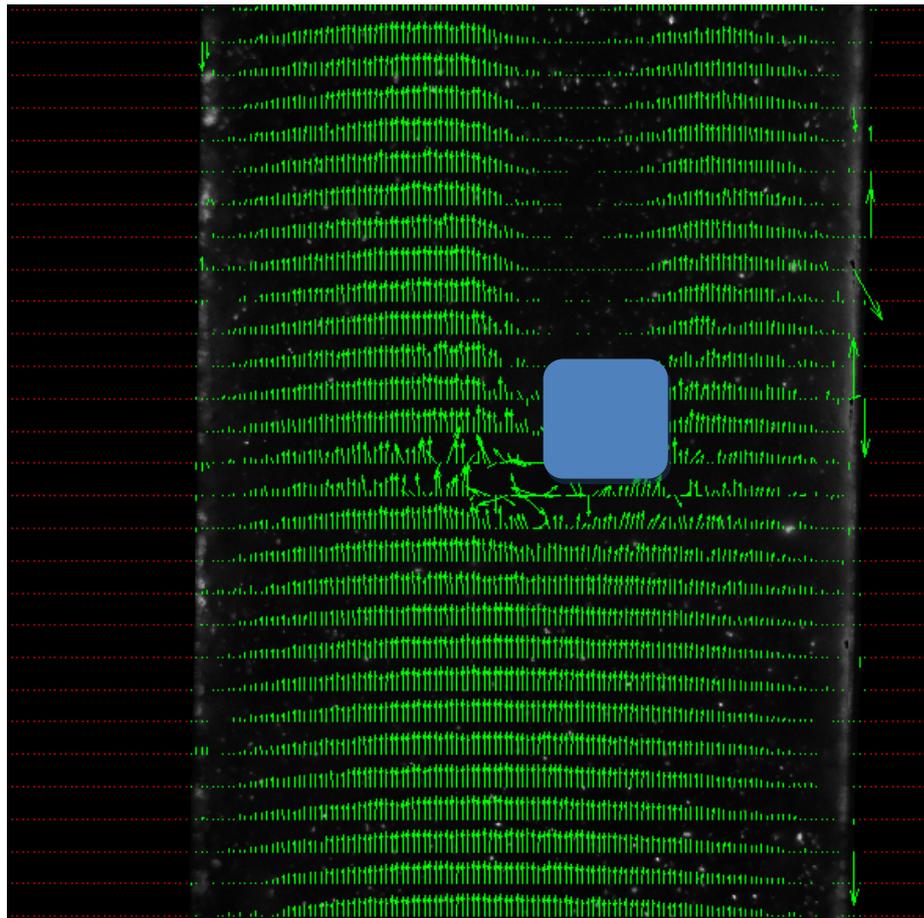


Figura 22: Perfil de velocidades; Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=110$

r=0

Tabla 23: Relación de caudales r=0; Re=110

r(Q2/Q3)	0
Caudal Q1 (mL/min)	292,66
Caudal Q2 (mL/min)	0
Caudal Q3 (mL/min)	292,66
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	110
Re2	0
Re3	159
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	75
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

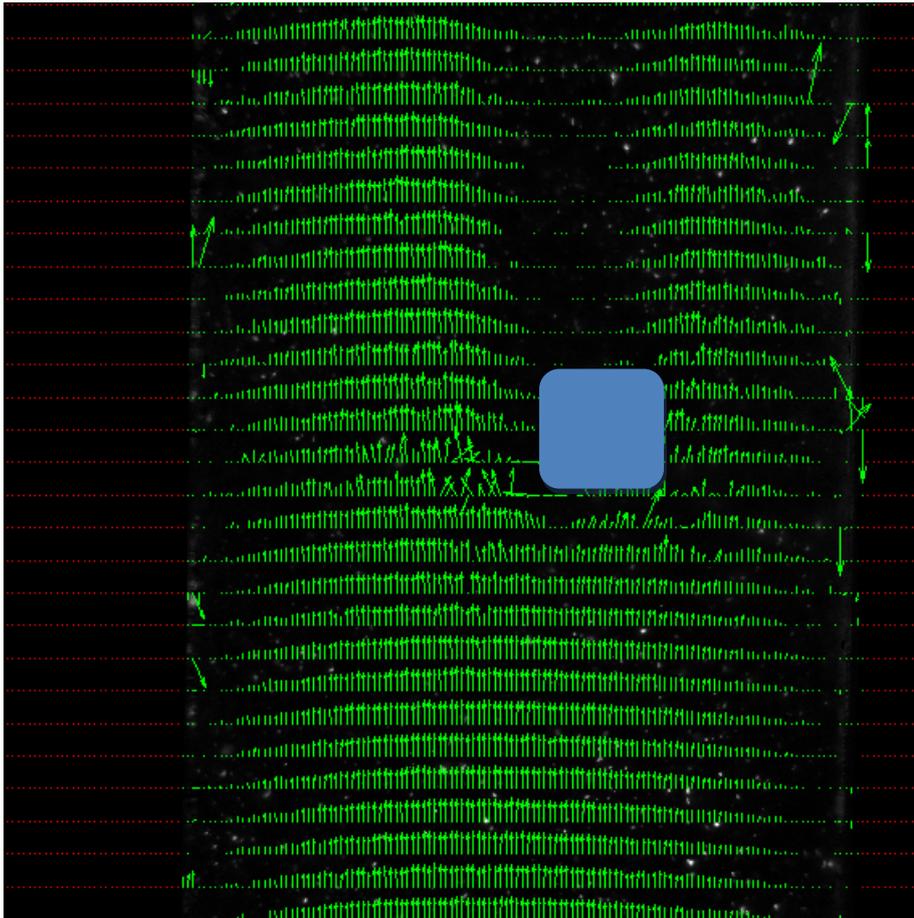


Figura 23: Perfil de velocidades; Relación de caudales r=0; Re=110

4000 rpm:

$r=0,728$

Tabla 24: Relación de caudal  $r=0,728$ ;  $Re=74$

$r(Q2/Q3)$	0,728
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	82,40
Caudal Q3 (mL/min)	113,26
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	39
Re3	61
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	100
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

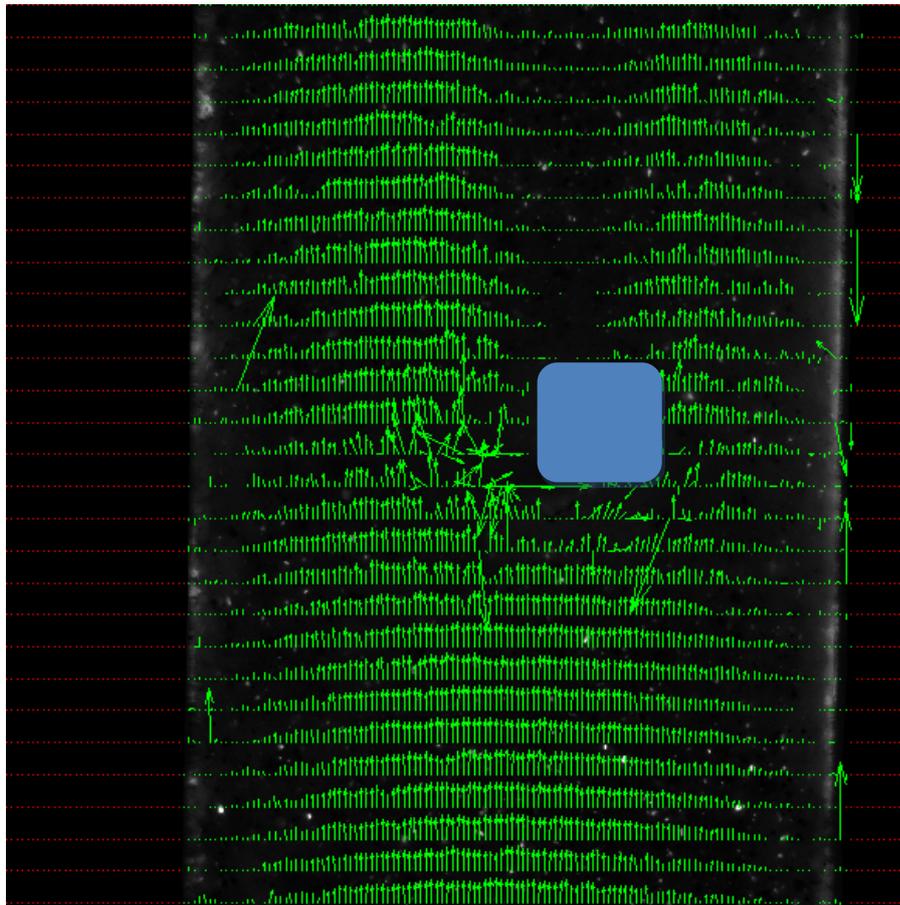


Figura 24: Relación de caudal  $r=0,728$ ;  $Re=74$

$r=0,5$

Tabla 25: Relación de caudales  $r=0.5$ ;  $Re=74$

$r(Q2/Q3)$	0,492
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	64,50
Caudal Q3 (mL/min)	131,16
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	31
Re3	71
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	100
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

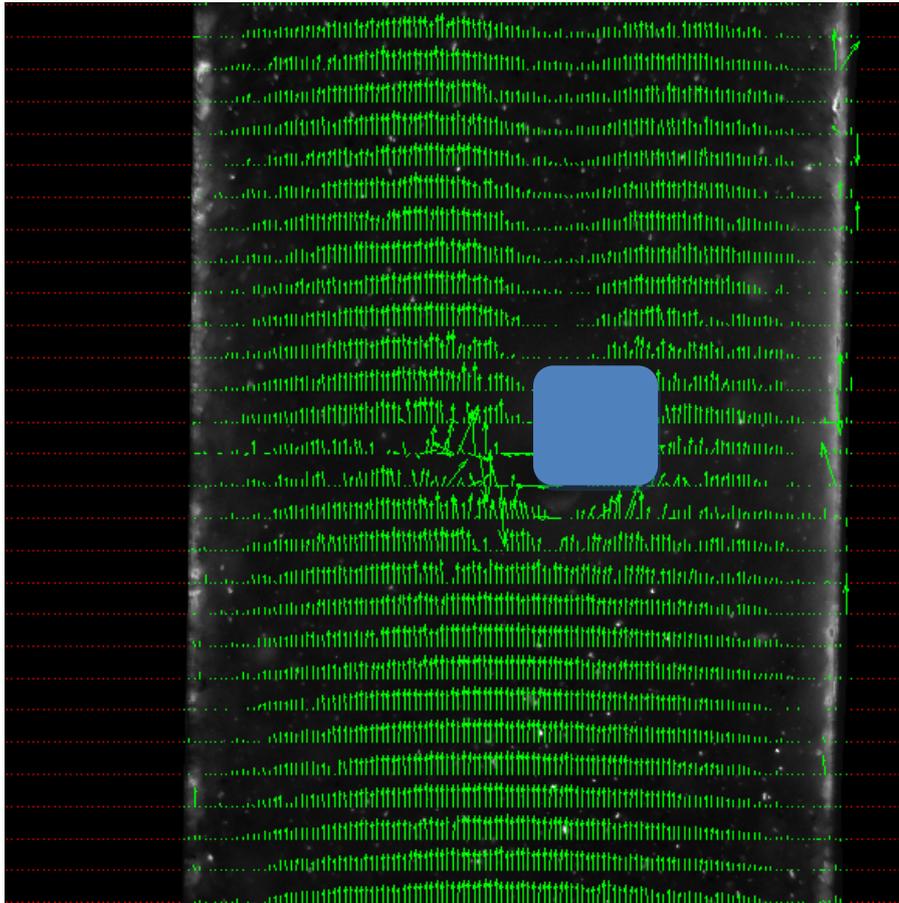


Figura 25: Relación de caudales  $r=0.5$ ;  $Re=74$

r=1

Tabla 26: Relación de caudales r=1; Re=74

r(Q2/Q3)	1,06
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	100,70
Caudal Q3 (mL/min)	94,96
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	48
Re3	51
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	110
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

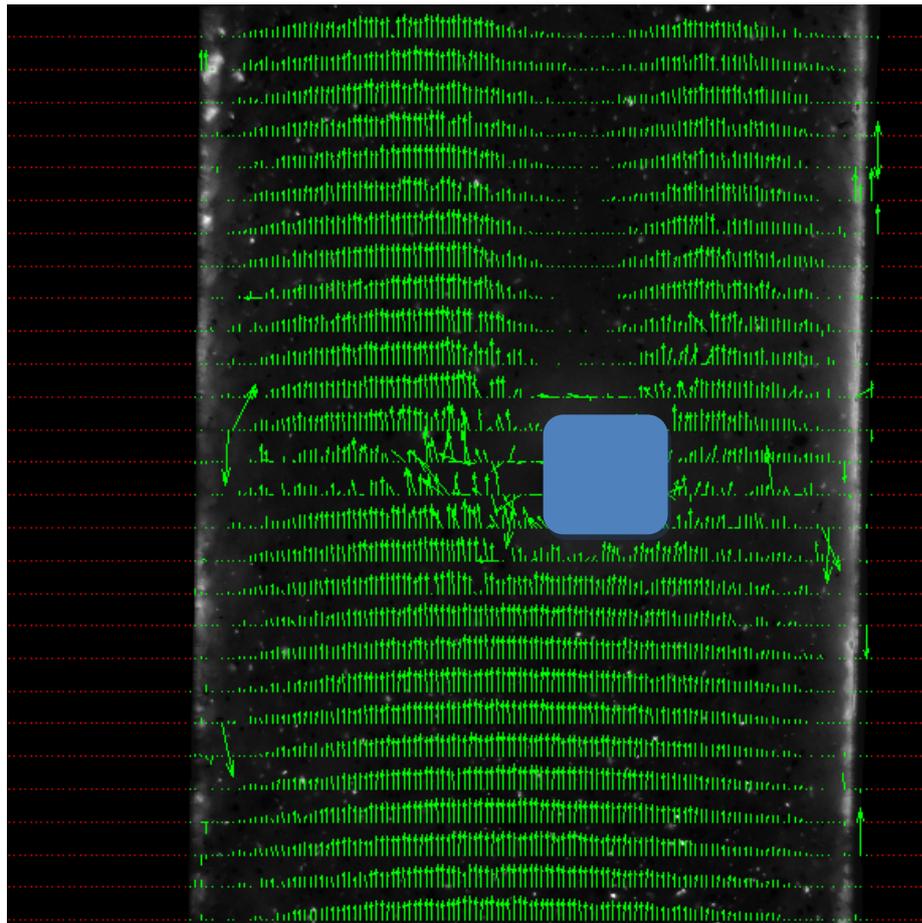


Figura 26: Relación de caudales r=1; Re=74

r=1,5

Tabla 27: Relación de caudales r=1,5; Re=74

r(Q2/Q3)	1,56
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	119,10
Caudal Q3 (mL/min)	76,56
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	57
Re3	41
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	110
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

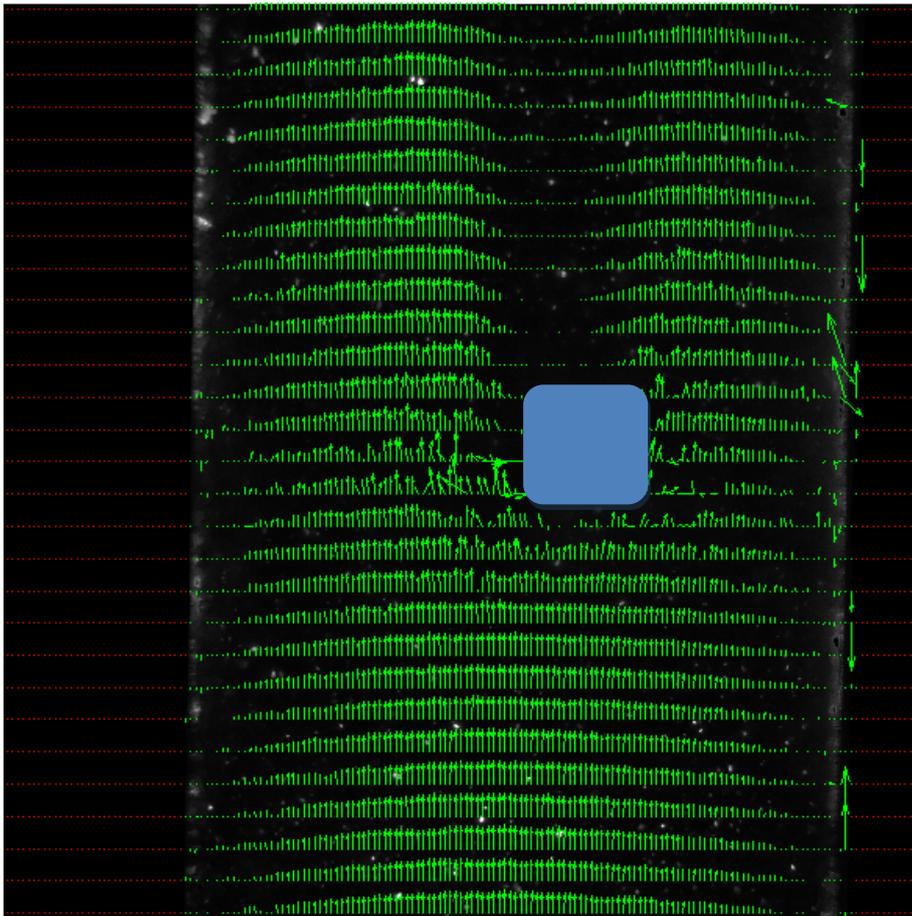


Figura 27: Relación de caudales r=1,5; Re=74

$r=\infty$

Tabla 28: Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=74$

$r(Q2/Q3)$	$\infty$
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	195,66
Caudal Q3 (mL/min)	0
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	94
Re3	0
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	110
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

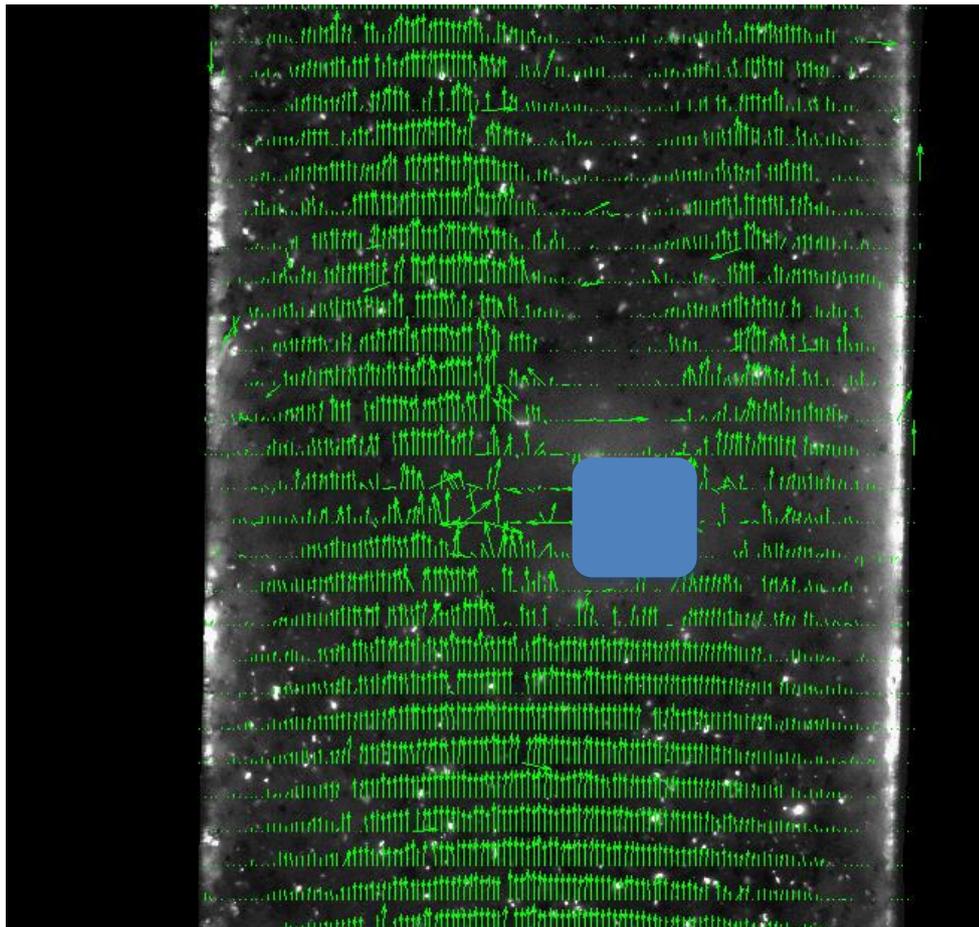


Figura 28: Relación de caudales  $r=\infty$ ;  $Re=74$

r=0

Tabla 29: Relación de caudales r=0; Re=74

r(Q2/Q3)	0
Caudal Q1 (mL/min)	195,66
Caudal Q2 (mL/min)	0
Caudal Q3 (mL/min)	195,66
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	74
Re2	0
Re3	106
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	110
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

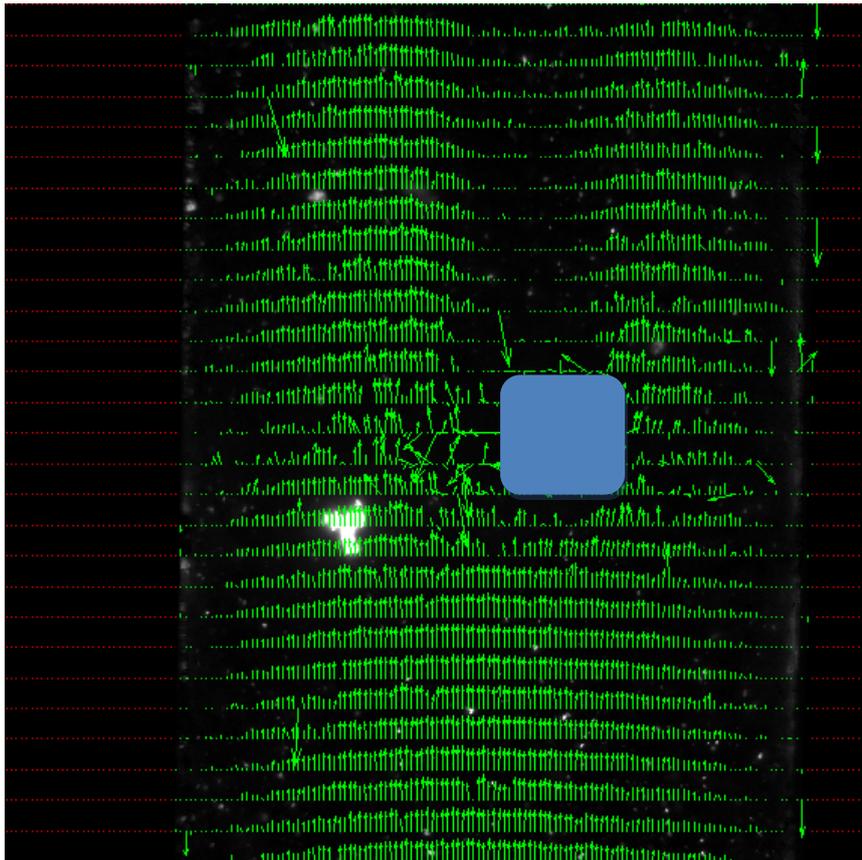


Figura 29: Relación de caudales r=0; Re=74

2000 rpm

$r=0,65$

Tabla 30: Relación de caudales  $r=0.65$ ;  $Re=34$

$r(Q2/Q3)$	0,68
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	36,70
Caudal Q3 (mL/min)	53,96
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	17
Re3	29
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	250
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

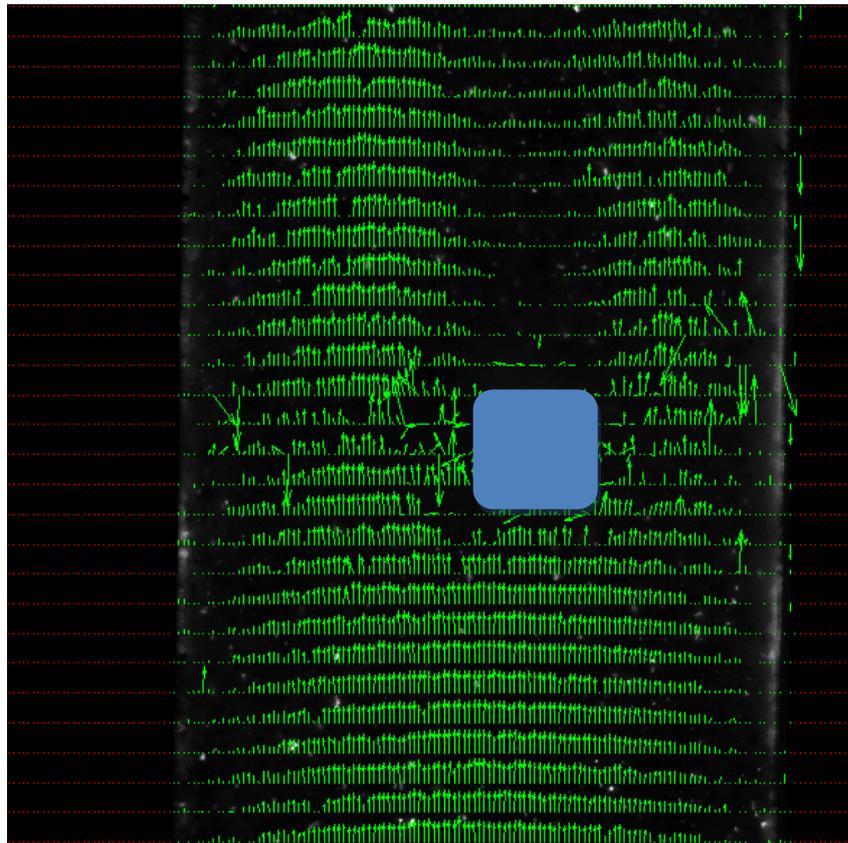


Figura 30: Relación de caudales  $r=0.65$ ;  $Re=34$

$r=0,5$

Tabla 31: Relación de caudales  $r=0,51$ ;  $Re=34$

$r(Q2/Q3)$	0,51
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	30,80
Caudal Q3 (mL/min)	59,86
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	14
Re3	32
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	250
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

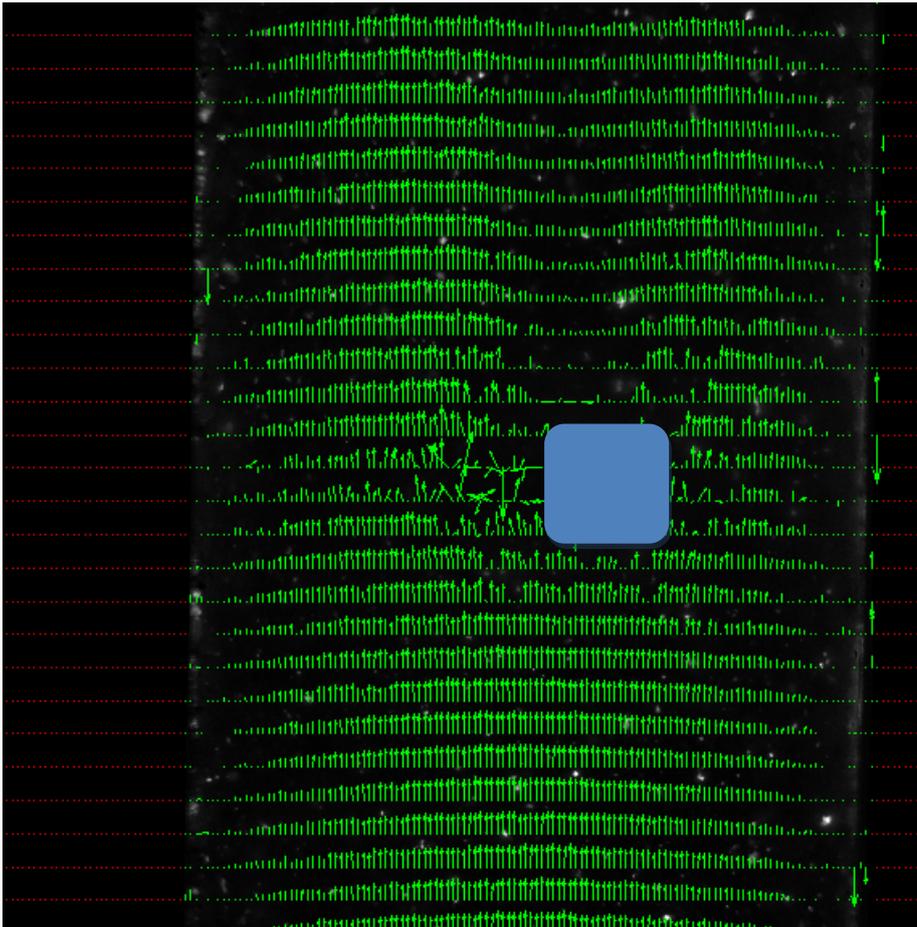


Figura 31: Relación de caudales  $r=0,51$ ;  $Re=34$

r=1

Tabla 32: Relación de caudales r=1; Re=34

r(Q2/Q3)	1,058
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	46,60
Caudal Q3 (mL/min)	44,06
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	22
Re3	23
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	250
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

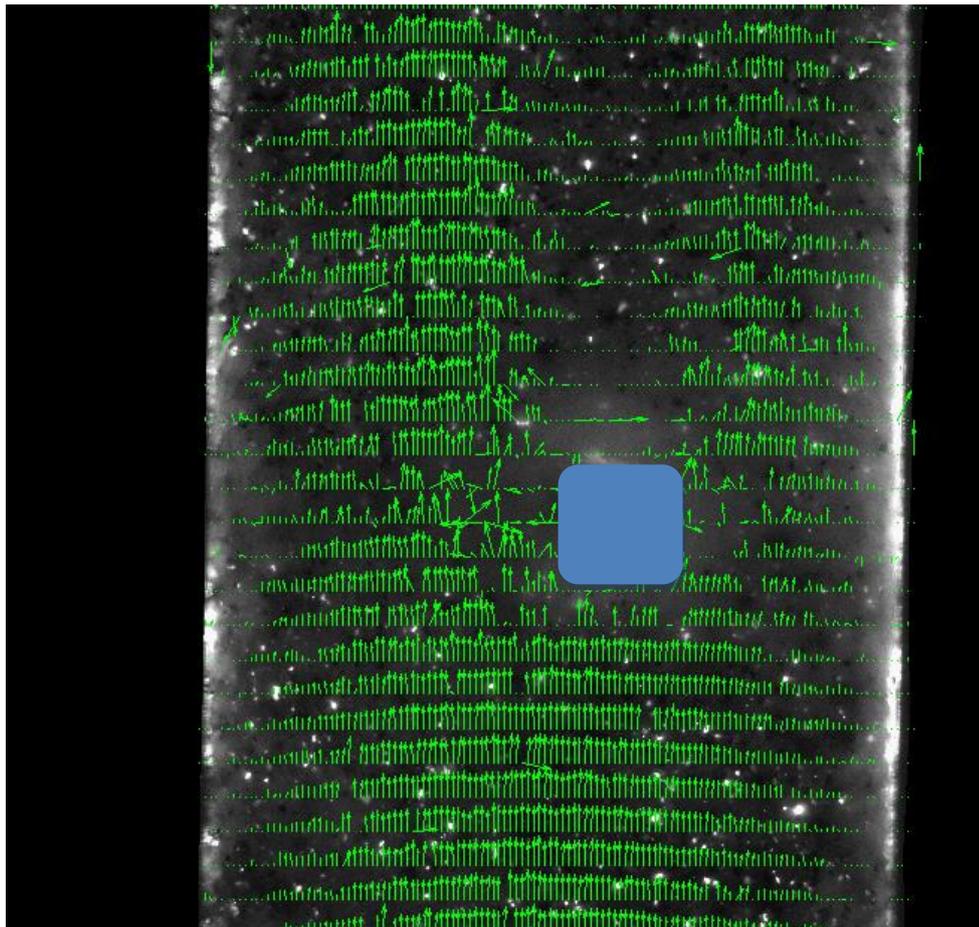


Figura 32: Relación de caudales r=1; Re=34

$r=1,5$

Tabla 33: Relación de caudales  $r=1,5$ ;  $Re=34$

$r(Q2/Q3)$	1,55
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	55,10
Caudal Q3 (mL/min)	35,56
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	26
Re3	19
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu s$ )	250
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

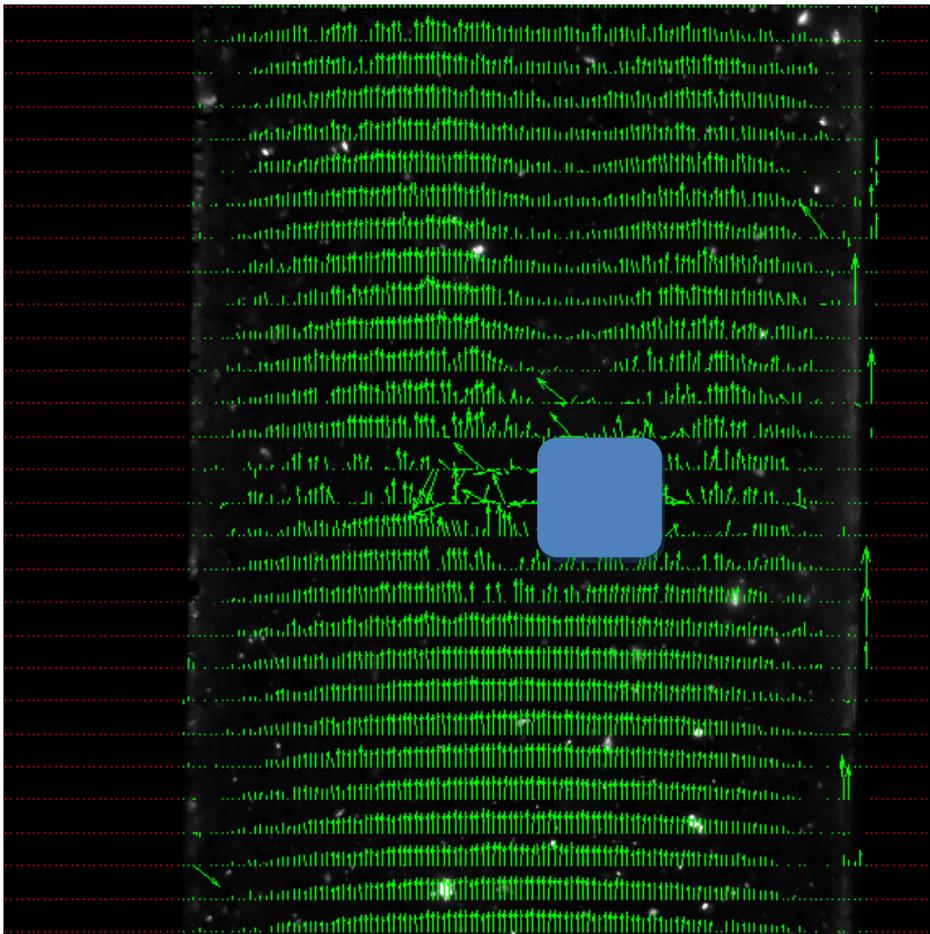


Figura 33: Relación de caudales  $r=1,5$ ;  $Re=34$

$r=\infty$

Tabla 34: Relación de caudales  $r = \infty$ ;  $Re=34$

$r(Q2/Q3)$	$\infty$
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	90,66
Caudal Q3 (mL/min)	0
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	43
Re3	0
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes ( $\mu$ s)	250
Tamaño del area de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del area de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

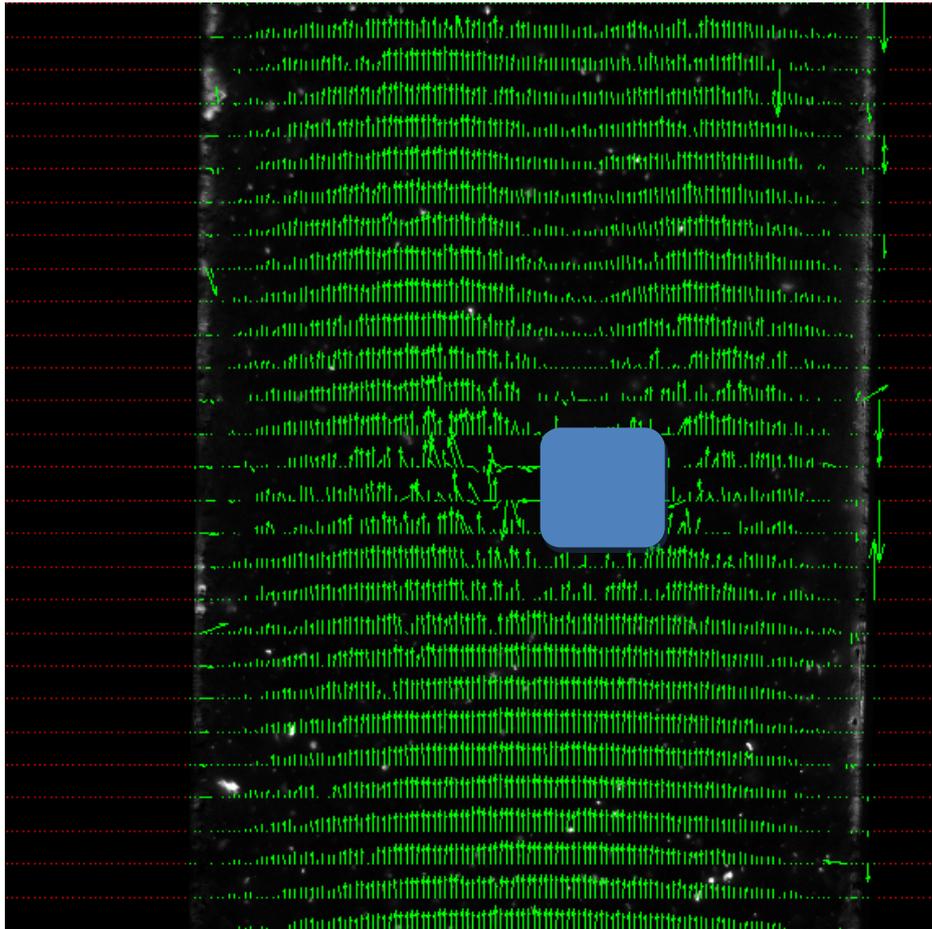


Figura 34: Relación de caudales  $r = \infty$ ;  $Re=34$

r=0

Tabla 35: Relación de caudales r=0; Re=34

r(Q2/Q3)	0
Caudal Q1 (mL/min)	90,66
Caudal Q2 (mL/min)	0
Caudal Q3 (mL/min)	90,66
Diámetro tubo 1 (mm)	6,6
Diámetro tubo 2 (mm)	5,2
Diámetro tubo 3 (mm)	4,6
Re1	34
Re2	0
Re3	49
Temperatura (°C)	24
Factor de escala	0,616
Tiempo entre imágenes (μs)	250
Tamaño del área de interrogación (pix.)	16 x 32
Tamaño del área de interrogación (mm)	0,09 x 0,18
Overlap (%)	25

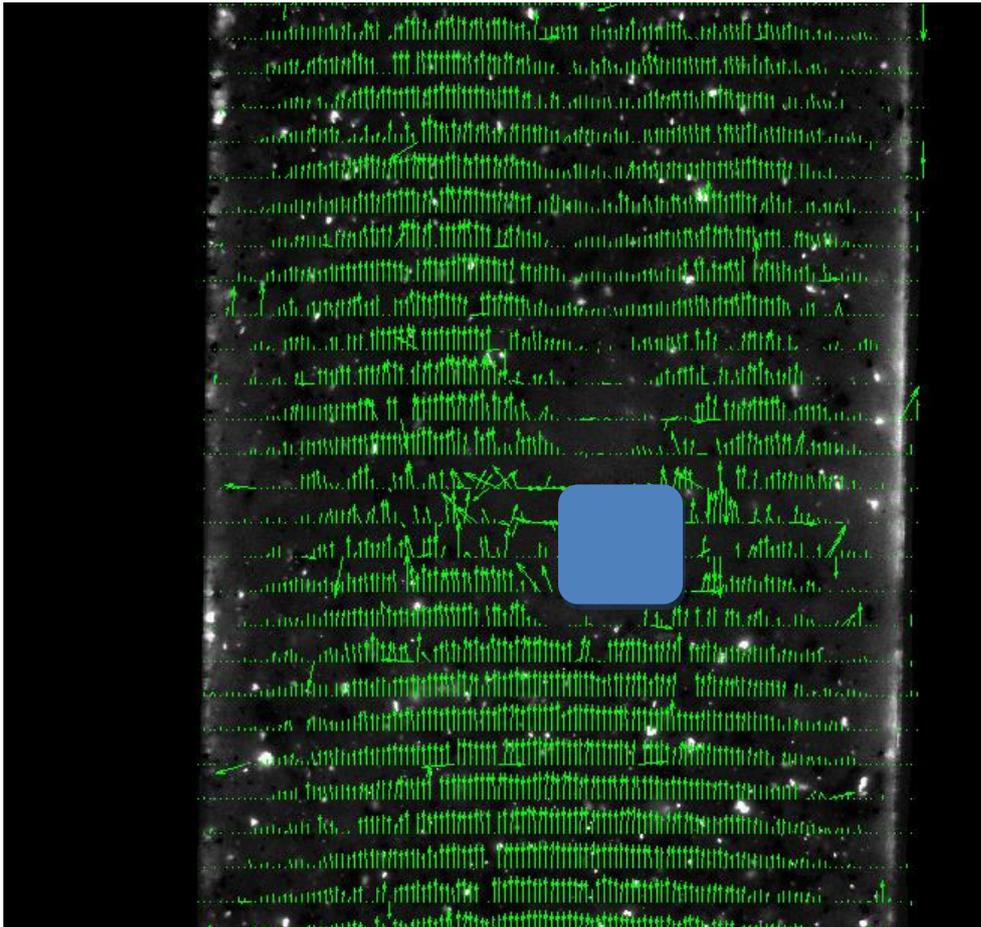


Figura 35: Relación de caudales r=0; Re=34