

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"ESTUDIO DE REACTORES DE FLUJO  
OSCILATORIO POR MEDIO DE LA  
VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE  
PARTÍCULAS"

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre -  
2021

AUTOR: Jesús Corella García

DIRECTOR: Damián Crespí Llorens



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"ESTUDIO DE REACTORES DE FLUJO  
OSCILATORIO POR MEDIO DE LA  
VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE  
PARTÍCULAS"

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre -  
2021

AUTOR: Jesús Corella García

DIRECTOR: Damián Crespí Llorens



# ESTUDIO DE REACTORES DE FLUJO OSCILATORIO POR MEDIO DE LA VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS

## RESUMEN

En este Trabajo Final de Grado se realiza un estudio de los patrones de flujo de los reactores de flujo oscilatorio. Estos dispositivos están formados por un equipo tubular, por el que discurre un flujo continuo, en el que se introduce una geometría cuyo fin es mejorar el mezclado, a todo esto, se le añade la superposición de un flujo oscilatorio. Esta geometría está formada por una serie de deflectores multiorificio equidistantes entre ellos.

La combinación de la geometría y la superposición de flujos tiene como objetivo la mejora de la transferencia de calor y del mezclado radial, para con ello poder trabajar con caudales netos bajos, siendo estos de carácter laminar, y al mismo tiempo conseguir coeficientes de transferencia de calor y mezclados característicos de un flujo turbulento. La principal aplicación de estos dispositivos es en el ámbito de reacciones químicas cuyo tiempo de residencia es alto, esta aplicación impone caudales netos bajos y sin estos reactores el tamaño de la instalación la haría inviable.

Los patrones de flujo han sido estudiados de forma experimental debido a su complejidad, la técnica seleccionada ha sido la Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV de sus siglas en inglés). Los ensayos realizados con esta técnica han permitido estudiar el comportamiento del flujo para diferentes condiciones de funcionamiento en flujo neto, oscilatorio y ambos flujos combinados.

Estos datos extraídos del comportamiento del flujo podrían ser utilizados en futuros trabajos con el fin de validar un modelo teórico que cumpla con las condiciones en este trabajo estudiadas.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Introducción a los reactores de flujo oscilatorio .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Estado del arte .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Objetivos del proyecto .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Descripción de la memoria .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 2. MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Instalación utilizada.....</b>	<b>13</b>
2.1.1 Descripción general .....	13
2.1.2 Consideraciones de funcionamiento .....	17
2.1.2.1 Centralita hidráulica .....	18
2.1.2.2 Fluido .....	18
2.1.2.3 Partículas .....	19
2.1.2.4 Cámara MotionScope M3.....	19
2.1.2.5 Software de adquisición .....	20
2.1.2.6 Sensores e instrumentos de medida .....	21
2.1.2.7 Láser Oxford Laser-HSI 5000 .....	22
<b>2.2 Adquisición de datos .....</b>	<b>22</b>
2.2.1 Geometría estudiada .....	23
2.2.1 Adquisición de datos del flujo neto .....	24
2.2.2 Adquisición de datos del flujo oscilatorio .....	24
2.2.3 Adquisición de datos del flujo combinado .....	25
<b>2.3 Tratamiento de las imágenes adquiridas .....</b>	<b>25</b>
2.3.1 Preprocesado de las imágenes .....	26
2.3.2 Procesado de las imágenes con PIVlab .....	27
2.3.3 Posprocesado de las imágenes.....	30
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Resultado obtenidos en el flujo neto .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Resultados obtenidos en el flujo oscilatorio .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Resultados obtenidos en el flujo compuesto .....</b>	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO 5. ANEXOS .....</b>	<b>55</b>
<b>CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>79</b>

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

En este capítulo se resumirá y dará una primera idea de lo que va a tratar el presente trabajo, se definirán los objetivos de este y se proporcionará una breve descripción de cada una de las partes que lo conforman.

## 1.1 Introducción a los reactores de flujo oscilatorio

El flujo oscilatorio como método para la mejora de la transferencia de masa comienza en la década de los 40 y 50 cuando en la industria nuclear, con el uso de columnas empaquetadas o con deflectores, se hacía oscilar el fluido contenido con el objetivo de mejorar de forma significativa los coeficientes de transporte respecto a las columnas convencionales operando en contracorriente.

Es entonces en los años 80 cuando surgen nuevos diseños de reactores de flujo oscilatorio (llamados a partir de ahora OBR *Oscillatory Baffled Reactor* del inglés) en cuyo interior se encuentran una serie de deflectores espaciados a igual distancia a lo largo de una sección tubular con un flujo neto que está superpuesto a un flujo oscilatorio. Los OBRs aparecen como respuesta a una problemática presentada por los reactores tubulares y los tanques agitadores convencionales: el pobre mezclado radial e ineficiente capacidad de transferencia de calor y masa en los tubulares; y la dificultad de escalado, elevado volumen necesario y dificultad de controlar la transferencia de calor en los tanques agitadores convencionales.

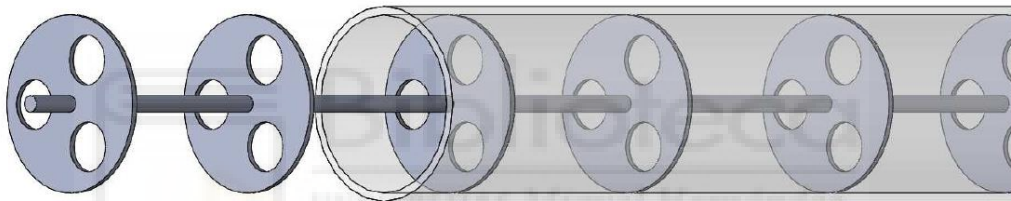
La oscilación del flujo se suele conseguir empleando elementos mecánicos que generan un movimiento alternativo, lo cual genera un desplazamiento senoidal cuya velocidad promedio sería cero. La posición y velocidad serían descritas por las ecuaciones del movimiento ondulatorio.

La solución constructiva empleada en la instalación para la realización de los ensayos de este trabajo consiste en hacer que el caudal pase por un cilindro en el cual, un pistón de doble efecto con un movimiento de vaivén generado por un mecanismo biela-manivela hace oscilar el flujo. Se ha optado por la solución más habitual, aunque se pueden encontrar otro tipo de soluciones, como la utilización de un diafragma con un oscilador electromagnético para generar el movimiento buscado en el flujo.

Hay numerosos tipos de geometrías utilizadas como deflectores en los OBRs siendo algunos los deflectores de un orificio, deflectores multiorificio, helicoidales, centrales... En el presente trabajo se ha seleccionado la geometría multiorificio como solución para los deflectores equiespaciados y así promover el desprendimiento del flujo, la aparición de vórtices y el adelantamiento de la turbulencia

Con motivo de mejorar el intercambio de calor en reactores químicos, en los cuales el tiempo de reacción es importante y por lo tanto el mezclado de los componentes presentes en la reacción, se ha realizado un estudio del comportamiento de un flujo de agua con partículas de densidad similar a esta, por un tubo a través de deflectores con tres orificios circulares separados a igual distancia. El experimento se ha realizado para los deflectores con los agujeros alineados (Fig. 1a) y para los deflectores con los agujeros alternados (Fig. 1b). [1]

a)



b)

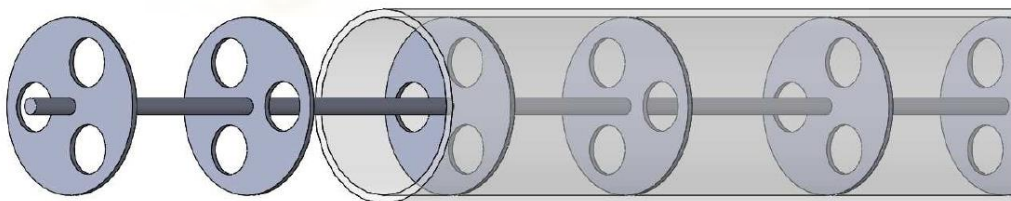


Fig. 1. a) Deflectores alineados. b) Deflectores desalineados.

## 1.2 Estado del arte

En esta sección se exponen trabajos que se han utilizado para dar sentido a algunos de los parámetros seleccionados en los ensayos que trata este proyecto, como algunas de las dimensiones de las geometrías, frecuencias de oscilación o números adimensionales, para ello se tratarán trabajos relacionados con los siguientes temas: transporte de especies en los reactores, escalabilidad de estos, sus patrones de flujo y la transferencia de calor.



Los trabajos de transporte de especies se orientan al estudio de la dispersión axial, estos estudios señalan la importancia de los OBRs para conducir reacciones químicas con un alto tiempo de residencia.

El estudio realizado por Ni et al. [2] evaluaba las dimensiones geométricas óptimas para un flujo oscilatorio operando de forma continua, tanto con fluido oscilatorio como con deflectores oscilatorios, se estudió el espaciado entre deflectores, la fracción de área de paso de los deflectores y el espesor de los deflectores.

Tabla 1. Parámetros óptimos de los OBRs. Siendo  $D$  el diámetro del tubo.

Parámetros de la geometría	Fluido oscilante	Deflectores oscilantes
Relación de área de paso	20-22%	20-22%
Separación entre deflectores	2 $D$	1,8 $D$
Espesor de los deflectores	2-3 mm	2-3 mm

Los estudios de Stonestreet y van der Veecken [3] sobre la distribución del tiempo de residencia que es el tiempo que permanece el fluido en un reactor de flujo oscilatorio concluyeron que, para varios números de Reynolds neto, la relación de velocidades más adecuada,  $\Psi$ , para mejorar el mezclado se encontraba en  $2 < \Psi < 4$ .

En lo referente a la escalabilidad, en un OBR puede realizarse de forma lineal si se mantienen los números de Strouhal (3) y el número de Reynolds oscilatorio (4).

$$St = \frac{D}{4\pi x_0} \quad (1)$$

$$Re_{osc} = \frac{\rho 2\pi f x_0 D^2}{\mu} \quad (2)$$

Por lo tanto, la amplitud de la oscilación vendría fijada por la siguiente ecuación:

$$x_0 = \frac{D}{4\pi St} \quad (3)$$

Se puede ver que la amplitud varía proporcionalmente con el diámetro, si se sustituye la amplitud en el número de Reynolds y se despeja para obtener la frecuencia, el resultado es el siguiente:

$$f = \frac{4\pi \mu}{\rho 2\pi D^2} St Re_{osc} \quad (4)$$

Se puede ver que esta disminuye con el cuadrado del diámetro, lo que significa que, en equipos grandes, la frecuencia podría ser insuficiente para proporcionar un buen mezclado.

El autor Smith [4], desarrolló, para poner solución a esta problemática, los reactores con deflectores multiorificio, concluyendo que un deflector con varios orificios se comporta de forma equivalente a uno con un único orificio de diámetro  $D_{eq}$ , y siendo  $n_0$  el número de orificios del deflector:

$$D_{eq} = \frac{D}{\sqrt{n_0}} \quad (5)$$

En lo referido a los patrones de flujo, los estudios han sido orientados a buscar el mezclado radial y la influencia de las condiciones de trabajo en la asimetría del flujo y la aparición de un flujo caótico.

Cabría destacar el estudio de Brunold et al. [5], en el cual ensayan tubos circulares con deflectores sometidos a flujo oscilatorio. Ensayaron diferentes espaciados entre los deflectores, y concluyeron que el óptimo es  $l = 1,5 \cdot D$ .

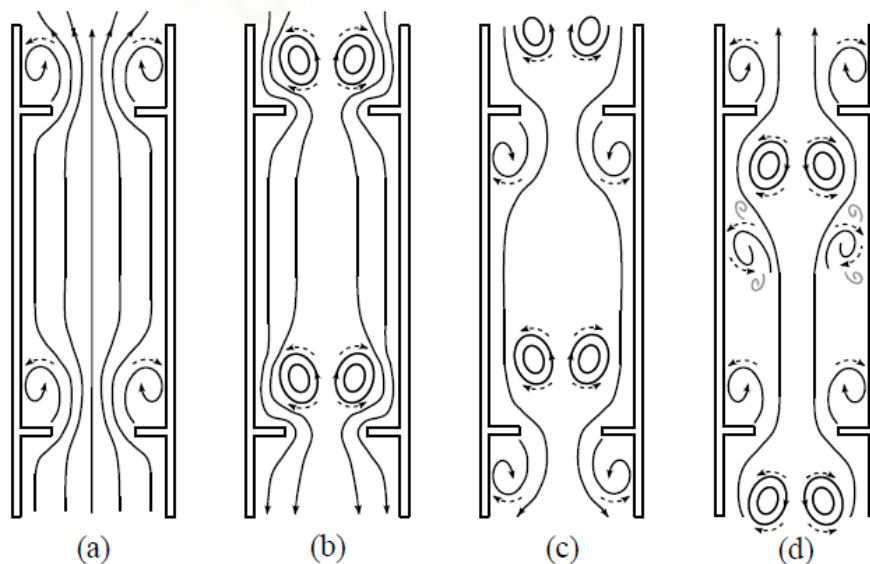


Fig. 2. Formación de vórtices en los semiciclos de la oscilación [5].

Los autores Mackay et al. [6] determinaron que para el rango de números de Strouhal  $0,3 < St < 2$  y un número de Reynolds oscilatorio del orden de 200 el flujo se vuelve asimétrico.

En cuanto a la transferencia de calor en OBRs, Macklet et al. [7] llegaron a dos conclusiones con sus ensayos con deflectores uniorificio frente a un tubo sin deflectores:

1. En régimen estacionario, los deflectores mejoran la transferencia de calor.
2. En régimen oscilatorio, los deflectores suponen una mejora significativa de la transferencia de calor.

### 1.3 Objetivos del proyecto

Como objetivo principal de este y futuros trabajos similares a este, tenemos la búsqueda de una geometría que permita al fluido que la atraviesa transferir la mayor cantidad de calor a la vez que tenemos la menor pérdida de carga posible. Permitirá la validación de simulaciones futuras con las mismas condiciones a las que se ve sometido este estudio, o incluso justificar estudios de pérdida de carga y transferencia de calor.

Primero se comprobará el correcto funcionamiento de la instalación de visualización del laboratorio de Máquinas y motores térmicos del edificio Innova, para proceder después con la visualización por *velocimetría de imágenes de partículas (PIV)* [8].

Este trabajo, que pretende estudiar el funcionamiento de la geometría de tres agujeros equidistantes colocadas tanto de forma alineada como alternada, se basa en la necesidad de maximizar el mezclado de dos componentes obteniendo una transferencia de calor independiente del caudal neto, un diseño de tamaño reducido y la capacidad de escalar de forma lineal. Los ensayos se dividen en dos grandes grupos: los ensayos con la geometría alineada y los ensayos con la geometría alternada; cada tipo de ensayo a su vez tiene que realizarse con tres tipos de flujo, el neto, el oscilatorio y el combinado que es mezcla de los dos anteriores; y, por último, los datos de cada flujo se adquieren con parámetros distintos dando resultado tres puntos de los cuales tomar datos.

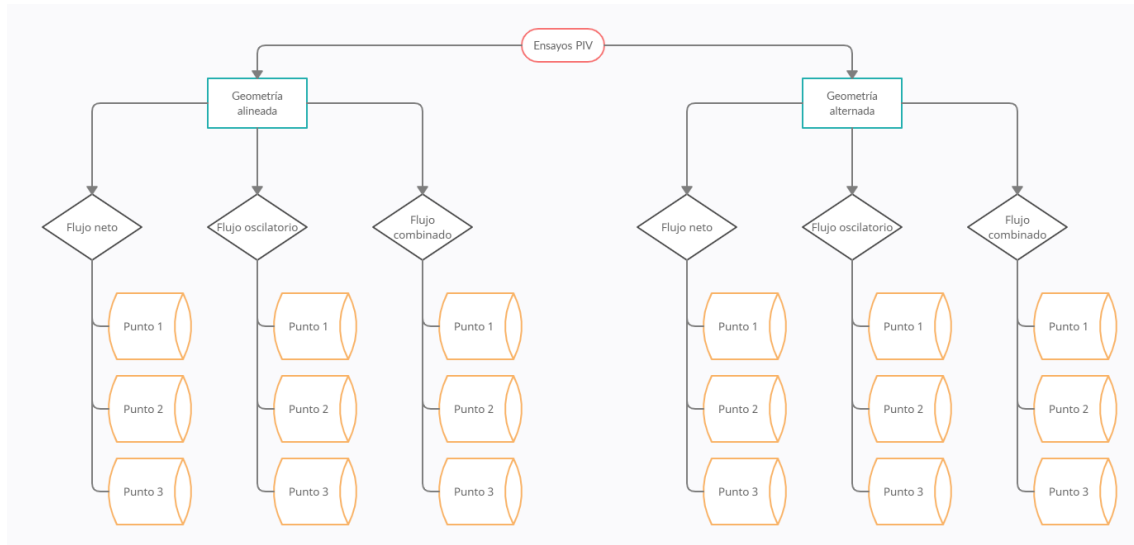


Fig. 3. Diagrama resumen de todos los ensayos realizados.

## 1.4 Descripción de la memoria

Este Trabajo Final de Grado se compone de 6 capítulos. El Capítulo 1 compone la introducción como indica su nombre. El Capítulo 2 trata los materiales y métodos utilizados en la toma de datos, trata tanto los elementos y materiales utilizados en la instalación como las técnicas utilizadas para tomar y procesar todos los datos obtenidos. El Capítulo 3 comenta los resultados obtenidos en cada ensayo, explica cómo se han obtenido esos resultados y trata el significado de cada uno. El Capítulo 4 explica las conclusiones a las que hemos llegado a través del estudio de los resultados obtenidos en los experimentos. El capítulo 5 es un Anexo donde estará toda la información adicional relativa tanto a la toma de datos, a los propios datos y al procesado de estos, como datos adicionales o código del programa utilizado en Matlab y, por último, el capítulo 6 es la bibliografía utilizada en el trabajo.

# CAPÍTULO 2. MATERIAL Y MÉTODOS

---

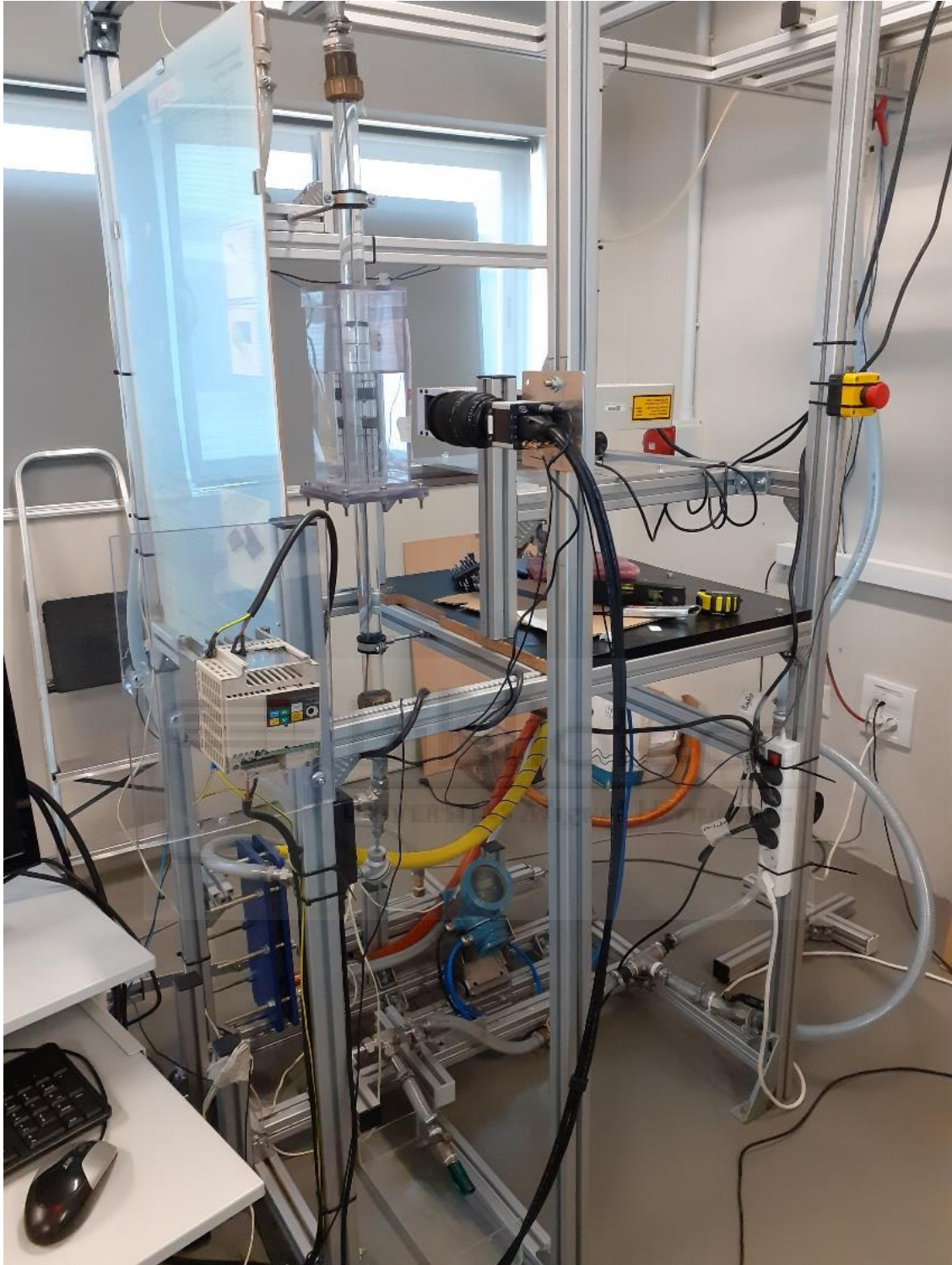
## 2.1 Instalación utilizada

La instalación utilizada para la visualización del fluido en el interior del reactor se encuentra en el laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos del edificio Innova de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

A continuación, se mostrarán las partes de la instalación y se describirá de forma general el circuito que sigue el fluido por la misma, deteniéndose posteriormente para realizar una explicación pormenorizada en las partes de la instalación que lo requieran, así mismo, también se explicarán las consideraciones para un funcionamiento correcto de la instalación.

### 2.1.1 Descripción general

En las figuras podemos ver cada una de las partes del sistema de visualización utilizado. En la Fig. 4 podemos ver como la instalación estaba montada en el laboratorio, se pueden apreciar cada una de las partes que después serán indicadas y brevemente comentadas en un esquema para mayor claridad.



*Fig. 4. Instalación en el laboratorio de máquinas y motores térmicos de la UMH campus de Elche.*

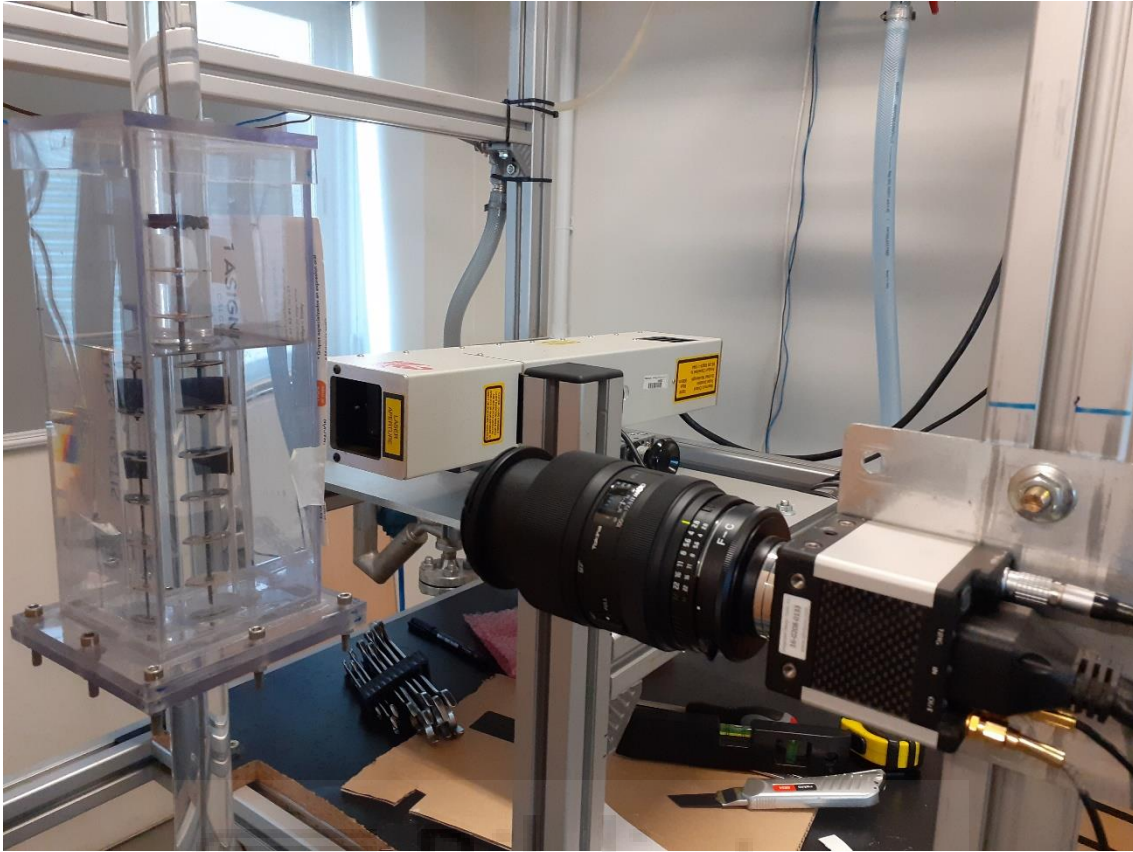


Fig. 5. Cámara con objetivo, láser y volumen de control de la instalación.

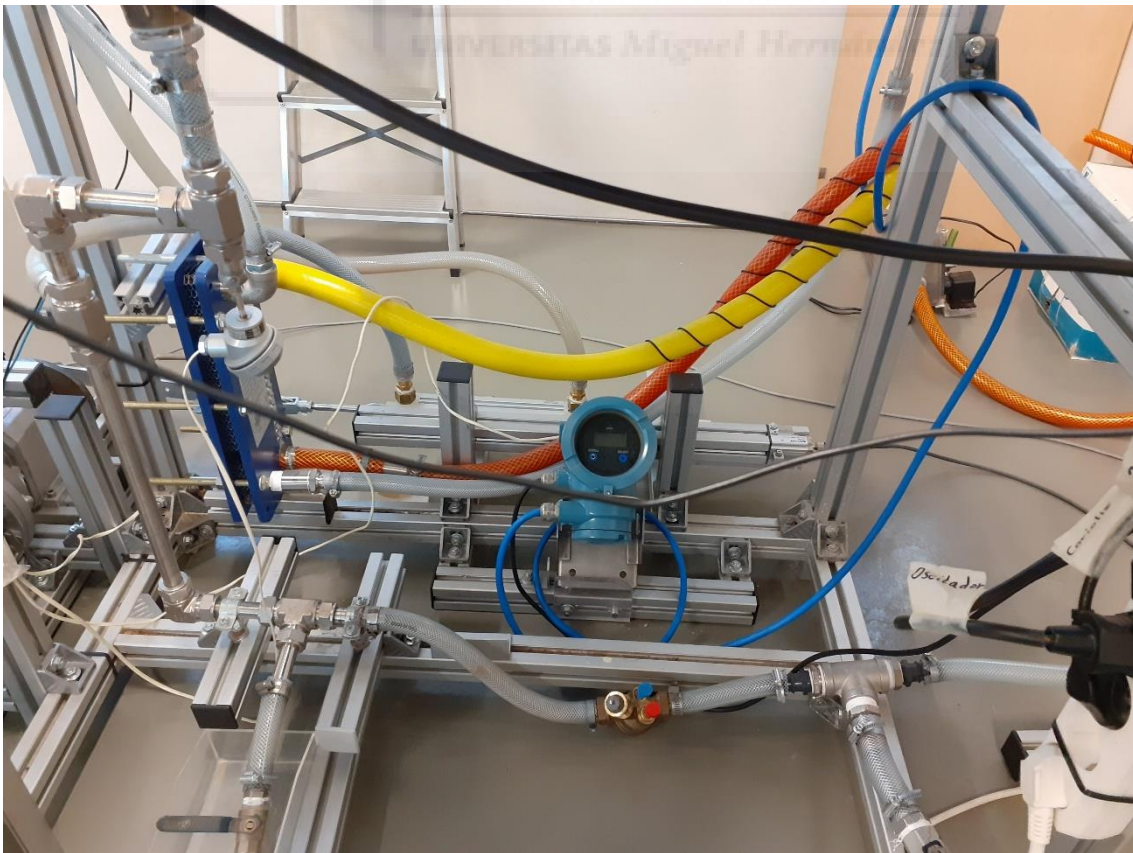
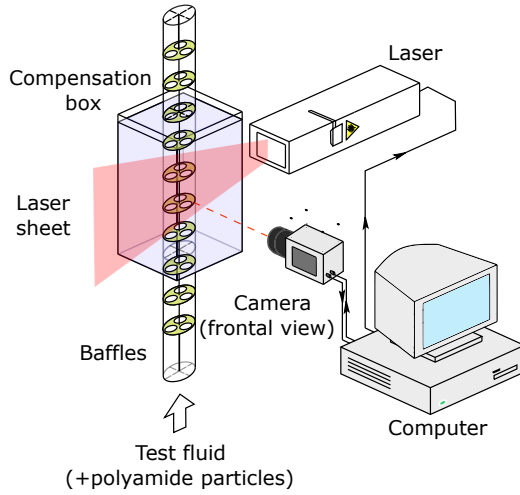


Fig. 6. Intercambiador de calor, caudalímetro y oscilador de la instalación.

En el apartado a) de la Fig. 7 se puede observar todo el circuito [9] y en el apartado b) un detalle de la zona de visualización. Estas son cada una de las partes del circuito:

(b) Particle Image Velocimetry



(a)

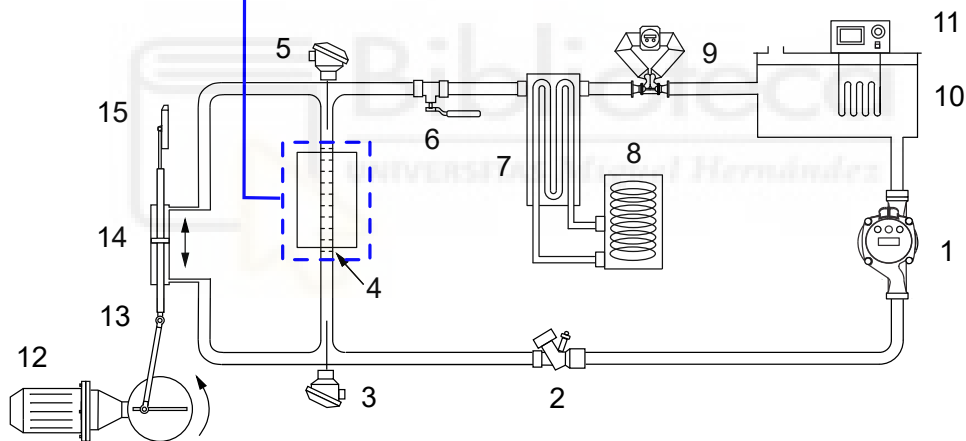


Fig. 7. Esquema de la instalación.

1. Bomba centrífuga
2. Válvula de control de caudal
3. Entrada PT100
4. Volumen de control
5. Salida PT100
6. Válvula manual
7. Intercambiador de calor



8. Enfriador
9. Caudalímetro de Coriolis
10. Tanque de reserva
11. Calentador eléctrico
12. Motor-reductora eléctrico
13. Biela-manivela
14. Cilindro hidráulico
15. Sensor de posición magnetostrictiva

El fluido sale del tanque de reserva absorbido por la bomba centrífuga e impulsado a través de la válvula de control con la que, junto con la válvula manual, podremos regular el caudal neto que llega hasta el volumen de control, como se puede apreciar hay una bifurcación, un camino llega al volumen de control y el otro pasa al cilindro hidráulico el cual genera un flujo oscilatorio si el motor está encendido, esta parte del circuito es la que nos permite los tres modos de flujo: neto, oscilatorio y combinado. El intercambiador de calor nos permite devolver el fluido al tanque de reserva a una temperatura inferior para que no se caliente continuamente y podamos controlar más fácilmente la temperatura, por último, llegamos al tanque de reserva don vuelve a comenzar el ciclo.

La Fig. 7b) es un detalle del volumen de control y de la estación de medida, el fluido de prueba entra por la parte inferior del tubo, en cuyo interior se encuentra nuestra geometría de estudio y la atraviesa, pasando por una caja la cual está llena de agua, esto nos sirve para igualar los índices de refracción, pero de la cámara, no del láser, ya que el láser estaría bien alineado, para eso se llena todo de líquido teniendo una superficie plana con la caja. El láser está conectado a la cámara, esto se hace así, para sincronizar los pulsos del láser con la frecuencia de disparo de la cámara, una vez tomadas las imágenes se envían al ordenador las cuales son recibidas por una tarjeta de adquisición de datos y almacenadas en el disco duro de este.

### **2.1.2 Consideraciones de funcionamiento**

- La regulación del caudal que circula por la instalación se realiza mediante la acción de las 2 válvulas que hay en el montaje y del variador de velocidad de la bomba, aunque este último es preferible que trabaje a velocidad constante y operar

siempre con las válvulas. Una vez establecida la bomba a la velocidad nominal, se utilizan las dos válvulas para alcanzar de forma más precisa el caudal que se busca, utilizando la válvula de control de caudal (2) para que el caudal se acerque al objetivo y luego la válvula manual (6) para terminar de conseguir el caudal requerido cerrando ambas muy lentamente.

- La temperatura de la instalación se regula con un baño térmico situado en la parte superior de esta para calentar el agua a la entrada del circuito y un intercambiador de calor con un enfriador al final del circuito. La máxima temperatura para la instalación eran 40°C, pero no se llegaron a hacer ensayos con esa temperatura debido a los problemas derivados de manejar agua caliente.
- El vaciado de la instalación se realiza a través de una salida ubicada antes de llegar al recinto de control siguiendo la dirección del flujo, lo ideal sería no vaciar la instalación, pero es inevitable debido a los problemas que puedan surgir de cualquier índole, la inactividad por un periodo prolongado de tiempo de la instalación provoca que se depositen partículas haciendo que la visualización se vea perjudicada y dando así unos resultados inaceptables.

#### **2.1.2.1 Centralita hidráulica**

Para simplificar la instalación, en vez de buscar la oscilación de la geometría se ha buscado la oscilación del fluido que la atraviesa, esto se consigue haciéndolo pasar por un cilindro hidráulico el cual, conectado a un motor eléctrico con una reductora y una biela-manivela, genera un movimiento que hace oscilar el pistón del cilindro para producir así la oscilación del fluido, la frecuencia de oscilación se puede variar gracias al variador de frecuencia al cual el motor está conectado.

#### **2.1.2.2 Fluido**

A continuación, se exponen las características de viscosidad del fluido que se utilizará en la instalación para la realización de los experimentos, en este caso agua. El agua se introduce en la instalación a la temperatura de 20°C.

Tabla 2. Propiedades físicas del agua dependiendo de la temperatura. Densidad  $\rho$ , viscosidad dinámica  $\mu$  y viscosidad cinemática  $\nu$  [9].

Physical Properties of Fluids 771

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$\mu, \text{N} \cdot \text{s/m}^2$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$T, ^\circ\text{F}$	$\rho, \text{slug/ft}^3$	$\mu, \text{lb} \cdot \text{s/ft}^2$	$\nu, \text{ft}^2/\text{s}$
0	1000	1.788 E-3	1.788 E-6	32	1.940	3.73 E-5	1.925 E-5
10	1000	1.307 E-3	1.307 E-6	50	1.940	2.73 E-5	1.407 E-5
20	998	1.003 E-3	1.005 E-6	68	1.937	2.09 E-5	1.082 E-5
30	996	0.799 E-3	0.802 E-6	86	1.932	1.67 E-5	0.864 E-5
40	992	0.657 E-3	0.662 E-6	104	1.925	1.37 E-5	0.713 E-5
50	988	0.548 E-3	0.555 E-6	122	1.917	1.14 E-5	0.597 E-5
60	983	0.467 E-3	0.475 E-6	140	1.908	0.975 E-5	0.511 E-5
70	978	0.405 E-3	0.414 E-6	158	1.897	0.846 E-5	0.446 E-5
80	972	0.355 E-3	0.365 E-6	176	1.886	0.741 E-5	0.393 E-5
90	965	0.316 E-3	0.327 E-6	194	1.873	0.660 E-5	0.352 E-5
100	958	0.283 E-3	0.295 E-6	212	1.859	0.591 E-5	0.318 E-5

### 2.1.2.3 Partículas

Las partículas utilizadas son poliamidas PSP esféricas de diámetro medio  $57 \mu\text{m}$  y una densidad  $1016 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  esto permite que las partículas no se depositen en la instalación ya que tienen una densidad muy parecida a la del agua para evitar en el máximo de lo posible las fuerzas de inercia y de flotación.

### 2.1.2.4 Cámara MotionScope M3

La cámara es una MotionScope M3 de alta velocidad CMOS, esta cámara puede llegar a una resolución máxima de  $1280 \times 1024$  píxeles a 500 fotogramas por segundo (fps), pudiendo llegar a 32.000 fps reduciendo las resoluciones a las que trabaja. Su conexión fireware permite conectar la cámara de forma sencilla pudiendo rápidamente comenzar a descargar las imágenes, esto combinado con el software MotionStudio, permite comenzar la adquisición de imágenes de una forma relativamente rápida y sencilla. A esta cámara además se le acopla una lente que le permite obtener el doble de luz al abrir completamente el diafragma y además obtener a una distancia focal de 30 cm generando una imagen de  $4,6 \times 3,7$  cm a una resolución de  $1280 \times 1024$  píxeles, lo cual permite mejorar en gran medida la calidad de las imágenes [10].



Fig. 8. Modelo de cámara Motion Scope M3 [10].

### 2.1.2.5 Software de adquisición

Para la adquisición de los datos se ha utilizado una tarjeta de adquisición de datos Xcelera-CL PX4 Board de Teledyne Dalsa, y como software se utilizó el MotionStudio. La configuración de la cámara es sencilla, dado que la velocidad del obturador de la cámara y la apertura del diafragma se mantienen constantes, para que la exposición de la fotografía sea la correcta tendremos que configurar la ISO, en este caso la ISO será de 80, lo que nos da una exposición muy baja, esto es necesario para que la luz natural y artificial del laboratorio no alteren los resultados del experimento, además, se busca un imagen del plano central del volumen de control, lo cual lo conseguimos con el haz de luz que genera el láser, si la luz externa interfiriera no solo veríamos el plano central sino también los planos delanteros y traseros, por lo tanto no podríamos seguir las partículas por medio de velocimetría de imágenes y no servirían de nada las imágenes.

Una vez configurada la exposición de las imágenes, tendremos que configurar el número de fotogramas por segundo que queremos que capture la cámara, esto dependerá del experimento que realicemos, pero se situará entre los 50 y 200 fotogramas por segundo, también tendremos que configurar el número de imágenes que también depende del experimento a realizar y puede ir desde las 1000 imágenes en el más laminar del oscilatorio hasta 6000 en los puntos de neto. Por último, para el caso de flujo oscilatorio, tenemos que configurar que la cámara comience a disparar cuando el oscilador pase por el inicio del ciclo, que actúa como trigger. Una vez configurado todo se podrá comenzar la adquisición de las imágenes.

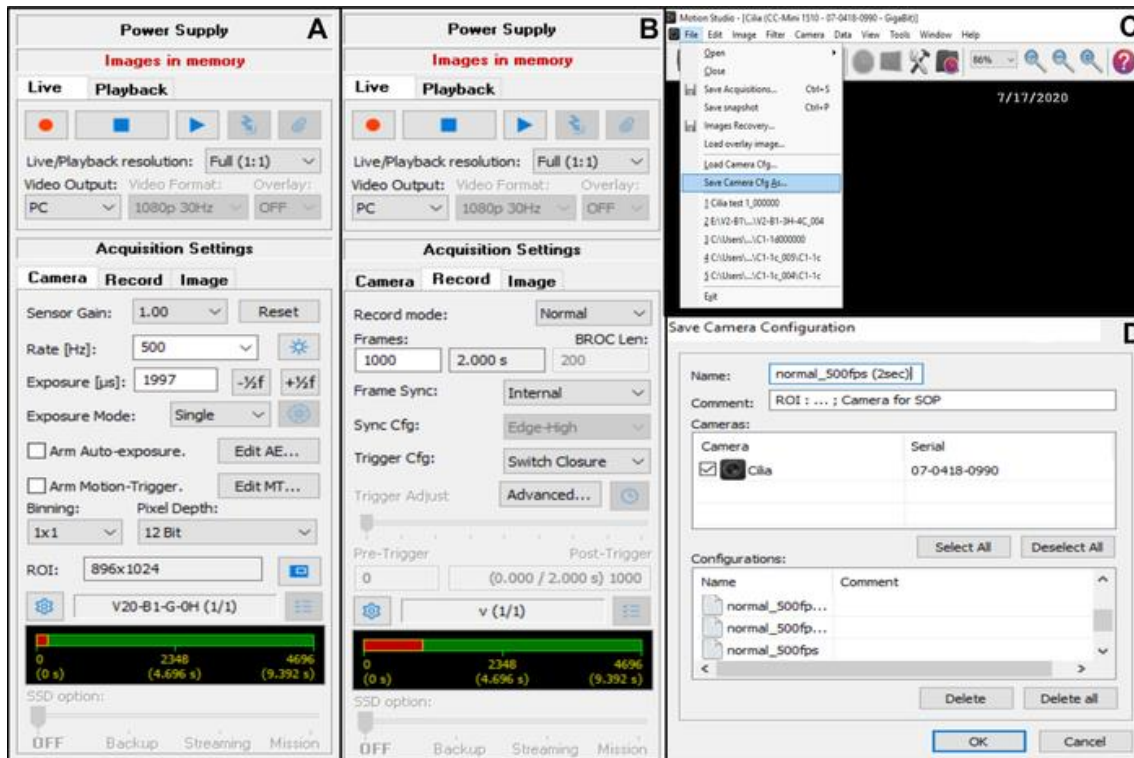


Fig. 9. Software MotionStudio utilizado para configurar los parámetros de la cámara [11].

### 2.1.2.6 Sensores e instrumentos de medida

La instrumentación utilizada para medir las condiciones en los ensayos es la siguiente:

- **Caudalímetro de efecto Coriolis.** Se utiliza el CMF025 de Micro Motion ELITE series (EMERSON), de caudal nominal 1050 kg/h y máximo de 2100 kg/h.
- **Sondas de temperatura PT100.** Se emplean 2 sondas de temperatura PT100 para la medida de la temperatura del fluido a la entrada y salida del recinto de ensayo. Las sondas de entrada y salida son clase B mejoradas 1/10 DIN y 1/3 DIN, respectivamente.
- **Datalogger.** Se emplea el modelo 34972A, consta de 3 módulos modelo 34901A, cada uno de ellos con 20 entradas multiplexadas, pudiendo distinguir entre entradas de tensión (AC o DC), corriente (4-20 mA) o entradas 3-4 hilos para las RTDs (*Residence Time Distribution*) que es una distribución de probabilidad que describe la cantidad de tiempo que un elemento diferencial de un fluido puede pasar dentro de un reactor.
- **Sensor de posición magnetostrictivo.** Es el sensor que proporciona la señal de posición que tiene el vástago dentro del cilindro que provoca la oscilación del flujo se conecta en el extremo de este.

- **Tarjeta de adquisición de datos.** El modelo empleado es el Xcelera-CL PX4 Board de Teledyne Dalsa.
- **Disparador fotoeléctrico.** Modelo OMRON E3JM-R4M4T-G. Este sensor emite una señal de disparo en el instante en el cual la barra colocada en una posición angular concreta del disco, que corresponde al inicio del ciclo, pasa por delante de él. Esta señal inicia el proceso de adquisición de datos.

### 2.1.2.7 Láser Oxford Laser-HSI 5000

El láser utilizado puede emitir con una longitud de onda de 808 nm y posee una potencia pico de 200 W, puede emitir con un trigger interno de 1 Hz o con uno externo de hasta 5 KHz con 1, 2, 3 ó 4 pulsos por cada señal del trigger. La energía emitida por el láser se modifica con una serie de lentes para proporcionar una lámina muy estrecha con un espesor inferior a 0,5 mm a una distancia entre 65 mm y 150 mm de la apertura del láser esto permite iluminar un plano muy estrecho en el cilindro por el cual fluye el agua con las partículas que queremos estudiar. Este laser esta sincronizado con la cámara para que cuando la tome un fotograma, el láser emita un pulso, permitiendo así iluminar la zona por cada fotograma que la cámara toma.

## 2.2 Adquisición de datos

La metodología previa a la adquisición de datos siempre es la misma y se realiza siguiendo una serie de pasos, que son independientes de la geometría en estudio, de la frecuencia del oscilador y del tipo de flujo a estudiar (neto, oscilatorio o combinado) o de la temperatura de este y que serán enumerados a continuación:

1. Las llaves de regulación de caudal se abren al máximo y el oscilador se pone a una frecuencia elevada, entorno a los 10 Hz, para que las partículas se mezclen de la mejor forma posible en el agua, si se observa que hay demasiadas partículas, o el agua está sucia se deberá limpiar la instalación, para ello se vaciará y se volverá a rellenar con agua limpia la instalación las veces que sean necesarias hasta que la cantidad de partículas en el agua descienda y se vea más limpia.
2. Con las llaves abiertas, se configura el oscilador a la frecuencia objetivo y se añaden partículas hasta tener la concentración deseada, hasta que la densidad de partículas visualizada sea la suficiente para poder analizar posteriormente las imágenes pero no demasiada ya que provocaría errores en el procesado y por lo

tanto como resultado se obtendrían unos datos poco fiables o erróneos, esto se realizará con la cámara y el láser encendidos y preparados para adquirir datos ya que sino no se podrían ver las partículas en el agua porque no son apreciables a simple vista.

- Después de añadir las partículas y esperar a que se repartan por toda la instalación, se cierran las llaves de control del caudal hasta que el caudalímetro marque el caudal que se quiere estudiar de forma estable.

Con esto, se puede decir que la instalación está preparada y lista para que se puedan tomar las imágenes, el número de imágenes, la frecuencia del oscilador, la frecuencia de captura de la cámara y el tipo de flujo son las variables restantes según los diferentes puntos de estudio.

### 2.2.1 Geometría estudiada

La geometría estudiada en este TFG es la mostrada en la Fig. 10 con las dimensiones de la Tabla 3. Esta geometría ha sido estudiada para dos posiciones distintas, la primera, en la cual se colocan deflectores con los agujeros alineados (Fig. 10a) y la segunda, en la cual estos agujeros quedan desalineados (Fig. 10b), dando así a resultados distintos en los experimentos. La metodología a seguir para realizar los ensayos en la instalación es independiente de la geometría a ensayar, para ambas geometrías se sigue la misma metodología.

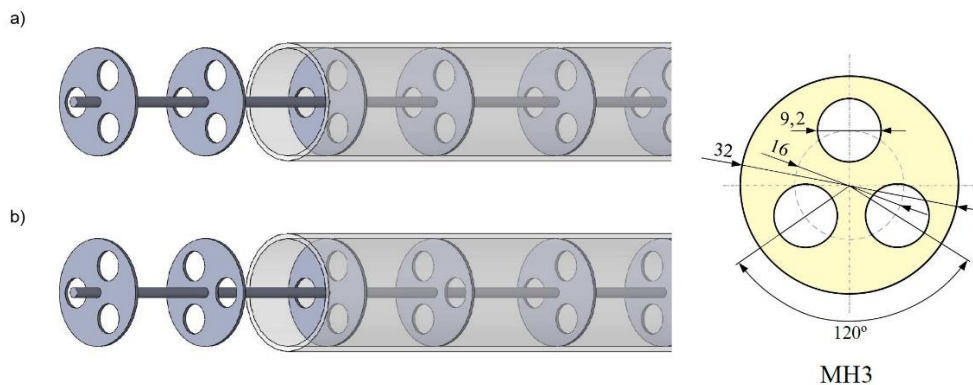


Fig. 10. Geometría de la instalación y dimensiones del deflector [12].

Tabla 3. Dimensiones geométricas del deflector empleado.

Nombre	Diámetro, D (mm)	Diámetro del orificio, d (mm)	Longitud de celda, l (mm)	Espesor, e (mm)
MH3	32	9,2	27,6	1,2

### 2.2.1 Adquisición de datos del flujo neto

Se llama flujo neto a aquel cuyo caudal circula siempre en el mismo sentido, en el caso de estudio se consigue con el funcionamiento en solitario de la bomba, el oscilador no entra en funcionamiento.

Una vez toda la instalación preparada y puesta a punto, se para el motor que genera la oscilación, debido a la necesidad de un flujo en una dirección. Se toman las imágenes para tres caudales netos, un caudal de 10 kg/h, otro de 20 kg/h y otro de 40 kg/h. Cada caudal tiene una velocidad de adquisición distinta debido a que, si se adquiere muy lento, el desplazamiento de las partículas entre imágenes es demasiado grande como para que luego se procese bien el ciclo, y si se adquiere muy rápido, el desplazamiento es demasiado pequeño y también surgirían problemas al procesar el ciclo. También es necesario variar el número de imágenes a tomar, se deben tomar las suficientes para poder considerar que el flujo se encuentra en estado estacionario. En la Tabla 4 se muestran los parámetros de imágenes y frecuencia de adquisición seleccionados.

Tabla 4. Caudal, frecuencia de disparo y número de imágenes a tomar en el ensayo de flujo neto.

Caudal neto (kg/h)	Frecuencia de disparo del láser (Hz)	Nº de imágenes a tomar
10	50	1000
20	100	6000
40	200	6000

### 2.2.2 Adquisición de datos del flujo oscilatorio

Se llama flujo oscilatorio a aquel cuyo caudal circula cambiando su sentido de circulación de forma periódica cada determinado tiempo, el cambio se produce de forma progresiva, la velocidad de este se ve reducida poco a poco hasta que cambia de sentido y así sucesivamente en intervalos de tiempo iguales y controlados.

Al contrario que en el flujo neto, en este ensayo se desactiva la bomba para que únicamente funcione el motor que genera la oscilación. Una vez desactivada la bomba, con el variador de frecuencia, se fija la frecuencia del oscilador. En este ensayo la relación entre la oscilación del fluido y la frecuencia de disparo del láser es muy importante, debido a que cuanto más pequeña es, mejores resultados se obtendrán, aunque es necesario llegar a una solución de compromiso debido a que no se puede tener una relación todo lo pequeña que se quiera porque es necesario que el desplazamiento de las partículas entre imágenes sea significativo y por limitaciones de la instalación, el láser no



dispara a más de 200 Hz y el oscilador no funciona correctamente por debajo de 2 Hz, por eso como se verá posteriormente, los mejores resultados se obtienen en el punto 2, el cual tiene la relación más pequeña. Se ha considerado tomar un número determinado de ciclos por cada punto para así poder considerar los resultados del experimento como estadísticamente fiables, se llama ciclo al proceso por el cual la cámara toma el número de imágenes para el que se ha configurado. En la Tabla 5 se muestran todos los parámetros que intervienen y los valores seleccionados para cada punto.

Tabla 5. Frecuencia de oscilación y adquisición, nº de ciclos e imágenes por ciclo del caudal oscilatorio.

Frecuencia de oscilación (Hz)	Frecuencia de adquisición (Hz)	Nº de ciclos	Nº de imágenes por ciclo
2,5	50	20	1200
5	150	20	1800
7,5	200	50	1800

### 2.2.3 Adquisición de datos del flujo combinado

Se llama flujo combinado a aquel que combina tanto un flujo oscilatorio como un flujo neto, generando así un caudal neto oscilante.

En este ensayo se quedarán encendidos tanto la bomba como el oscilador, en todos los puntos del experimento de flujo combinado el caudal neto será de 10 kg/h, primero se fijará la frecuencia de oscilación a la frecuencia objetivo dependiendo del punto del experimento, y después se fija el caudal utilizando las llaves de paso de la instalación. Este ensayo es equivalente al ensayo de flujo oscilatorio, y debido a que hay oscilación, es importante de nuevo la relación entre la frecuencia de oscilación y la frecuencia de adquisición. También existe el parámetro de los ciclos a tomar y el de las imágenes por ciclo. Estos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Caudal neto, frecuencias de trabajo, nº de ciclos e imágenes por ciclo en el ensayo de caudal combinado.

Caudal neto (kg/h)	Frecuencia de oscilación (Hz)	Frecuencia de adquisición (Hz)	Nº de ciclos	Nº de imágenes por ciclo
10	2,5	50	20	1200
10	5	150	20	1800
10	7,5	200	20	1800

## 2.3 Tratamiento de las imágenes adquiridas

Una vez tomadas las imágenes es necesario hacerles un pretratamiento para poder procesarlas, gracias al procesado podremos ver como se han movido las partículas y que velocidad tenían, también nos podremos hacer una idea de si los ensayos realizados han

sido buenos. Para el procesado de imágenes, lo que el software realiza es, a partir de las imágenes que se le proporciona, extraer el desplazamiento de las partículas entre una imagen y la siguiente, esto permite al programa generar una serie de vectores que serán más pequeños si el desplazamiento es pequeño, y mayores, si el desplazamiento es mayor, esto junto con la frecuencia de disparo del láser y la cámara, y el desplazamiento en medidas internacionales que supone el desplazamiento de un pixel en la cámara, otorga la información necesaria para calcular la velocidad a la que las partículas se desplazan.

### 2.3.1 Preprocesado de las imágenes

Una vez tomadas las imágenes, cada punto constará de 20 ciclos con un número determinado de imágenes por ciclo, por ejemplo, el punto 3 de oscilatorio y neto tendrá 1800 imágenes. Este preprocesado utiliza el script de `preprocess_background`, este script hará uso de la carpeta en la que están guardadas las imágenes de cada uno de los ciclos y las comparará, en el caso del script utilizado, la carpeta se llama “1-Raw images”, esta será la carpeta donde se guardarán todas las imágenes del ciclo listas para ser preprocesadas, la comparación se realiza para poder eliminar de cada una de ellas aquellas partes de la imagen que son iguales en todas dejando únicamente aquellas que van cambiando. Con esto se consigue que el tubo, las tuercas, tornillos, los reflejos y la geometría deflectora desaparezcan de las imágenes, quedando únicamente las partículas. La Fig. 11 muestra de forma gráfica como es el funcionamiento de la instalación y en la Fig. 12 se puede ver cómo sería el resultado de la toma de imágenes y la diferencia que tendría con una imagen preprocesada.

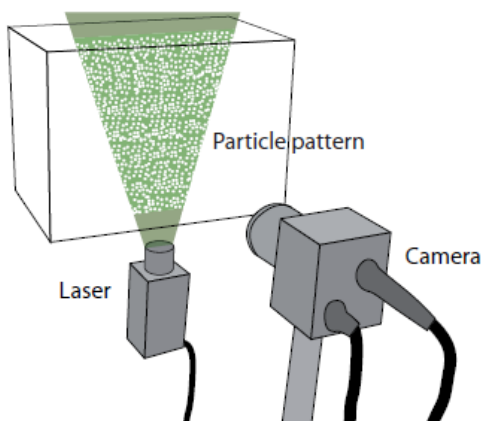


Fig. 11. Esquema de la instalación de adquisición de datos [12].

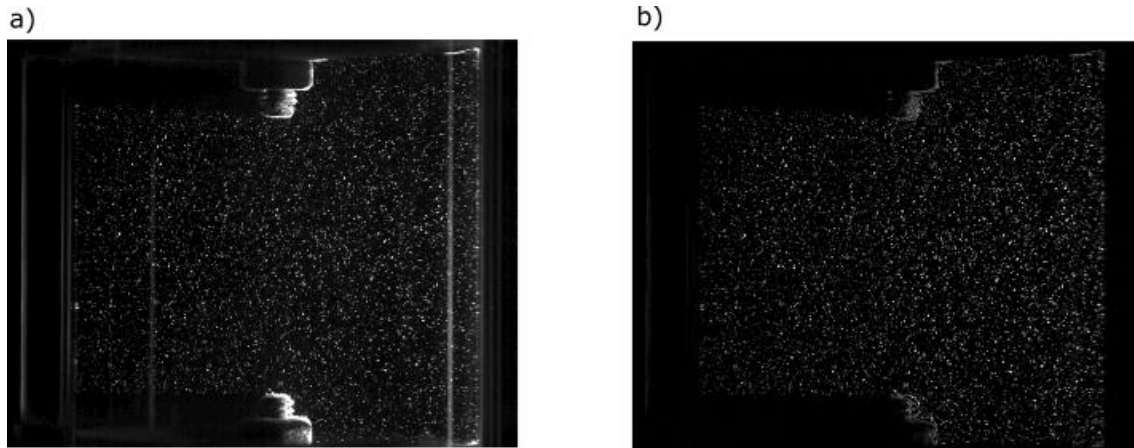


Fig. 12. a) Imagen en bruto. b) Imagen preprocesada. Imágenes editadas para que puedan ser visualizadas en este documento.

### 2.3.2 Procesado de las imágenes con PIVlab

PIVlab es una herramienta que utiliza Matlab para procesar un grupo de imágenes y así obtener información velocimétrica de imágenes de partículas. Al iniciar el software con Matlab, se tendrán que seleccionar las imágenes que se quieren estudiar, las cuales serán aquellas a las que se les ha aplicado el preproceso, para seleccionarlas se utiliza la opción “load images” de la ventana principal. Aparecerá una pantalla que permite elegir las imágenes concretas, que serían las que han pasado el preproceso. En el campo, *estilo de secuenciación*, se seleccionará la segunda opción (secuenciado 1-2, 3-4, ...) que, aunque es menos precisa, tarda menos tiempo en realizar el procesado.

Una vez seleccionadas las imágenes, lo primero que se tendrá que configurar es la región de interés (ROI en inglés) y la máscara de objeto situado en las pestaña de *Analysis settings*, la ROI marca la zona general en la que PIVlab tiene que trabajar, que en este caso será toda la zona del tubo donde se encuentran las partículas, la máscara de objeto permite seleccionar las regiones que se quiere estudiar con más precisión, ya que por ejemplo, las zonas donde se encuentran las tuercas y la zona exterior del tubo no interesan y sería una pérdida de capacidad de computación intentarlas estudiar, prolongando así la duración del procesado de las imágenes. Por lo tanto, la utilización de la máscara es primordial para decirle al software que las tuercas y tornillos no se deben estudiar. El tamaño de ROI depende en gran medida de la resolución de las imágenes y de lo cerca que se grabe el experimento. Cuanta más resolución y más cerca, más pixeles tendrá la ventana y más tardará en procesar, pero mejores serán los resultados. Una vez seleccionada la zona de estudio de las imágenes, como se puede ver en las figuras, es complicado apreciar las partículas, por lo tanto, se utiliza un filtro que las realce, para

facilitar la labor del programa a la vez que evitar errores de este, el software dispone de cuatro filtros: el filtro CLAHE, que viene de las iniciales *Contrast limited adaptive histogram equalization*, el filtro *High-pass*, el filtro *Intensity capping* y el filtro *Wiener2 denoise*. Se seleccionan una combinación de los tres filtros con el valor predeterminado del software que son los recomendados por los autores de este.

El filtro CLAHE hace que las regiones con menor exposición a la luz sean optimizadas de forma independiente, según el creador del software de PIV mejora significativamente con ello la probabilidad de detectar vectores válidos en las imágenes experimentales.

El filtro *High-pass* elimina la iluminación heterogénea conservando la mayoría de la información proveniente de las partículas remarcando en general la información de la imagen.

El filtro *Intensity capping* reduce el brillo de las zonas que más destacan y lo sustituyen por un tono en la escala de grises que se encuentra en el límite ideal para el estudio, ya que al igual que las zonas muy oscuras provocan errores las zonas muy iluminadas también.

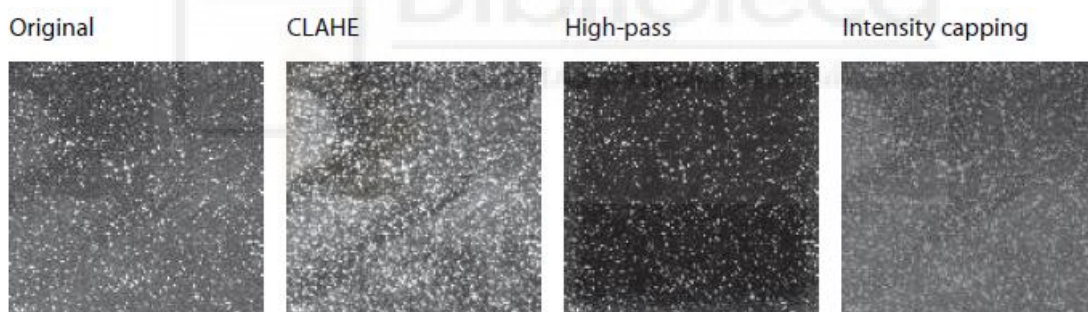


Fig. 13. Diferencias en una muestra de los diferentes filtros de PIVlab [12].

Para analizar las imágenes se utiliza correlación cruzada adaptativa con deformación de ventanas, cada paso de la correlación se calcula mediante un método indirecto basado en la transformada rápida de Fourier (FFT), se puede ver como se deformaría la ventana en la Fig. 14.

El tamaño de las ventanas de interrogación seleccionado se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Tamaño de las ROI en el software PIVlab.

	Tamaño del área de interrogación (px)	px-Step
<b>Paso 1</b>	192	96
<b>Paso 2</b>	128	64
<b>Paso 3</b>	96	48

Paso 4

88

44

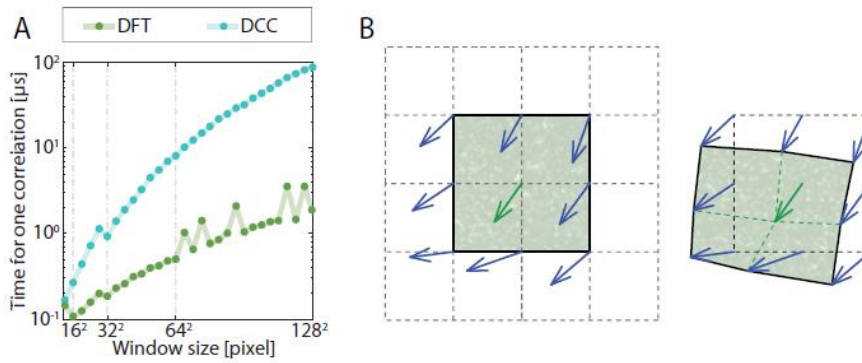


Fig. 14. Esquema del funcionamiento de la interpolación FFT en PIVlab [12].

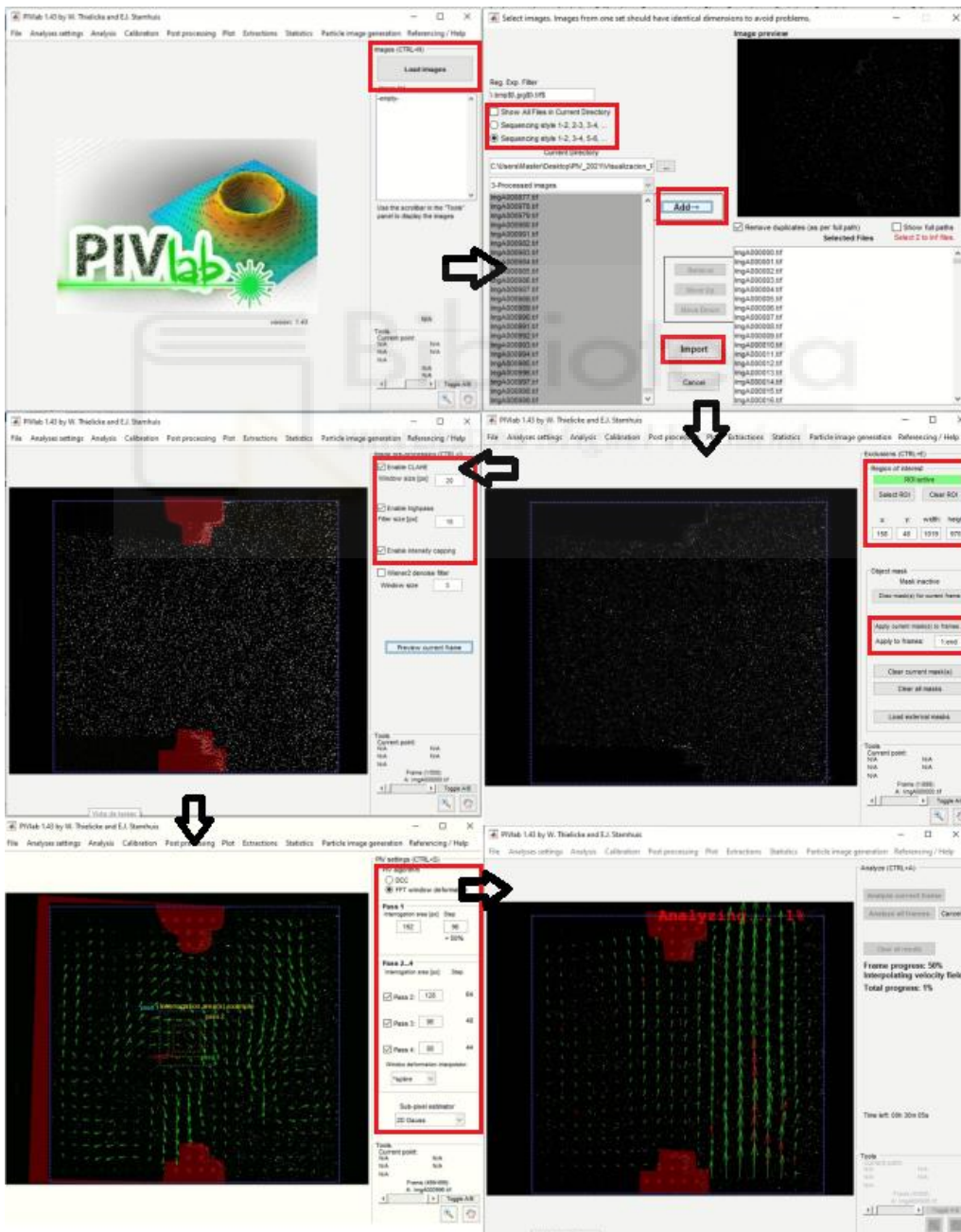


Fig. 15. Pasos a seguir en el software PIVlab para procesar las imágenes.

Es necesario seleccionar un método de interpolación para calcular los desplazamientos de los píxeles de la ventana. Se ha seleccionado una interpolación de tipo *spline*, ya que, aunque es un método más lento, los resultados son más precisos. También es necesario seleccionar el estimador subpíxel, en este caso *gaussiano bidimensional* para que sea más refinado en caso de imágenes difuminadas.

Una vez todos los filtros y parámetros han sido seleccionados en PIVlab, en la pestaña de *Analysis* se comienza el procesado de las imágenes para obtener todos los datos. Al finalizar se comienza con la primera fase del post procesado en la pestaña de *post processing* del PIVlab.

### 2.3.3 Postprocesado de las imágenes

Terminado el procesado de las imágenes, en algunas fotos aparecerán vectores que claramente no son del tamaño y dirección correcto, estos serán llamados *outliers*, estos vectores han de ser detectados y reemplazados, el software de PIV dispone de dos tipos de filtros: globales y locales. Los filtros serán delimitados por unos límites de velocidad seleccionados en una gráfica en la cual se marcará con un recuadro la zona en la que más puntos se concentran, descartando así los vectores cuya velocidad no se encuentra en la zona de velocidades típica.

#### Filtro global

El filtro global muestra en una gráfica cada uno de los vectores siendo el eje X, la componente axial, y el eje Y, la componente radial. Se puede determinar a simple vista los vectores atípicos en función de la distribución de estos.

#### Filtro local

Los filtros locales del software son los siguientes:

- Filtro basado en la **media**. Descarta los vectores que no se encuentran entre los límites inferior y superior fijados en base a la media y la desviación estándar de la velocidad en el campo fluido. El parámetro  $n$ , que se multiplica por el resultado de la desviación estándar, establece si el filtro es más o menos restrictivo, en el caso estudiado se ha encontrado que el valor  $n = 5$  proporciona un buen filtrado.

- Filtro basado en la **mediana**. Este filtro [14] compara la desviación del vector a estudiar con la media de la desviación de los 8 vectores colindantes. Dispone de dos valores a asignar, en este estudio se ha comprobado que el valor límite que mejor filtrado proporciona es  $r_0 = 3$  y que el valor de  $\varepsilon = 0,1$  como recomiendan los autores del programa.

Una vez guardada la información obtenida con el procesado de las imágenes, se utilizará el script *Signal2noise* que José Muñoz Cámara [10] programó y que proporcionará información gráfica y numérica, dando una puntuación de 0 a 100 refiriéndose al porcentaje de vectores aceptables, acerca de lo bien o mal que han salido los experimentos siendo a partir de un 85% un valor a partir del cual se consideran unos resultados exitosos. Por último, es necesario guardar los datos que PIVlab genera, para ello en la pestaña de *File* se selecciona guardar los datos como archivo ASCII para que los puedan interpretar bien los scripts de Matlab. Como PIVlab guarda la información de la correlación entre las imágenes procesadas, se puede aprovechar esa información para saber cómo han salido los resultados, esta parte del post procesado puede tardar un tiempo debido a analizar todas correlaciones surgidas de PIVlab, el script de *Signal2noise* devuelve una gráfica y un resultado medio del porcentaje de vectores que encajan en el resultado esperado.

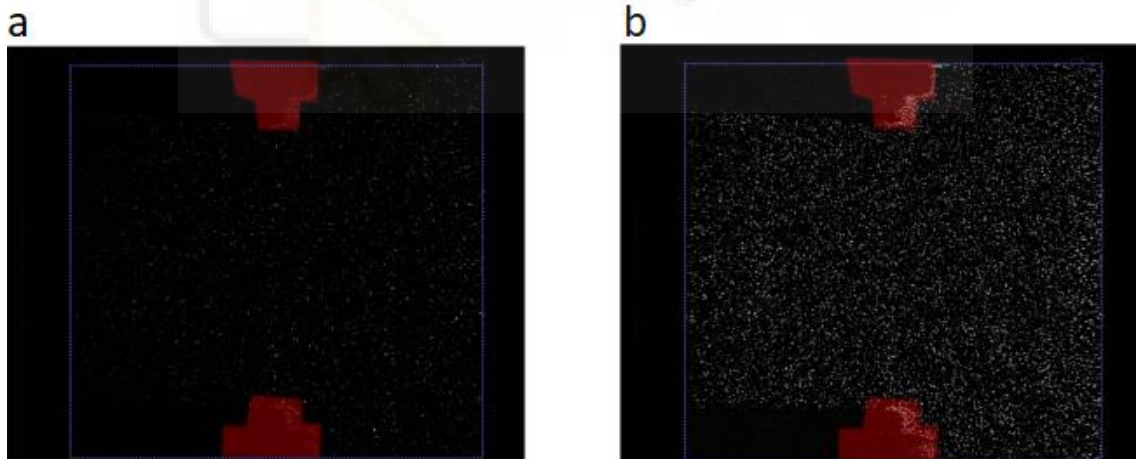


Fig. 16. a) Imagen con la máscara antes de los filtros. b) Imagen con la máscara después de los filtros.

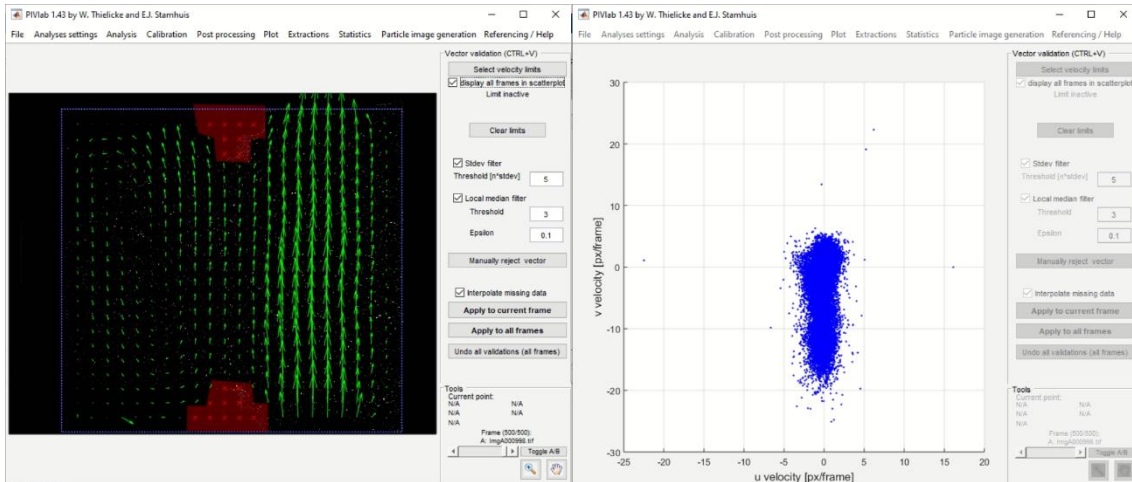


Fig. 17. Parámetros y selección de los intervalos de velocidad.

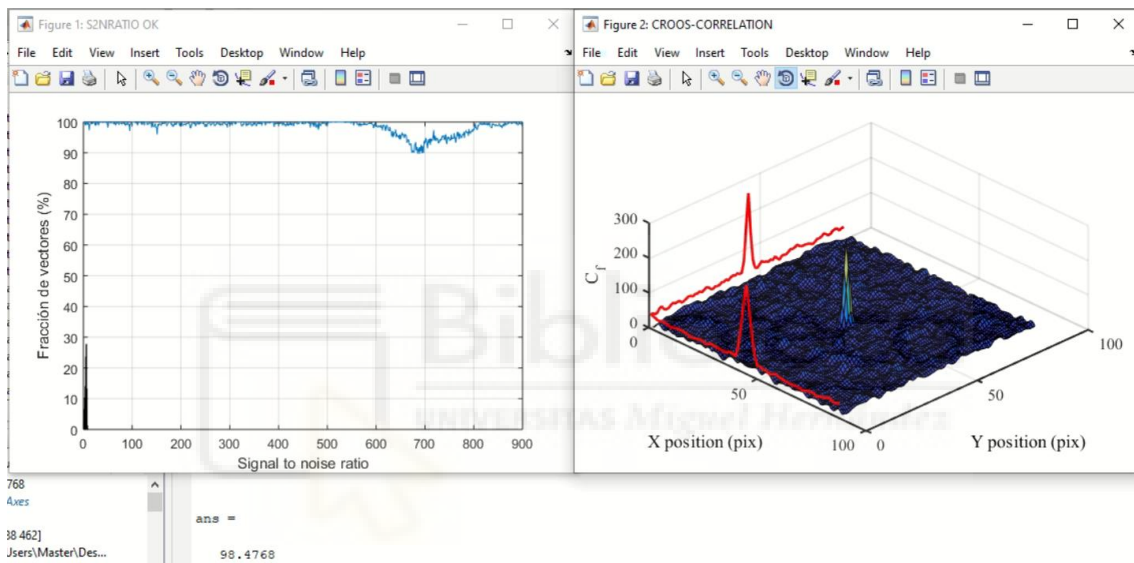


Fig. 18. Resultados del script Signal2noise.

Una vez comprobado que los resultados obtenidos son buenos, se continúa con la selección de las fases para generar las imágenes de los campos vectoriales, esas fases se pueden seleccionar a mano dividiendo el número de imágenes entre el número de fases que se quieren utilizar, en este caso 8 fases, y a partir de ese dato generar las imágenes, el problema de esto, es que no es preciso ya que, cada punto y ciclo puede comenzar la fase inicial en un momento ligeramente distinto. Para ello se utiliza el script SORT\_images\_OSC, el cual calcula el caudal mínimo es decir cuando la función de la oscilación corta con el eje y por la tanto la velocidad del flujo es nula, esto se asumiría como la fase inicial y a partir de ahí, utilizando la frecuencia de adquisición y la frecuencia de oscilación, el script obtendría cada cuantas imágenes exactamente se encuentran las fases que se quieren extraer, una vez realizado esto, extrae las imágenes en las que se encuentra esa fase, y las más próximas y las guarda en una carpeta, a las imágenes de esta



carpeta se les tendrá que hacer todo el preprocesado, procesado y post procesado ya que estas imágenes son las originales que fueron tomadas con la cámara.

Al procesar de nuevo estos datos, se tendrá la información necesaria para que, al usar el script `FIG_Campo_vec_FINAL` el software genere las imágenes con los campos vectoriales, que posteriormente en este trabajo se usarán en el capítulo de resultados.



## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Los resultados se discutirán de forma que se podrá ver la misma fase en ambas geometrías, de forma que podremos comparar los resultados entre una geometría y la otra, la geometría con los orificios alineados y los orificios desalineados centrándose sobre todo en los flujos oscilatorio y combinado, mezcla de oscilatorio y neto.

### 3.1 Resultado obtenidos en el flujo neto

Esta parte del trabajo se centra en el estudio del comportamiento del flujo en condiciones de caudal neto únicamente. El Reynolds para este caudal neto se ha calculado de la siguiente manera:

$$Re_n = \frac{\rho U_n D}{\mu} \quad (6)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del fluido, en este caso del agua.

$U_n$  es la velocidad promedio del caudal neto.

$D$  es el diámetro de la geometría.

$\mu$  es la viscosidad dinámica.

Se han procesado 2 ensayos de los tres realizados, el que tiene el Reynolds más bajo,  $Re_n = 110$ , y el más alto,  $Re_n = 440$ , esto permite visualizar las diferencias en el flujo dependiendo del número de Reynolds, cuanto mayor Reynolds, más caótico se observa. El motivo por el cual se han seleccionado estos Reynolds, es para comprobar si aumentándolo se alcanzaba la turbulencia, ya que José Muñoz en su tesis [12] no utilizaba números tan altos. En la Fig. 19 se muestran los campos de velocidad vectoriales para y  $Re_n = 110$  en instantes sucesivos. En esta figura se muestran cuatro campos de velocidad, siendo Fig. 19a) y Fig. 19b) los campos de la geometría alineada y Fig. 19c) y Fig. 19d) los campos de la geometría alternada. En la geometría alternada, en el plano de visualización, en la región superior al chorro se aprecia la formación de una recirculación. La recirculación superior crece hasta ocupar toda la longitud de la celda.

En la geometría alternada, el chorro principal no se expande a lo largo de toda la longitud de la celda como en la geometría alineada, sino que choca con el siguiente deflector y se introduce por el agujero superior del mismo plano de visualización aparentando dividirse en dos el chorro.

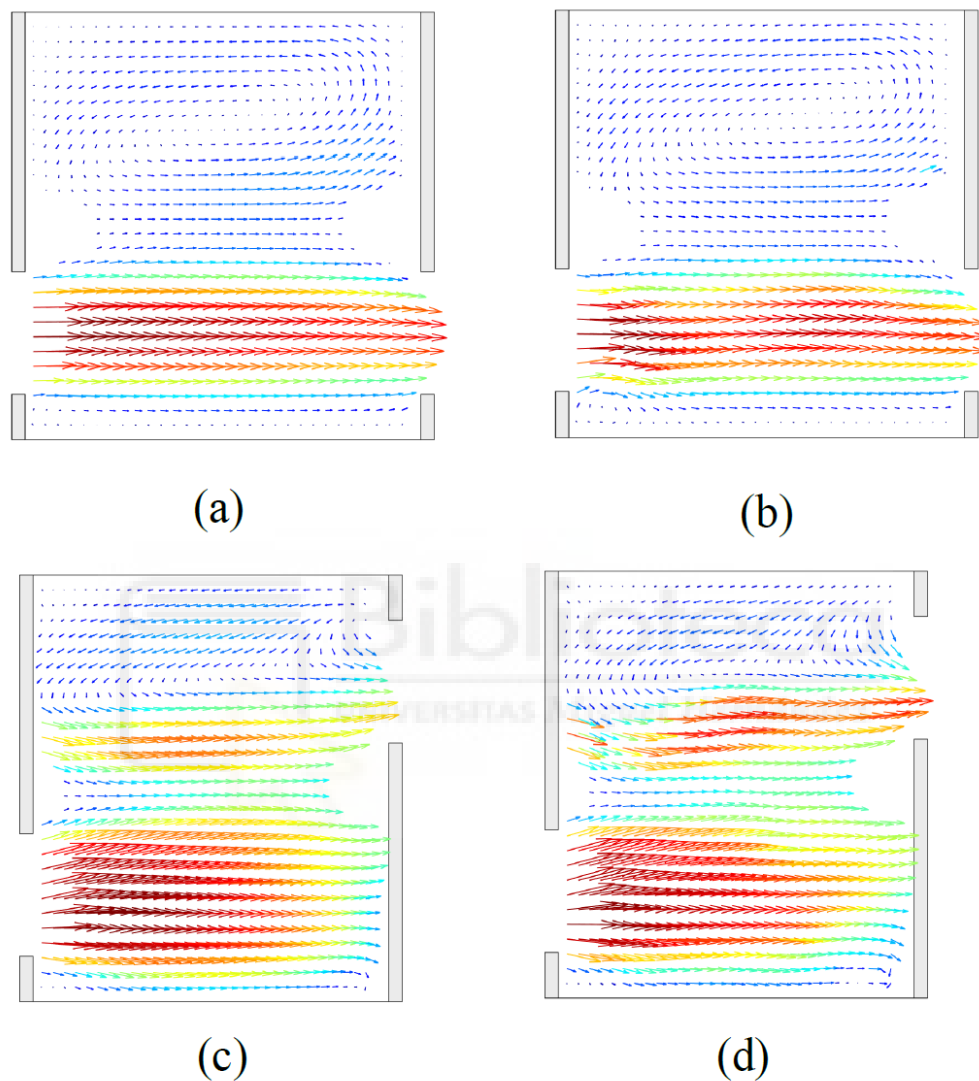


Fig. 19. Campo de velocidades para  $Re_n = 110$ . Flujo promedio del caudal neto en la geometría alineada (a, b), flujo promedio del caudal neto en la geometría alternada (c, d).

Posteriormente se muestra una figura (Fig. 20) con 3 instantes del flujo neto en ambas geometrías, esta vez con un Reynolds superior,  $Re_n = 440$ , dando origen a un flujo cuyo chorro principal comienza a deformarse conforme pasa el tiempo y generando un flujo bastante más caótico que su homólogo anterior, es más acuciante este fenómeno en la geometría alternada, ya que el chorro casi desaparece incluso.

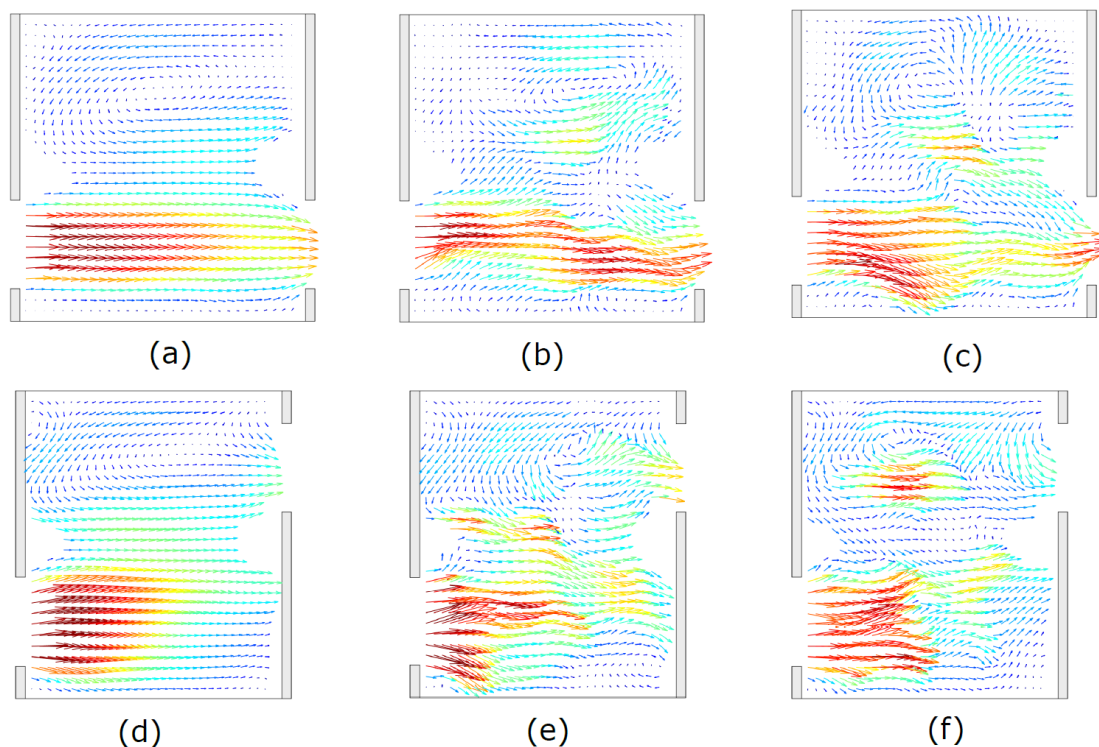


Fig. 20. Campo de velocidades para  $Re_n = 440$ . (a) Promedio geometría alineada, (b, c) instantáneo geometría alineada; (d) promedio geometría alternada, (e, f) instantáneo geometría alternada.

### 3.2 Resultados obtenidos en el flujo oscilatorio

La naturaleza dinámica del flujo oscilatorio hace imposible recoger la complejidad del flujo a lo largo de todo el ciclo de oscilación. Es por ello que los resultados que se recogen en este apartado corresponden únicamente a 8 fases del ciclo de oscilación, que se han mostrado en las Fig. 21 y 22.

Comenzaremos por el punto 1 que es el punto más laminar, gracias a esto el Signal to noise ratio obtenido fue elevado por lo tanto la calidad de los resultados es bastante buena. Se ha calculado el Reynolds oscilatorio de la siguiente forma:

$$Re_{osc} = \frac{\rho 2\pi f x_0 D}{\mu} \quad (7)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del fluido, en este caso del agua.

$2\pi f x_0$  es la velocidad máxima de oscilación.

$D$  es el diámetro de la geometría.

$\mu$  es la viscosidad dinámica.

Es necesario determinar si el comportamiento del flujo oscilatorio es periódico, para ello se compara, en unas mismas condiciones de flujo, la misma fase en ciclos distintos de oscilación. El rango de números de Reynolds para los ensayos realizados es de  $50 < Re_{osc} < 400$ . Pero los ensayos procesados son para los Reynolds más bajo y más alto, para poder visualizar mejor la diferencia entre ellos, mostrando así para el punto 1 un  $Re_{osc} = 51$  y un  $Re_{osc} = 375$  para el punto 3. En esta situación el motivo de los números de Reynolds es el mismo que para el neto, la necesidad de elevarlo con respecto a la tesis de José Muñoz [12] para estudiar su comportamiento.

A continuación, se expondrán en las Fig. 21 y 22 los campos vectoriales obtenidos de los puntos 1 y 3 con los Reynolds anteriormente mencionados, para poder ver así la diferencia entre un flujo laminar y otro turbulento, en una misma figura aparecen a la izquierda la geometría alineada y a la derecha la geometría alternada. Podemos ver claramente gracias a la naturaleza del flujo laminar, la dirección que este sigue y las recirculaciones que se producen por el cambio de sentido en el flujo.

En la fase 1 (a1, a2) se puede ver claramente en la geometría alineada como en la imagen (a1) el chorro se desplaza de izquierda a derecha, saliendo por el otro orificio como sucedería en el flujo neto, en el caso de la imagen (a2), el chorro choca con el deflector viendo reducida su velocidad, también se aprecia como parte del chorro discurre por el orificio superior. Se pueden apreciar pequeñas recirculaciones en la parte superior del recinto en ambas imágenes.

En la fase 2 (b1, b2) ya comienza a cambiar de sentido la dirección del chorro y las recirculaciones que se producen en ambas geometrías son más pronunciadas tanto en la parte superior del recinto de la imagen (b1) como en la superior e inferior derecha de la imagen (b2).

La fase 3 (c1, c2) ya muestra claramente el cambio de sentido, pudiendo verse como en la geometría alineada (c1) comienza a introducirse el chorro por la derecha generando estos unas recirculaciones notables en la parte superior del recinto. En la imagen de la geometría alternada (c2) el chorro todavía no ha terminado de entrar por la izquierda cuando ha comenzado a entrar por la derecha provocando que en todo el recinto aparezca una recirculación.

Llegando a la parte intermedia del ciclo completo con la fase 4 (d1, d2), se puede ver como el chorro en sentido contrario esta más formado en ambas geometrías, dando origen a una gran recirculación en la parte superior del recinto de la geometría alineada (d1).

Con la fase 5 (e1, e2) empieza el segundo semiciclo, y comienza a repetirse lo mismo que sucede desde la fase 1 a la 4 pero en sentido contrario. En la fase 5 el chorro entra desde el orificio derecho y sale por el izquierdo, en la geometría alternada (e2) se aprecia como parte de este chorro intenta escapar por el orificio y otra parte choca con el deflector, se producen recirculaciones en ambas geometrías.

En la fase 6 (f1, f2) se inicia el cambio de sentido en dirección del chorro y las recirculaciones que se producen en ambas geometrías son más pronunciadas tanto en la parte superior de la geometría alineada (f1) como en la parte inferior de la geometría alternada (f2).

La fase 7 (g1, g2) no coincide en el mismo instante, debido a errores en el cálculo de las fases, pero muestra como la diferencia es muy pequeña, porque la geometría alineada (g1) muestra justo lo que sería el instante posterior a la geometría alternada (g2) en la cual se puede ver como el chorro está entrando a gran velocidad relativa por el orificio izquierdo al mismo tiempo que también entra por el orificio derecho.

Ya en la fase 8 (h1, h2) se puede dar por finalizado el ciclo oscilatorio para el  $Re_{osc} = 51$  que nos da un flujo laminar con el equivalente a la fase 1, el chorro entrando por el orificio izquierdo y saliendo por el derecho.

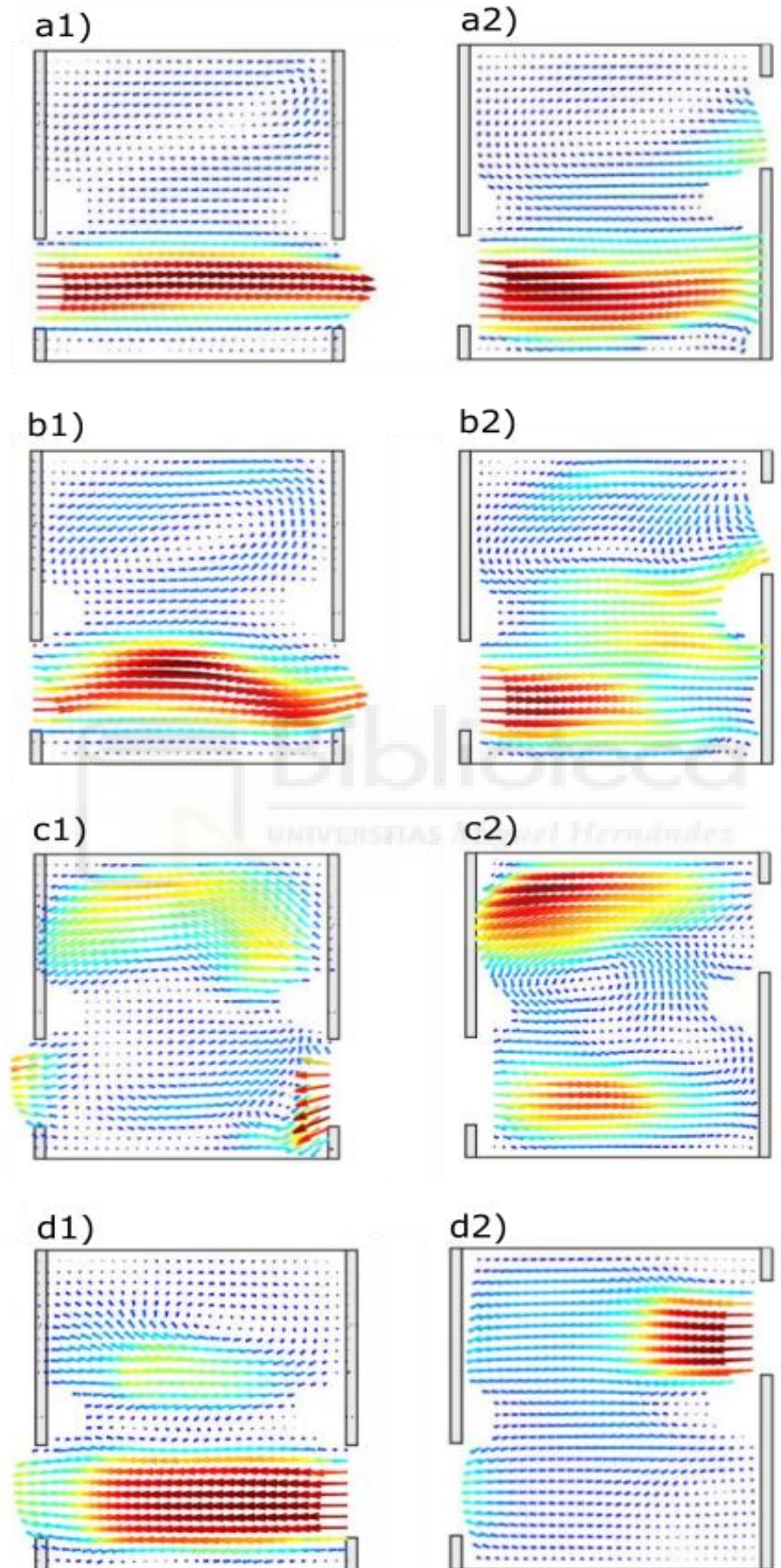


Fig. 21. Fases del ciclo oscilatorio de la geometría alineada (1) y de la geometría alternada (2).  $Re_{osc} = 51$ .

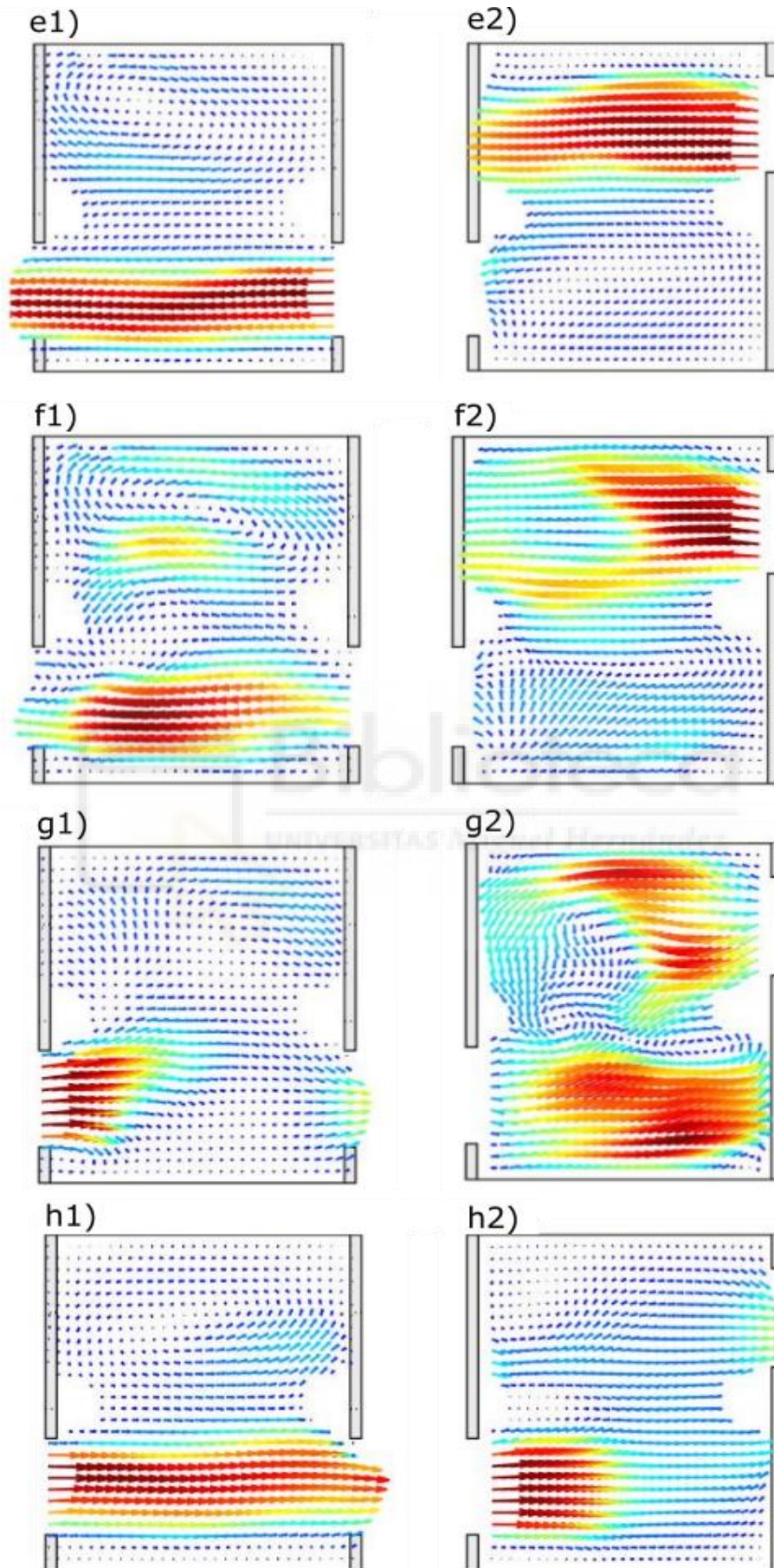


Fig. 22. Fases del ciclo oscilatorio de la geometría alineada (1) y de la geometría alternada (2).  $Re_{osc} = 51$ .



A continuación, se mostrarán los resultados de los campos vectoriales del flujo oscilatorio en las Fig. 23 y 24, pero para un Reynolds del cual obtenemos un flujo turbulento  $Re_{osc} = 375$ .

En la fase 1 (a1, a2), en este caso con un Reynolds que provoca un flujo turbulento, en la geometría alineada (a1) el chorro se desplaza de izquierda a derecha, saliendo por el otro orificio como sucedería en el flujo anterior, en el caso de la geometría alternada (a2), el chorro choca con el deflector viendo reducida su velocidad, también se aprecia como parte del chorro discurre por el orificio superior. Se pueden observar pequeñas recirculaciones en la parte superior del recinto en ambas imágenes. Los campos vectoriales son prácticamente iguales al flujo anterior más laminar.

A partir de la Fase 2 (b1, b2) es cuando los campos empiezan a diferenciarse más de los anteriores, se puede apreciar cómo hay más recirculaciones en ambas geometrías sobre todo en la geometría con los deflectores alternados (b2). Esta es la situación en la que el oscilador está llegando al pico de la onda senoidal y está empezando a cambiar el flujo de dirección. Destaca el chorro principal en ambas geometrías, pero en la geometría (b2) se observa su desplazamiento en diagonal. También son remarcables todas las recirculaciones en la parte superior del recinto.

Ya en la Fase 3 (c1, c2) se puede apreciar como el flujo está lleno de recirculaciones y el chorro principal se hace inapreciable marcando el final del cambio de dirección del chorro y dando paso al chorro circulando de derecha a izquierda en la próxima fase.

La Fase 4 (d1, d2) muestra el inicio del chorro en la nueva dirección, todavía no se ha terminado de formar y se aprecian claras recirculaciones en las dos geometrías, en la parte superior del recinto para la geometría (d1), y en la parte inferior para la geometría (d2).

Para la Fase 5 (e1, e2) se visualiza el chorro ya formado, como discurre de derecha a izquierda en ambas geometrías viéndose claramente las recirculaciones producidas por los deflectores, en la geometría alineada (e1) el chorro entra por el orificio derecho y sale por el izquierdo, en la geometría alternada (e2) se da la misma situación aunque antes el chorro choca contra el deflector para luego comenzar a escaparse por el orificio izquierdo.

La Fase 6 (f1, f2) marca el comienzo del cambio de dirección, el oscilador está a punto de llegar al final de su recorrido y provocar el cambio de dirección del chorro, esto aparece bien marcado sobre todo en el campo vectorial de la geometría alternada (f2) donde se

puede ver como el chorro se va frenando y se empiezan también a formar recirculaciones en la parte inferior del recinto.

Ya en la Fase 7 (g1, g2) no se diferencia el chorro, solo notables recirculaciones en todo el recinto debido al cambio de dirección del chorro.

Y finalizando con la Fase 8 (h1, h2) se distingue claramente el inicio del chorro en ambas geometrías siguiendo la dirección que se distinguía en la Fase 1, de izquierda a derecha.



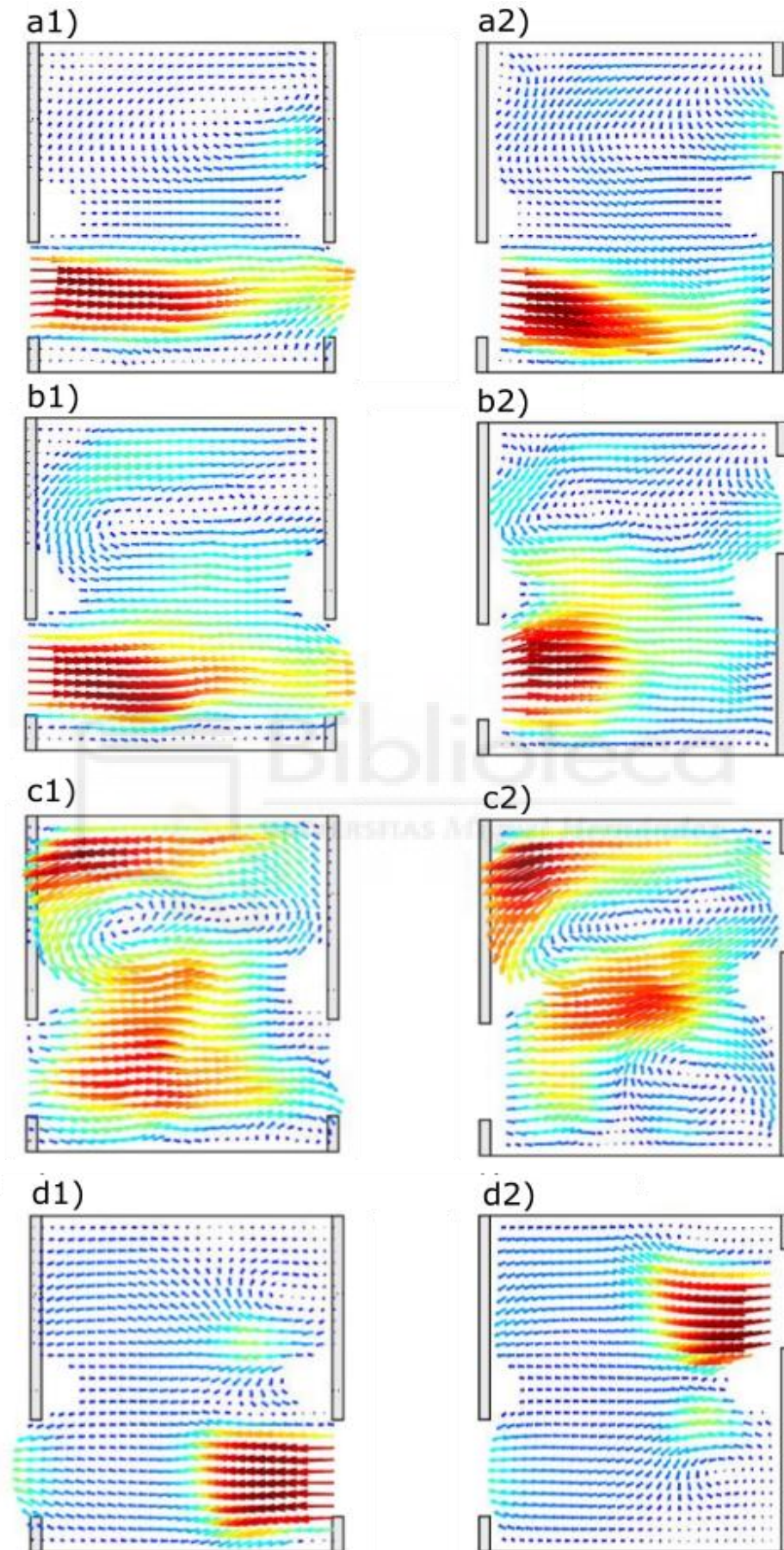


Fig. 23. Fases del ciclo oscilatorio de la geometría alineada (1) y de la geometría alternada (2).  $Re_{osc} = 375$ .

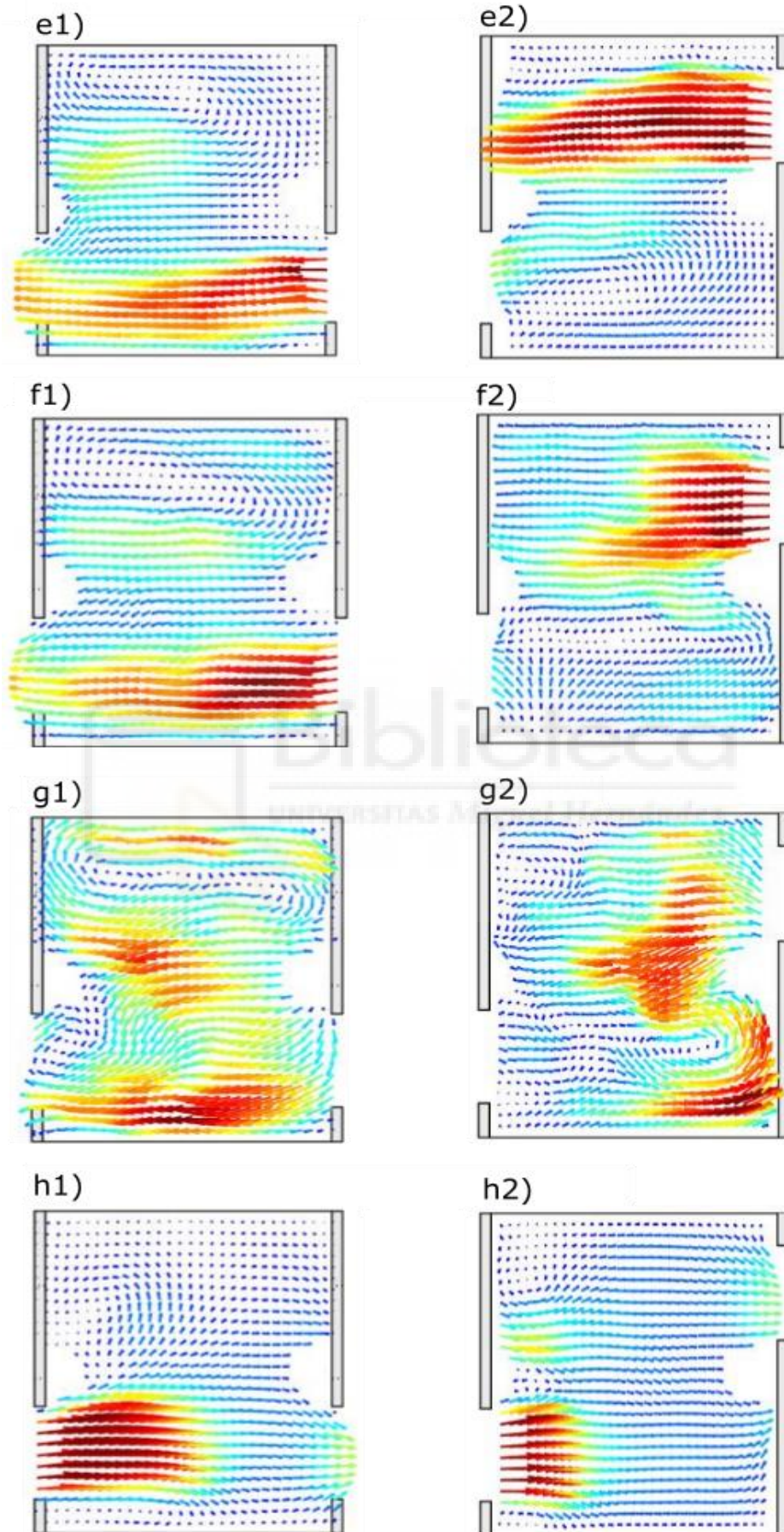


Fig. 24. Fases del ciclo oscilatorio de la geometría alineada (1) y de la geometría alternada (2).  $Re_{osc} = 375$ .

### 3.3 Resultados obtenidos en el flujo compuesto

Esta sección se centra en estudiar el efecto en los patrones de flujo de la superposición del caudal neto al flujo oscilatorio. Se ha utilizado el Reynolds oscilatorio y el neto para obtener el siguiente parámetro:

$$\Psi = \frac{Re_{osc}}{Re_n} \quad (8)$$

Este parámetro indica el peso del flujo oscilatorio sobre el flujo neto. Si  $\Psi > 1$ , se produce inversión del flujo, la cual es necesaria para que se produzca la formación periódica de vórtices en ambos sentidos del ciclo de oscilación. Al dejar fijo el parámetro del caudal neto a 10 kg/h y variar el de oscilación, deja un rango de estudio de  $0,4 < \Psi < 3,5$ .

A continuación, en las Fig. 25 y 26, los campos vectoriales de las dos geometrías de estudio en régimen laminar de flujo compuesto con un  $\Psi = 0,46$ .

En la Fase 1 (a1, a2) se puede apreciar el chorro principal discurriendo de izquierda a derecha, pero también apreciándose recirculaciones sobre todo en la geometría alternada (a2) en la parte superior del recinto. Esta fase marca el inicio del ciclo.

La Fase 2 (b1, b2) es una continuación de la figura anterior, todavía no comienza el cambio de dirección, pero poco a poco la velocidad del chorro se va reduciendo.

La Fase 3 (c1, c2) muestra como el chorro ya cambia de dirección su velocidad aún está más reducida y las recirculaciones son más acentuadas. Aunque el flujo neto intenta forzar al chorro a seguir desplazándose a la derecha en ambas geometrías mientras que la oscilación lo intenta cambiar de dirección.

La Fase 4 (d1, d2) es en la que se mezcla más el fluido, cómo el chorro no se aprecia y pasa a ser un recinto lleno de recirculaciones, el cambio tan repentino se debe a la naturaleza del flujo combinado.

En la Fase 5 (e1, e2) se inicia la segunda parte del ciclo, el chorro se inicia en el orificio derecho y discurre hacia la izquierda, no se observan recirculaciones.

En la Fase 6 (f1, f2) se expone el campo vectorial en el que se aprecia el chorro completamente formado de derecha a izquierda y recirculaciones apreciables en ambas geometrías sobre todo en la geometría alineada (f1).

En Fase 7 (g1, g2) se muestra el inicio del desplazamiento del chorro hacia la derecha, pudiendo verse claramente en ambas geometrías. Las recirculaciones que se producen en ambas también son destacables debido a la oscilación del flujo y a la posición de los deflectores.

Y con la Fase 8 (h1, h2) se termina el ciclo completo del flujo combinado para ambas geometrías dejándose ver como un chorro ya completamente formado se desplaza de izquierda a derecha chocando con el deflector en la geometría alternada (h2).



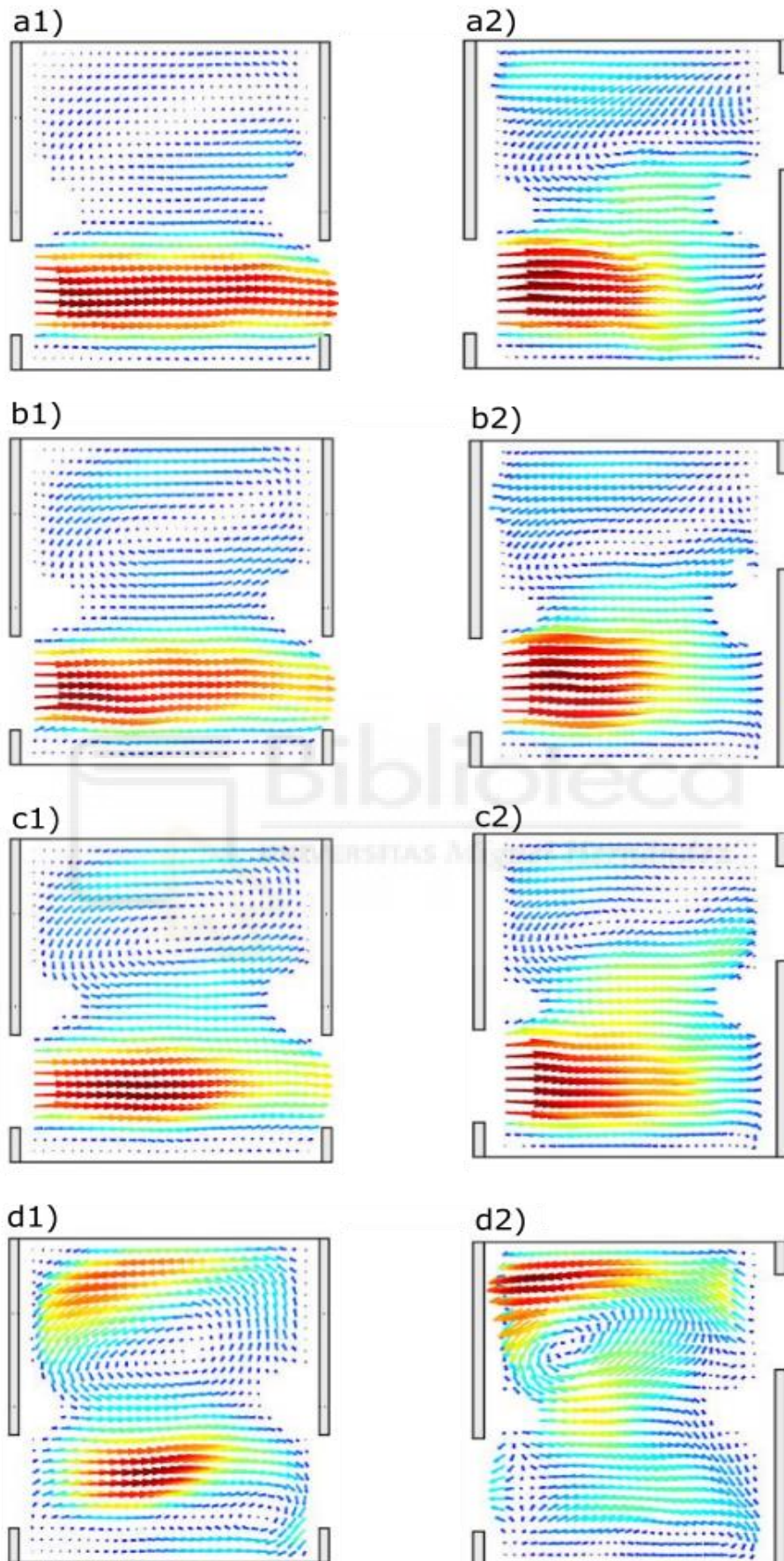


Fig. 25. Fases del ciclo combinado de la geometría alineada (1) y de la geometría alternada (2).  $Re_n = 110$ ,  $Re_{osc} = 51$ ,  $\Psi = 0,46$ .

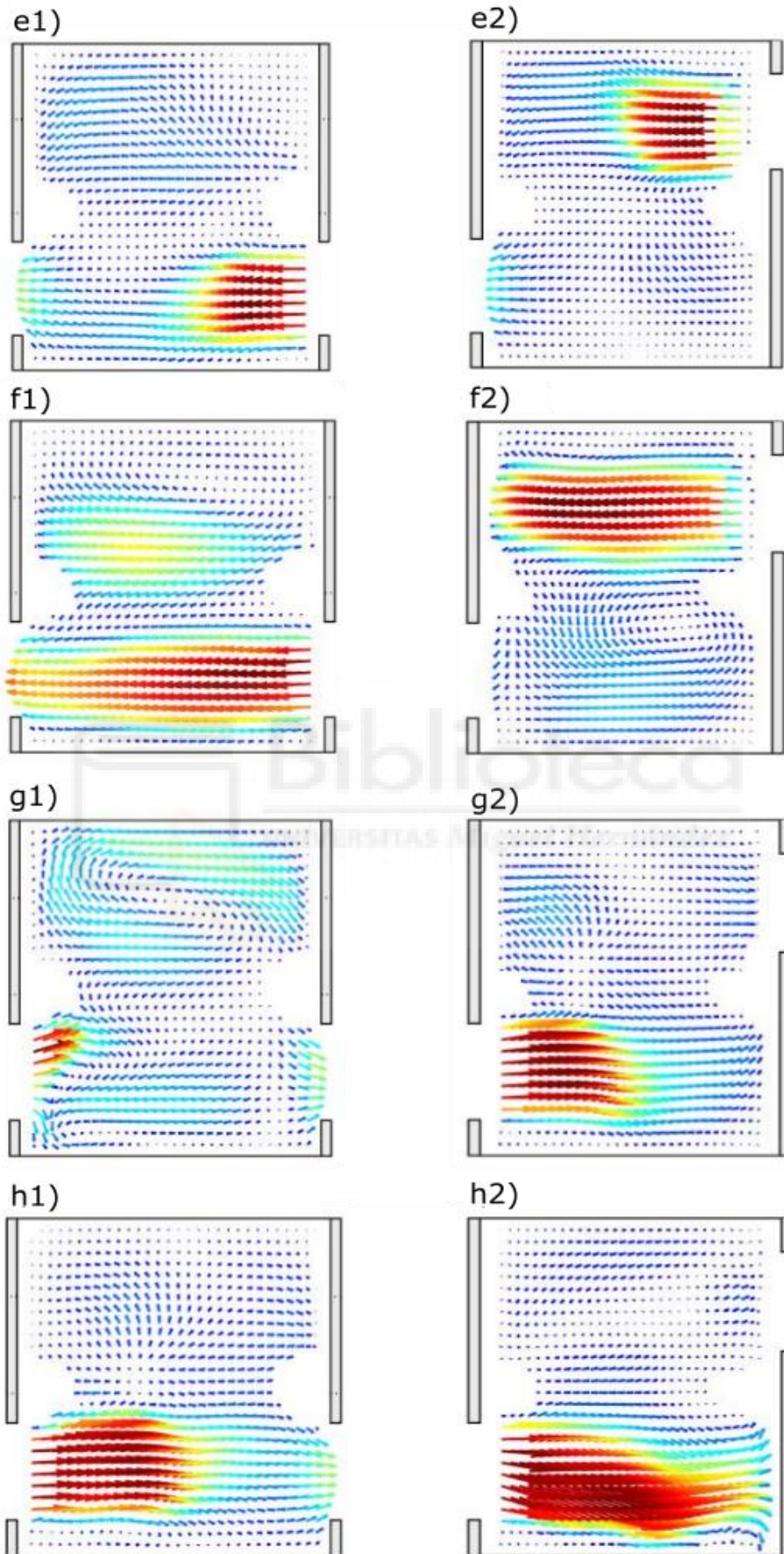


Fig. 26. Fases del ciclo combinado de la geometría alineada (1) y de la geometría alternada (2).  $Re_n = 110$ ,  $Re_{osc} = 51$ ,  $\Psi = 0,46$ .



Ahora se mostrarán, en las Fig. 27 y 28, los campos vectoriales obtenidos del flujo combinado de oscilatorio y neto en ambas geometrías cuando la relación es  $\Psi = 3,41$  lo cual da como resultado una inversión en el flujo como se comentaba al principio.

En Fase 1 (a1, a2) se puede apreciar el chorro principal discurre de izquierda a derecha, y como este choca con el deflector en la geometría alternada (a2) observándose también recirculaciones en la parte superior del recinto.

En la Fase 2 (b1, b2) todavía no comienza el cambio de dirección, pero poco a poco la velocidad del chorro se va reduciendo. Y las recirculaciones van en aumento tanto en número como en velocidad.

La Fase 3 (c1, c2) muestra como el chorro ya cambia de dirección, el flujo neto no permite que el chorro desaparezca todavía y por lo tanto la oscilación genera una gran recirculación en ambas geometrías, pero el chorro todavía puede verse, en la alineada (c1) frenándose antes de salir por el orificio derecho, y en alternada (c2) el chorro se puede decir que sigue la diagonal del recinto llegando a desaparecer antes de salir por el orificio.

La Fase 4 (d1, d2) marca el inicio del semiciclo en el que el chorro se desplaza de derecha a izquierda, se puede ver como el chorro empieza a entrar por el orificio.

En la Fase 5 (e1, e2) el chorro se inicia en el orificio derecho y discurre hacia la izquierda, en esta el chorro está más formado, se aprecian recirculaciones en las partes del recinto donde no se ubica el chorro.

La Fase 6 (f1, f2) expone el campo vectorial en el que se aprecia como el chorro se va deformando de derecha a izquierda y aparecen recirculaciones apreciables en ambas geometrías sobre todo en la geometría alineada (f1), esto es por el cambio de sentido en la oscilación, el chorro ve reducida su velocidad debido a la influencia del flujo neto.

La Fase 7 (g1, g2) muestra fases parecidas pero no en el mismo instante debido a la complejidad del flujo, en la geometría alineada (g1) el chorro comienza a formarse y se pueden apreciar numerosas recirculaciones tanto en la parte superior como inferior del recinto, en la geometría alternada (g2), las recirculaciones que se producen también son destacables debido a la oscilación del flujo y a la posición de los deflectores, pero además tenemos formado un chorro en la parte inferior del recinto que choca contra los deflectores.

Y con la Fase 8 (h1, h2) se pone fin al ciclo completo del flujo combinado para ambas geometrías, dejándose ver como un chorro ya completamente formado se desplaza de izquierda a derecha.



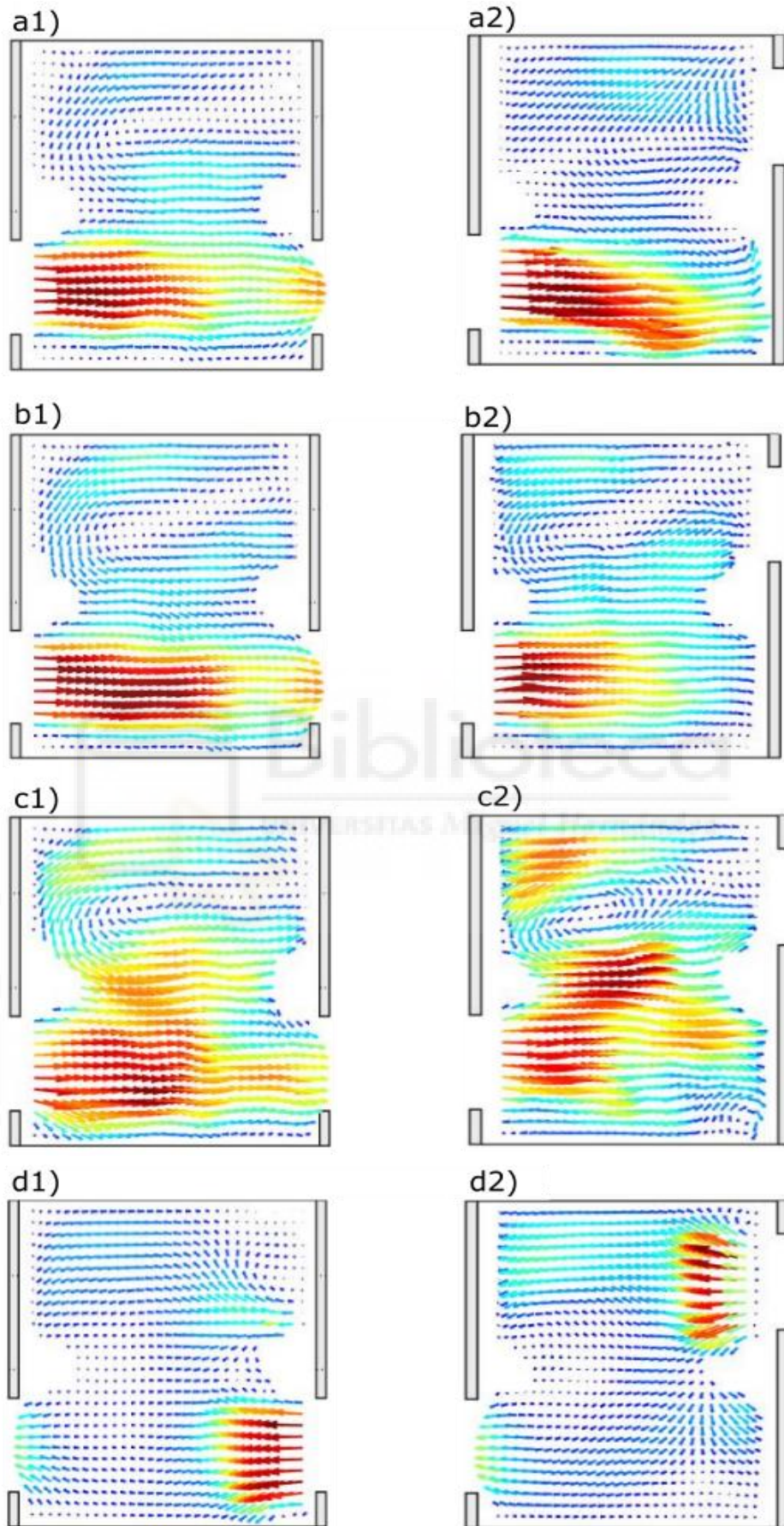


Fig. 27. Fases del ciclo combinado de la geometría alineada (1) y de la geometría alternada (2).  $Re_n = 110$ ,  $Re_{osc} = 375$ ,  $\Psi = 3,41$ .

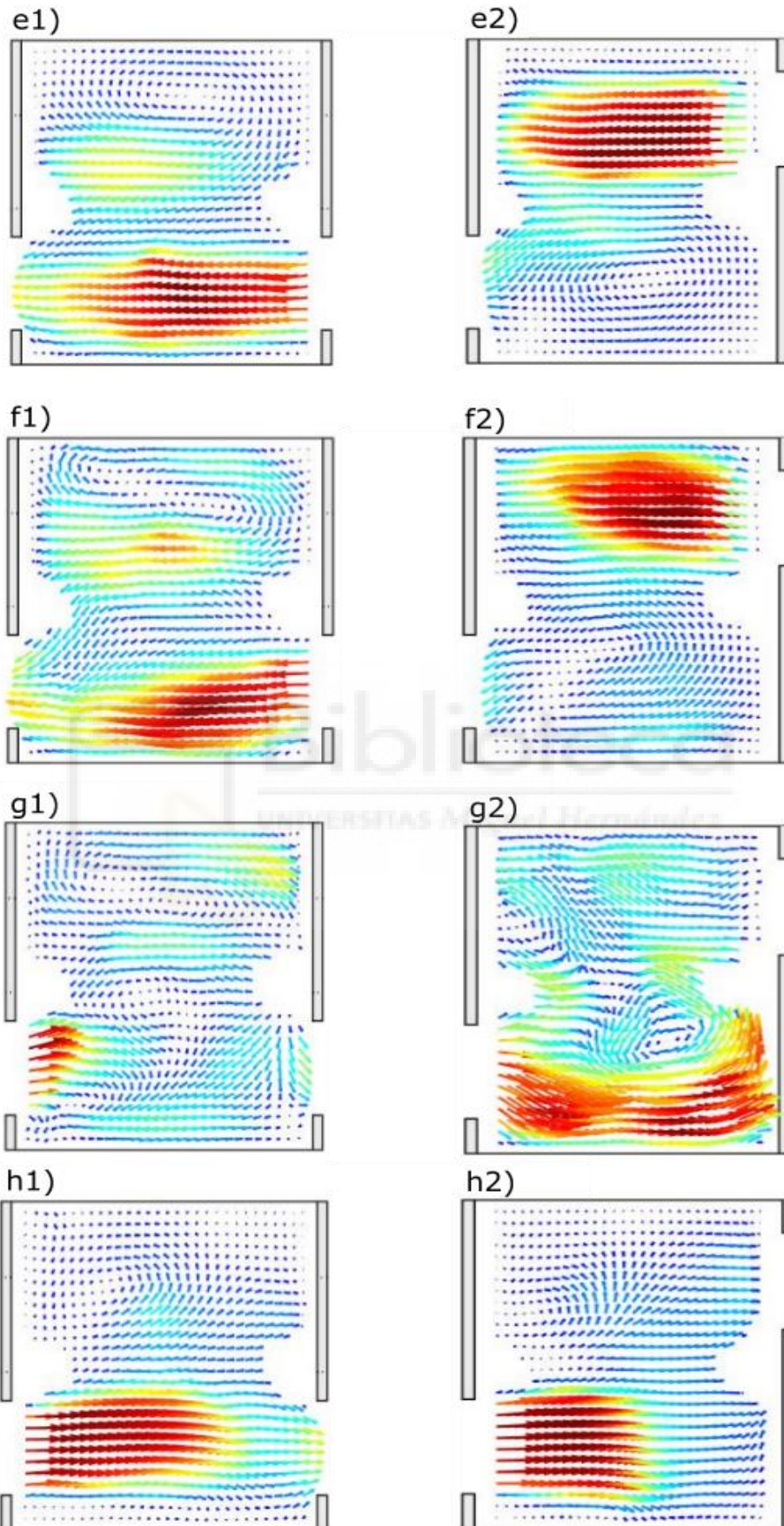


Fig. 28. Fases del ciclo combinado de la geometría alineada (1) y de la geometría alternada (2).  $Re_n = 110$ ,  $Re_{osc} = 375$ ,  $\Psi = 3,41$ .

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

---

Las conclusiones obtenidas de la realización del presente proyecto son las siguientes:

1. Se ha conseguido un correcto funcionamiento y puesta a punto de la instalación experimental para las dos geometrías estudiadas en laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Miguel Hernández.
2. Se ha estudiado la metodología de PIV para la realización de los ensayos y obtención de unos resultados fiables.
3. Se ha trabajado con Matlab y PIVlab en este proyecto para el procesado e interpretación de los resultados.
4. Se ha definido una metodología para los ensayos de tubos con geometrías multiorificio en el interior de estos. La cual permite el estudio de ensayos con los tres tipos de caudal estudiados en el proyecto.
5. Se ha estudiado el flujo de un caudal neto en una geometría de tres agujeros equidistantes dispuesta de forma consecutiva y alternada con referencia a los agujeros de la geometría para un total de 3 puntos los cuales se caracterizan por tener diferentes velocidades de caudal para así poder observar la evolución de este con respecto al número de Reynolds.
6. Se ha estudiado el flujo de un caudal oscilatorio en una geometría de tres agujeros equidistantes dispuesta de forma consecutiva y alternada con referencia a los agujeros de la geometría para un total de 3 puntos. Estos puntos basan su diferencia en la frecuencia de oscilación del caudal, esto permite observar las diferencias entre distintos números de Reynolds oscilatorio.
7. Se ha estudiado el flujo de un caudal combinado, superponiendo caudal oscilatorio y caudal neto, en una geometría de tres agujeros equidistantes dispuesta de forma consecutiva y alternada, con referencia a los agujeros de la geometría, para 3 puntos en los cuales el caudal neto permanece constante a 10 kg/h y se varía la frecuencia de oscilación del caudal oscilatorio. Se puede observar, así como el evoluciona la relación entre los Reynolds neto y oscilatorio variando únicamente uno de los dos parámetros.

8. Se han obtenido una serie de resultados que permiten conocer el comportamiento del flujo en los reactores químicos de flujo oscilatorio, cuyo potencial radica en la asociación de este conocimiento con otros resultados de pérdida de carga o de transferencia de calor.
9. Por último, la técnica de PIV proporciona en general una información tremendamente valiosa al ser complementada con ensayos termohidráulicos y simulaciones numéricas ya que permite un estudio global de las geometrías u otro tipo de dispositivos introducidos en los reactores químicos.



## CAPÍTULO 5. ANEXOS

Este anexo será dedicado únicamente a la recopilación de todo el código utilizado en Matlab, gran parte de este código ha sido programado por José Muñoz Cámara, doctor por la Universidad Politécnica de Cartagena, y modificado en pequeña medida por Jesús Corella García, autor de este trabajo, para adaptarlo a los ensayos realizados.

Script preprocess\_background:

```
% Script de preprocesado (no filtrado) de las imágenes:
% B) Permite eliminar el fondo de la imagen (obstáculos, reflejos, etc.)

%%
%-----ENTRADAS-----%

% Parámetros del procesado
n_ref=4; % Número de imágenes con las que comparar
n_trat=6000; % Número de imágenes a tratar (si es 0 analiza todas las del fichero)
step_imag=1; % Paso entre imágenes a utilizar. Por si no queremos analizar luego todas

% Ubicaciones y nombres:
% folder_load='\2-Added images\'; % Carpeta donde están las imágenes sin tratar
folder_load='\1-Raw images\';
folder_save='\3-Processed images\'; % Carpeta donde se guardarán las imágenes tratadas
name_imag_load='ImgA'; % Nombre común de las imágenes a tratar
name_imag_save='ImgA'; % Nombre común que poner a las imágenes guardadas

%%
%- Cargamos la imagen a tratar

ubi_general=pwd; % ubicación actual del script
ubi_cargar=strcat(ubi_general, folder_load); % Ubicación con las imágenes

n_snap=length(dir(ubi_cargar))-2; % Número de imágenes a tratar (contamos los .tiff que hay, siempre
suma dos de más)

if n_trat~=0
    n_imag=n_trat;
else
    n_imag=n_snap;
end

step_ref=floor(n_snap/(n_ref+1)); % Calculo el intervalo según el cual cargo las referencias

i_snap_new=1; % Número de la imagen tratada

f = waitbar(0,'Please wait...');

for i_snap=0:step_imag:(n_imag-1*0) % Para cada una de las imágenes a tratar

waitbar(i_snap/(n_imag-1),f,'Please wait...');

imag=imread(strcat(ubi_cargar,name_imag_load,num2str(i_snap,'%06d'),'tiff')); % Cargo la imagen a
tratar
...
```

```

...
trat=imag-imag; % Inicio la variable imagen tratada con el tamaño de la imagen y 0 en cada
elemento
for i_ref=1:step_ref:(n_snap-1) % Recorro y resto las imágenes a intervalos regulares
ref=imread(strcat(ubi_cargar,name_imag_load,num2str(i_ref,'%06d'),'tif')); % Cargo otra imagen de la
misma serie
trat=max(trat,imag-ref);
% Resto la imagen a la que voy a tratar y solamente me quedo con los valores
% que son superiores a la 'acumulada' (así evito eliminar píxeles válidos)
end

ubi_guardar=strcat(ubi_general,folder_save,name_imag_save,num2str(i_snap_new-1,'%06d'),'tif');
imwrite(trat,ubi_guardar)

i_snap_new=i_snap_new+1;

end

close(f)

```

### Script PIV\_Main

```

%% OPCIONES DEL PROGRAMA
geom='MH3_2021'; % Geometría analizada
folder_set='NETO\'; % Carpeta donde están los tests
folder_sorted='P1\'; % 'Ciclos\|Fases\ ' -Orden de los datos a analizar (por ciclos o por fases)
puntos_PIV=[1]; % Números de los test a analizar
number_data=8; % Número de ciclo/fase a analizar
net_osc=1; % Es el caso con neto más oscilatorio?? [1=SÍ]

ini_snap=1; % Instantánea a partir de la cual (incluida) empezamos a cargar datos
fin_snap=6000; % Número máximo de campos de velocidades a cargar % (20 cuando son fases)

step_snap=2; % Indica el paso (en imágenes) entre campos de velocidad consecutivos (1=periodo del
láser, 2=doble del periodo del láser)

number_perfil=1; % Número de perfiles de velocidad computados para el cálculo del caudal

calculo_error=0; % 1=Realiza la estimación de la incertidumbre
use_S2N=0; % 1=Se utiliza el filtrado en base al signal to noise ratio
PPR_limit=1.5; % Límite del S2N ratio utilizado para descartar puntos

% ---> Opciones del algoritmo POD:
calculo_POD=0; % 1=Se realiza la descomposición en modos principales
MODE_0=0; % 1=Tenemos en cuenta el campo medio. 0=No lo tenemos en cuenta (PARA ANÁLISIS
POD)
energy_fraction=90; % Fracción de energía que quiero captar con los modos POD para cada Re
n_modes=10; % Si queremos imponer el número de modos (independientemente de la fracción de
energía que representan)
% Si es 0 usa el criterio de fracción de energía

%% Datos instalación
D=32; % Diámetro interior (mm)
esp=1; % Espesor de los deflectores (mm)
Fs=2.8e3; % Frecuencia de muestreo de la señal de posición (Hz)

if strcmp(geom,'MH1')==1
l_celda=1.5*D;
elseif strcmp(geom,'MH3')==1
l_celda=27.7;
...

```



```

...
elseif strcmp(geom,'MH3_2021')==1
    l_celda=27.7;
elseif strcmp(geom,'MH3_b')==1
    l_celda=27.7;
end

d_p=50*10^(-6); % Diámetro de las partículas (m)
rho_p=1016; % Densidad de las partículas (kg/m3) [TFG José Manuel Pedrero]
g=9.81; % Aceleración gravitatoria (m/s2)

D_e_cil=32; % Diámetro de la cámara del cilindro (mm)
D_i_cil=12; % Diámetro del vástago del cilindro (mm)

%% ---DIRECTORIOS-INFORMACIÓN---
% Carpetas
folder_gen='DATOS_VELOCIDAD\'; % Carpeta donde están TODOS los sets de tests
folder_s2n='Signal2noise\'; % Carpeta con los datos de signal 2 noise ratio
% Nombres de archivos
file_general='ORIGEN_IMAGEN.xlsx'; % Abrimos el excel con los registros de datos
% Directorios
dir_set=strcat(pwd,'\ ',folder_gen,'\ ',geom,'\ ',folder_set); % Directorio donde se encuentran los tests
% Dirección completa de un archivo
datos_gen=xlswrite(strcat(dir_set,file_general)); % Dirección completa con los datos generales

%% ---DIFERENCIAMOS LA FORMA DE TRATAR LOS DATOS

% Si es neto el formato de la dirección es distinto
if isequal(folder_set(1:4),'NETO') % Diferenciamos el caso neto y el oscilatorio
    folder_data="";
    folder_sorted="";
else
    folder_data=strcat(folder_sorted(1:end-2),num2str(number_data,'\')); % Nombre de la carpeta con
    los campos de velocidad
end
% Si no es oscilatorio ordenado por ciclos se aplican algoritmos distintos
if (isequal(folder_sorted,'Ciclos'))&& not(isequal(folder_set(1:4),'NETO'))
    test_case='osc';
else
    test_case='net';
end

%% ---INICIALIZACIÓN DE VARIABLES---

% E_mode=zeros(1,3000);
% E_mode2=zeros(1,300)
%%
for n=1:length(puntos_PIV)
    n
    %% DATOS GENERALES DE LAS IMÁGENES

    fila_video=find(datos_gen(:,1)==puntos_PIV(n)); % Encontramos la fila que corresponde al punto
    ensayado

    CONC=datos_gen(fila_video,2); % Concentración de propilenglicol (%)
    frame_rate=datos_gen(fila_video,3); % Frecuencia de adquisición imágenes (Hz)
    xprima_pix=datos_gen(fila_video,4); % Coordenada X del origen del tanque (esquina superior
    izquierda)
    ...

```

```

...
yprima_pix=datos_gen(fila_video,5); % Coordenada X del origen del tanque (esquina superior
izquierda)

px_l=datos_gen(fila_video,6); % Número de píxeles que mide el espacio entre deflectores (pix)
px_D=datos_gen(fila_video,7); % Número de píxeles que mide el diámetro (pix)

frame_step=1/frame_rate; % Paso de tiempo entre instantáneas consecutivas, mismo par (s)
time_step=step_snap*frame_step; % Paso de tiempo entre campos de velocidad, pares consecutivos (s)
% rate_POD=frame_rate/step_snap; % Paso de tiempo utilizado en el análisis POD

px2m=(D/1000)/px_D; % Equivalencia: m/pix
pxf2ms=px2m/frame_step; % Equivalencia: (m/s)/(pix/imag)

%% DATOS ESTACIONARIOS-DATALOGGER
clear datos_est

folder_test=strcat('P',num2str(puntos_PIV(n)),'\'); % Carpeta con el test de interés
dir_test=strcat(dir_set,folder_test); % Directorio del test de interés

datalogger=strcat(dir_test,'P',num2str(puntos_PIV(n)),'.csv');
datos_est=xlsread(datalogger);

tfe=mean(datos_est(:,1)); % Temperatura del fluido a la entrada
tfs=mean(datos_est(:,2)); % Temperatura del fluido a la salida
m=mean(datos_est(:,3))/3600; % Caudal másico (kg/s)

tfm=(tfe+tfs)/2; % Temperatura media del fluido en la sección de ensayo
prop=f_propy_mix_jmc(tfm,CONC);
rho=prop(1);
mu=prop(2);

u_m(n)=m/rho/(pi*(D/1000)^2/4); % Velocidad media del flujo (m/s)
Re_n(n)=4*m/(pi*(D/1000)*mu); % Reynolds neto
q_net=m/rho; % Caudal neto (m3/s)

%% DATOS DINÁMICOS-TARJETA DE ADQUISICIÓN
if ~isequal(folder_set(1:4),'NETO')

    name_excel= strcat(dir_test,'posicion',num2str(puntos_PIV(n)),'.xlsx');
    name_matlab= strcat(dir_test,'posicion',num2str(puntos_PIV(n)),'.mat');

    PIV_posicion;

    u_osc(n)=2*pi*freq(n)*x_0(n);
    Re_osc(n)=rho*(2*pi*freq(n)*x_0(n))*(D/1000)/mu; % Reynolds oscilatorio
else
    freq(n)=0;x_0(n)=0;
    Re_osc(n)=0;
end

%% DATOS CAMPOS DE VELOCIDADES

clear datos_brutospiv x y U V
clear u_fluct v_fluct u_mean v_mean
i=1;
for i_snap=ini_snap:fin_snap

...

```

```

...
    dir_campos=strcat(dir_test, folder_sorted, folder_data); % Directorio con los campos de velocidad

    name_num=num2str(i_snap,'%04d'); % Número de la imagen a cargar
    filename=strcat(dir_campos,'PIVlab_',name_num,'.txt'); % Nombre del fichero a cargar

    if exist(filename)==2
        datos_brutospiv = dlmread(filename, '', 1, 0); % Líneas que saltar x
        % ANTES (3/3/21):
        % x_raw=(datos_brutospiv(:,1)-xprima_pix)*px2m*1000; % Posición (mm)
        % y_raw=(datos_brutospiv(:,2)-yprima_pix)*px2m*1000;

        x_raw=(datos_brutospiv(:,1)-xprima_pix);
        y_raw=(datos_brutospiv(:,2)-yprima_pix);
        U_raw(:,i)=datos_brutospiv(:,3)*pxf2ms;
        V_raw(:,i)=datos_brutospiv(:,4)*pxf2ms;

        i=i+1;
    else
        break;
    end
end

[n_windows n_snap]=size(U_raw);

% Datos con el signal-to-noise ratio
if use_S2N==1
    clear PPR_raw PPR
    dir_s2n=strcat(dir_campos, folder_s2n, 'PPR_results_1');
    load(dir_s2n)
    PPR_raw=PPR;
    clear PPR
else
    PPR_raw=U_raw./U_raw*10;
end

%% Numero de filas y columnas de datos en la imagen (están todos seguidos en los vectores x, y, U, V.)
[number_x_raw, number_y_raw]=f_row_col(x_raw);

%% GIRO

giro_vertical;

%% ESCALADO

x_raw=x_raw*px2m*1000; % Posición (mm)
y_raw=y_raw*px2m*1000;
%
%% Añadimos las condición de velocidad nula en las paredes
x=zeros(number_x_raw*(number_y_raw+2),1);
y=zeros(number_x_raw*(number_y_raw+2),1);
U=zeros(number_x_raw*(number_y_raw+2),n_snap);
V=zeros(number_x_raw*(number_y_raw+2),n_snap);
PPR=zeros(number_x_raw*(number_y_raw+2),n_snap);

for i_zero=1:number_x_raw
    % Puntos de velocidad nula
    row1=(i_zero-1)*(number_y_raw+2)+1;
...

```

```

...
    row2=i_zero*(number_y_raw+2);
    x([row1 row2])=x_raw((i_zero-1)*number_y_raw+1);
    y(row1)=0;
    y(row2)=D;
    U([row1 row2,:])=0;
    V([row1 row2,:])=0;
    PPR([row1 row2,:])=Inf;
    % Puntos de velocidad medida
    x(row1+1:row2-1)=x_raw((i_zero-1)*number_y_raw+1:i_zero*number_y_raw);
    y(row1+1:row2-1)=y_raw((i_zero-1)*number_y_raw+1:i_zero*number_y_raw);
    U(row1+1:row2-1,:)=U_raw((i_zero-1)*number_y_raw+1:i_zero*number_y_raw,:);
    V(row1+1:row2-1,:)=V_raw((i_zero-1)*number_y_raw+1:i_zero*number_y_raw,:);
    PPR(row1+1:row2-1,:)=PPR_raw((i_zero-1)*number_y_raw+1:i_zero*number_y_raw,:);
end

[number_x,number_y]=f_row_col(x);

%% ---PERFIL DE VELOCIDAD A UNA DISTANCIA AXIAL DADA---

y_perfil=y(1:number_y)';

if number_perfil==1
    x_perfiles=mean([min(x) max(x)]);
else
    l_perfil_caudal=(max(x)-min(x))/number_perfil;
    x_perfiles=linspace(min(x)+l_perfil_caudal/2,max(x)-l_perfil_caudal/2,number_perfil);
end

caudal_av=zeros(1,n_snap);

for i_snap=ini_snap:ini_snap+n_snap-1

    U4perfil=U(:,i_snap);

    for i_perfil=1:number_perfil

        xperfil=x_perfiles(i_perfil); % POSICION DEL PERFIL

        for i=1:length(y_perfil)
            % rhesape convierte el vector x en matriz % interp2(x,y,u_mean',xperfil, yperfil)
        U_perfil_y(i_snap,i)=interp2(reshape(x,number_y,number_x),reshape(y,number_y,number_x),reshape
        (U4perfil,number_y,number_x),xperfil,y_perfil(i)) ;
        end

        % Cálculo del caudal instantáneo
        U_perfil=U_perfil_y(i_snap,:);
        PIV_caudal
        caudal_av(i_snap)=caudal_av(i_snap)+caudal_PIV(i_snap);
        % Cálculo del perfil adimensional (para cada fase del ciclo de
        % oscilación)
        U_perfil_fase(i_snap,:)=U_perfil_y(i_snap,:)/(2*pi*freq(n)*x_0(n));
    end
end

caudal_av=caudal_av/number_perfil;

...

```

```

...
%% Datos de perfiles para todos los puntos

r_perfil=(y_perfil-D/2)/D;
r_perfil_t(n,:)=r_perfil;
if strcmp(folder_set,'OSCILATORIO\')
    U_perfil_t(n,:)=mean(U_perfil_fase);
    U_perfil_fase_std(n,:)=std(U_perfil_fase);
else
    U_perfil_t(n,:)=-mean(U_perfil_y)/u_m(n); % Perfil adimensional para cada punto
    U_perfil_fase_std(n,:)=std(U_perfil_y/u_m(n));
end

%% POSICIÓN EN QUE SE INICIA EL CICLO (MÁXIMA VELOCIDAD)
if isequal(test_case,'osc')
    PIV_inicio_ciclo
end

%% CÁLCULO DEL VELOCITY RATIO y DEL COEFICIENTE DE ASIMETRÍA (para cuantificar
el mezclado)

y_eje=D/2; % Posición vertical del eje axial
PIV_vratio

PIV_asimetria

%% ---CAMPO DE VELOCIDAD PROMEDIO Y FLUCTUANTE
%---(con todos los puntos)

if isequal(test_case,'net')
    % Se subtrae la componente media de velocidad en cada nodo
    U_mean=mean(U,2); % Velocidad axial media
    V_mean=mean(V,2); % Velocidad radial media

    for i=1:length(x)
        u_fluct(i,:)= U(i,:)-U_mean(i); % Componente fluctuante axial
        v_fluct(i,:)= V(i,:)-V_mean(i); % Componente fluctuante radial
    end
end

for i_mean=1:length(x)

%---Aplicamos criterio S2n
clear valid_s2n
clear u_valid v_valid
valid_s2n=PPR(i_mean,:)>PPR_limit;
if sum(valid_s2n)==0
    [maximo_valid_s2n]=max(PPR(i_mean,:));
end

%---Aplicamos criterio de rechazo
u_valid=f_chauvenet(U(i_mean,valid_s2n));
v_valid=f_chauvenet(V(i_mean,valid_s2n));
U_mean2(i_mean,1)=mean(u_valid);
V_mean2(i_mean,1)=mean(v_valid);
end

%% ---INTENSIDAD TURBULENTO EN UN PUNTO FIJADO---
clear U_q V_q

...

```

```

...
if isequal(test_case,'net')
    % Coordinadas del punto de interés
    xq=(max(x)-min(x))/2;
    yq=(max(y)-min(y))/2;
    for i_IT=1:n_snap
        U_q(i_IT)=
interp2(reshape(x,number_y,number_x),reshape(y,number_y,number_x),reshape(U(:,i_IT),number_y,
number_x),xq,yq);
        V_q(i_IT)=
interp2(reshape(x,number_y,number_x),reshape(y,number_y,number_x),reshape(V(:,i_IT),number_y,
number_x),xq,yq) ;
    end
    U_meanq=mean(U_q);
    V_meanq=mean(V_q);
    u_rmsq=((sum((U_q-U_meanq).^2))/n_snap)^0.5;
    v_rmsq=((sum((V_q-V_meanq).^2))/n_snap)^0.5;
    TI_uq(n)=u_rmsq/abs(U_meanq);
    TI_vq(n)=v_rmsq/abs(V_meanq);
end
%% ---CÁLCULO DEL ERROR ASOCIADO A PIV---%
PIV_error

%% ---CÁLCULO DE LOS MODOS POD---%
if isequal(test_case,'net')
    PIV_POD
end

%% Para gráficas:
x_plot=l_celda-esp-x;
y_plot=y;

% Adimensionalizamos las distancias
x_adim=x_plot/D;
r_adim=(y_plot-D/2)/D

end

```

### Función PIV\_Posicion

```

% REALIZA VARIOS CÁLCULOS SOBRE LA SEÑAL DE POSICIÓN:
%-AMPLITUD Y FRECUENCIA
%-VELOCIDAD Y ACELERACIÓN INSTANTÁNEA

%---OPCIONES DEL PROGRAMA---%
create_graphs=0; % Opción de representar gráficas

filtrado_p='s'; % Opciones de filtrado señal de posición: 's'=smoothing ; 'f'=filtro pasa baja
windowSize=100; % Ventana para smoothing (número de puntos)
signal_energy=90; % Indicamos el porcentaje de la energía de la señal que queremos captar

%% Relación de área tubo-cilindro

rel_A=(D_e_cil^2-D_i_cil^2)/D^2; % Relación de áreas entre cilindro y tubo de ensayo
%%
% %--- CARGA DE DATOS ---%

clear datos_brutos posicion

% Datos alta velocidad (DAQ)
...

```

```

...
if exist(name_matlab)==2
    disp('Abriendo ARCHIVO MATLAB')
    load(name_matlab,'-mat');
else
    if exist(name_excel)==2
        datos_brutos=xlsread(name_excel); % Cargamos datos del caso correspondiente
        save(name_matlab,'datos_brutos')
        disp('Abriendo ARCHIVO EXCEL')
    end
end

posicion=(datos_brutos(:,1)-mean(datos_brutos(:,1)))*rel_A; % Centramos en 0 la posición (mm)!!!

%%
%---ANÁLISIS PRELIMINAR (FFT) DE LAS SEÑALES ENTRANTES---
clear Y f ny

nft=100*10^3; % Longitud de la FFT (número de armónicos)
Y=fft(posicion,nft); % Realizamos la transformada
Y=Y(1:nft/2); % La FFT es simétrica (nos quedamos con la primera mitad)
ny=abs(Y).^2; % Tomamos el valor absoluto de la FFT ?al CUADRADO???
f=(0:nft/2-1)*Fs/nft; % Construimos el vector con las frecuencias correspondientes de la FFT
[max_ny, ind]=max(ny); % Calculamos la frecuencia de mayor energía y el índice de la misma
freq(n)=f(ind); % Frecuencia de mayor energía y por tanto la de oscilación

%%
%---FILTRADO DE SEÑALES DE DAQ---
clear posicion_fil

switch filtrado_p
    case 's'
        % ->Smoothing
        posicion_fil=smooth(posicion>windowSize); % Cálculo del smoothing centrado.
    case 'f'
        % ->Filtro pasa baja
        % freq_pasa_baja=6;
        lpFilt = designfilt('lowpassfir','FilterOrder',8, ...
            'PassbandFrequency',freq_pasa_baja,'PassbandRipple',0.2, ...
            'SampleRate',Fs);
        posicion_fil=filter(lpFilt,posicion);
    otherwise
        display('Error en selección del tipo de filtrado')
end

%%
%--- CÁLCULOS ---%
clear time_daq
clear velocidad time_v
clear aceleracion time_a

incre_t=1/Fs; % Paso temporal entre cada muestra (s)
time_daq=linspace(0,incre_t*(length(posicion)-1),length(posicion)); % Vector tiempo (s)
period=1/freq(n); % Calculamos el periodo (s)

x_0(n)=(max(posicion_fil)-min(posicion_fil))/2/1000; % Amplitud (centro-pico) (m)

%%
% Cálculo de la VELOCIDAD
...

```

```

...
k_l_pro=266;
k_l_pro=20;
l_prov=floor(k_l_pro/freq(n));
l=1;
calculo_vel=2;
for k=(calculo_vel*l_prov+1):(length(posicion_fil)-calculo_vel*l_prov)
% velocidad(l)=(posicion_fil(k+l_prov)-posicion_fil(k-l_prov))/(l_prov*2*1/Fs)/1000; %
Velocidad (m/s)
    velocidad(l)=(-posicion_fil(k+2*l_prov)+8*posicion_fil(k+l_prov)-8*posicion_fil(k-
l_prov)+posicion_fil(k-2*l_prov))/(12*l_prov*1/Fs)/1000;
    time_v(l)=time_daq(k);
    l=l+1;
end

%%
% Cálculo de la ACELERACIÓN
k_l_proa=266;
l_proa=floor(k_l_proa/freq(n));
l=1;
for k=(l_proa+1):(length(posicion_fil)-l_proa)
    aceleracion(l)=(posicion_fil(k+l_proa)-2*posicion_fil(k)+posicion_fil(k-
l_proa))/(l_proa*1/Fs)^2; % Aceleración (m/s^2)
    time_a(l)=time_daq(k);
    l=l+1;
end
aceleracion_fil=smooth(aceleracion>windowSize);

%%
% Cálculo de la velocidad media máxima del flujo
v_max_cal=max(velocidad); % Máxima velocidad calculada numérica
v_max_teo=x_0*2*pi*freq(n); % Máxima velocidad teórica a partir de la posición

A=pi*(D/1000)^2/4; % Área del tubo de ensayo (m2)
q_max_teo=v_max_teo*A; % Caudal máximo teórico (m3/s)

```

### Función giro\_vertical

```

% figure(1)
% title('VERTICAL-Original')
% quiver(x_raw,y_raw,U_raw(:,1),V_raw(:,1))
% axis equal

% clear

% CAMBIO DE COORDENADAS

x_raw_p=y_raw;
y_raw_p=px_D-x_raw;
U_raw_p=V_raw;
V_raw_p=-U_raw;

% figure(2)
% title('Horizontal')
% quiver(x_raw_p,y_raw_p,U_raw_p(:,1),V_raw_p(:,1))
% axis equal

% ORDENO SEGÚN COORDENADA X CRECIENTE

[x_raw_newx ind]=sort(x_raw_p);
...

```



```

...
y_raw_newx=y_raw_p(ind);
U_raw_newx=U_raw_p(ind,:);
V_raw_newx=V_raw_p(ind,:);

number_y_raw_new=number_x_raw;
number_x_raw_new=number_y_raw;

% ORDENO SEGÚN COORDENADA Y CRECIENTE

for i=1:number_x_raw_new
    i
    rango=(number_y_raw_new*(i-1)+1):(number_y_raw_new*(i-1))+number_y_raw_new;
    [y_raw_newy(rango,1) indy]=sort(y_raw_newx(rango,1));

    valor_refl=(i-1)*number_y_raw_new;
    x_raw_newy(rango,1)=x_raw_newx(valor_refl+indy,1);
    U_raw_newy(rango,:)=U_raw_newx(valor_refl+indy,:);
    V_raw_newy(rango,:)=V_raw_newx(valor_refl+indy,:);
end

% figure(3)
% title('Horizontal-Ordenada')
% quiver(x_raw_newy,y_raw_newy,U_raw_newy(:,1),V_raw_newy(:,1))
% axis equal

% ACTUALIZAMOS VARIABLES

x_raw=x_raw_newy;
y_raw=y_raw_newy;
U_raw=U_raw_newy;
V_raw=V_raw_newy;

number_x_raw=number_x_raw_new;
number_y_raw=number_y_raw_new;

```

### Función PIV\_caudal

```

%-2) Obtenemos medio perfil de velocidad que es simétrico sacando la media de las dos
% mitades experimentales

% a) Divido en dos mitades que van de 0 a D/2
clear U_perfil_1 U_perfil_2 y_perfil_1 y_perfil_2
U_perfil_1=U_perfil(y_perfil<(D/2));
y_perfil_1=y_perfil(y_perfil<(D/2));
U_perfil_2(2:sum(y_perfil>(D/2))+1)=U_perfil(y_perfil>(D/2));
y_perfil_2(2:sum(y_perfil>(D/2))+1)=abs(y_perfil(y_perfil>(D/2))-D);

% b) Completo con el punto del centro del tubo
U_centro=interp1(y_perfil,U_perfil,D/2);
y_perfil_1(end+1)=D/2;
U_perfil_1(end+1)=U_centro;
y_perfil_2(1)=D/2;
U_perfil_2(1)=U_centro;

% c) Interpolo a lo largo del perfil y promedio los dos medios perfiles
n_puntos_q=101; %Número de puntos a lo largo de los cuales hago la integración
clear y_caudal u_caudal_1 u_caudal_2 u_caudal
y_caudal=linspace(0,D/2,n_puntos_q);
u_caudal_1=interp1(y_perfil_1,U_perfil_1,y_caudal,'spline');
...

```

```

...
u_caudal_2=interp1(y_perfil_2,U_perfil_2,y_caudal,'spline');
u_caudal=(u_caudal_1+u_caudal_2)/2;

%-Multiplico cada componente de esa función por el área de la corona
% circular correspondiente
clear area_i caudal_i
paso_q=D/(n_puntos_q-1)/2; % Espesor de cada espacio anular (mm)
area_i=pi*((2*(D/2-y_caudal)+paso_q).^2-(2*(D/2-y_caudal)-paso_q).^2)/4; % Área de cada sección
(mm^2)
area_i(1)=pi*(D^2-(D-paso_q)^2)/4; % Área del espacio anular más exterior (mm2)
area_i(n_puntos_q)=pi*paso_q^2/4; % Área del círculo central (mm2)
caudal_i=u_caudal.*area_i*10^(-6); % Caudal en cada sección (m3/s)
%-Sumo el caudal correspondiente a cada punto
caudal_PIV(i_snap)=sum(caudal_i);

```

### Función PIV\_inicio\_ciclo

```

clc;
clear time

% DETERMINA EN QUÉ IMAGEN SE PRODUCE EL MÁXIMO DE VELOCIDAD (INICIO DEL
CICLO)

% time=linspace(0,time_step*10*puntos_ciclo,10*puntos_ciclo); % Vector tiempo (cojo diez ciclos
promediados)
caudal_ciclos=[caudal_av];
time=linspace(0,(length(caudal_ciclos)-1)*time_step,length(caudal_ciclos));

ampl_caudal_est=(max(caudal_av)-min(caudal_av))/2;

% Ajuste a seno (CAUDAL)
if net_osc==0
    % FLUJO OSCILATORIO
    tblc = table(time',caudal_ciclos'-0*mean(caudal_ciclos));
    modelfunc = @(b,x) b(1)*sin(2*pi*b(2)*x(:,1)+b(3));

    beta0c = [ampl_caudal_est freq pi/2];
    mdlc = fitnlm(tblc,modelfunc,beta0c);
    beta_caudal = mdlc.Coefficients.Estimate;

    amp_caudal=beta_caudal(1);
    f_caudal=beta_caudal(2); % Frecuencia de la senoidal
    fase_caudal=beta_caudal(3); % Fase inicial de la senoidal

    caudal_ajus=amp_caudal*sin(2*pi*f_caudal*time+fase_caudal); % Senoidal ajustada
else
    % FLUJO OSCILATORIO CON NETO
    tblc = table(time',caudal_ciclos');
    modelfunc = @(b,x) b(1)+b(2)*sin(2*pi*b(3)*x(:,1)+b(4));

    beta0c = [0 ampl_caudal_est freq pi/2];
    mdlc = fitnlm(tblc,modelfunc,beta0c);
    beta_caudal = mdlc.Coefficients.Estimate;

    net_caudal=beta_caudal(1);
    amp_caudal=beta_caudal(2);
    f_caudal=beta_caudal(3); % Fase inicial de la senoidal
    fase_caudal=beta_caudal(4); % Fase inicial de la senoidal
...

```

```

...
caudal_ajus=net_caudal+amp_caudal*sin(2*pi*f_caudal*time+fase_caudal); % Senoidal ajustada
end

% Consideramos el inicio en el máximo caudal
% (RETRASO DE 90° RESPECTO A LA EXPRESIÓN SENOIDAL)
[Q_MAX FASE_0]=min(caudal_ajus(1:n_snap));

% plot(time,caudal_ciclos,'r',time,caudal_ajus,'--k'); % Gráfica con el caudal instantáneo medido y
el ajustado a senoidal

```

### Función PIV\_vratio

```

radio=abs(y-y_eje); % Distancia de cada punto al eje (radio)

% Velocity ratio de cada instante:
for i_vr=1:n_snap

    indu=~isnan(U(:,i_vr)); % Cogemo solamente valores NUMÉRICOS

    suma_axial=sum(abs(U(indu,i_vr)).*radio(indu)); % Sumamos todas las componentes en valor
absoluto de velocidad axial (pesamos según la distancia al eje)
    suma_radial=sum(abs(V(indu,i_vr)).*radio(indu)); % Sumamos todas las componentes en valor
absoluto de velocidad transversal (pesamos según la distancia al eje)
    R_v_bruto(i_vr)=suma_axial/suma_radial; % El velocity ratio es el cociente entre ambas (el tamaño
de cada ventana es el mismo)
end

% Calculamos el valor medio del velocity para todo el CICLO (siguiendo Manninen_et_al-2013)
points_vr=size(caudal_PIV); % Número de puntos de un ciclo
R_v_medio(n)=(mean(R_v_bruto(1:points_vr).^(-1)))^-1; % Hacemos la media de la inversa para
reducir el efecto de los valores altos

% R_v_medio(n)=sum(suma_axial)/sum(suma_radial); % ASÍ SE DA MÁS PESO A LOS
INSTANTES CON MAYOR VELOCIDAD

```

### PIV\_asimetria

```

% 1) Sabiendo el origen del tanque y el ancho del tanque, fijamos la posición del eje de simetría
% 2) Debemos seleccionar los puntos de una mitad
% 3) Cada uno compararlo con el simétrico (como la posición no será exacta
% debemos interpolar en 2D)

clear x_semi1 y_semi1 U_semi1 V_semi1
clear x_semi2 y_semi2 U_semi2 V_semi2

clear x_semi_esp y_semi_esp U_semi_esp V_semi_esp
clear coef_sim_i coef_simu

for i_asim=1:n_snap
    x_semi1=x(y<y_eje); % Mitad abajo del eje de simetría
    y_semi1=y(y<y_eje);
    U_semi1=U(y<y_eje,i_asim);
    V_semi1=V(y<y_eje,i_asim);

    x_semi2=x(y>y_eje); % Mitad a la derecha del eje de simetría
    y_semi2=y(y>y_eje);
    U_semi2=U(y>y_eje,i_asim);
    V_semi2=V(y>y_eje,i_asim);
...

```

```

...
% Saco las posiciones simétricas respecto a los puntos de la primera mitad
x_semi_esp=x_semi1;
y_semi_esp=y_eje+(y_eje-y_semi1);

% Calculo la velocidad en la mitad simétrica interpolando en 2D:
U_semi_esp=interp2(reshape(x,number_y,number_x),reshape(y,number_y,number_x),reshape(U(:,i_a
sim),number_y,number_x),x_semi_esp,y_semi_esp);
V_semi_esp=interp2(reshape(x,number_y,number_x),reshape(y,number_y,number_x),reshape(V(:,i_a
sim),number_y,number_x),x_semi_esp,y_semi_esp);

% Componente de asimetría en cada punto:
coef_sim_i=0.5*(abs(U_semi1-U_semi_esp)./(abs(U_semi1)+abs(U_semi_esp))+abs(V_semi1-
V_semi_esp)./(abs(V_semi1)+abs(V_semi_esp)));

n_zeros=sum(isnan(coef_sim_i)); % No tenemos en cuenta para la media los puntos de la pared que
deben haber arrojado valores NaN
coef_sim_i(isnan(coef_sim_i))=0; % Hacemos cero para no tener en cuenta los puntos de las paredes
coef_sim(i_asim)=sum(coef_sim_i)/(length(coef_sim_i)-n_zeros); % Coeficiente de asimetría para
cada instantánea

end

% coef_sim_medio(n)=mean(coef_sim); % Coeficiente de asimetría medio para el punto de medida
coef_sim_medio(n)=(mean(coef_sim.^(-1)))^-1; % Manninen et al.-2013

% hold on
% quiver(x_semi1,y_semi1,U_semi1,V_semi1,'y');axis equal % Mitad inferior
% quiver(x_semi_esp,y_semi_esp,U_semi_esp,V_semi_esp,'b');axis equal % Mitad superior
interpolada en los puntos espejo
% quiver(x_semi_esp,y_semi_esp,U_semi1,-V_semi1,'y');axis equal % Mitad superior si fuera
perfectamente simétrica
% hold on
% hold off

```

### PIV\_error

```

if calculo_error==1

% COMPONENTE BIAS (~exactitud)

% (1) Contribución del método PIV:
l_caract=D/1000; % Distancia usada como referencia, longitud tanque [m]
for i_er=1:length(x)
    error_u_piv(i_er)=f_error_PIV(U(i_er)/pxf2ms,frame_step,px_D,l_caract); % error [m/s]
    error_v_piv(i_er)=f_error_PIV(V(i_er)/pxf2ms,frame_step,px_D,l_caract);
end

% (2) Contribución del efecto gravitatorio/inercial:
error_u_grav(n)=d_p^2*(rho_p-rho)*g/(18*mu); % error [m/s]

% (3) Contribución del movimiento fuera de plano:
% u_error_oop(i)=;
% v_error_oop(i)=;

error_u_bias=error_u_piv+error_u_grav;
error_v_bias=error_v_piv;

%%
% COMPONENTE ALEATORIA (~precisión)
...

```

```

...
lim_error=10; % %
z_alpha=1.96; % Para un IC del 95% (asumimos distribución normal)
% Solamente tiene sentido calcularla cuando representan un mismo instante
% (neto u oscilatorio por fases)
if isequal(test_case,'net')
    for i_al=1:length(x)
        std_u(i_al)=std(U(i_al,:));
        std_v(i_al)=std(V(i_al,:));
    end
    error_u_rms=z_alpha*std_u/sqrt(n_snap);
    error_v_rms=z_alpha*std_v/sqrt(n_snap);

    % ESTADÍSTICA:
    % Fracción de puntos con valor cero en las paredes (no se puede calcular el error):
    fraccion_0=sum(isnan(error_u_rms./U_mean*100))/length(error_u_rms)*100;
    % Fracción de vectores con un error relativo menor al 10%

    fraccion_lim_u=sum((error_u_rms+error_u_bias)./U_mean*100<lim_error)/length(error_u_rms)*100
    ;

    fraccion_lim_v=sum((error_v_rms+error_v_bias)./V_mean*100<lim_error)/length(error_v_rms)*100
    ;
    % Frcción de vectores sobre los calculados por debajo del límite de error:
    fraccion_ok_u=fraccion_lim_u/(100-fraccion_0)*100;
    fraccion_ok_v=fraccion_lim_v/(100-fraccion_0)*100;

end

end

% Esta gráfica nos da una idea de si se han tomado suficientes instantáneas
% para obtener un promedio fiable: (Se debe estabilizar el valor):
% plot((u_evol-u_mean(n_efect))/u_mean(n_efect)*100);

```

## PIV\_POD

```

%%
% ---CÁLCULO DE LOS MODOS POD---

if calculo_POD==1

h = waitbar(1,'Calculando Modos POD');
display('Calculando Modos POD')

if MODE_0==1 % Se realiza el análisis con o sin la componente neta
    U_all=[U;V];
else
    U_all=[u_fluct;v_fluct]; % Matriz con todas los componentes de velocidad fluctuantes, con
    una snapshot en cada columna
end
C=U_all'*U_all; % Matriz de covarianza

[e_V,Diag]=eig(C); % Se resuelve el problema de autovalores e_V son los vectores propios
% D es una matriz diagonal con los valores propios

[L,I]=sort(diag(Diag)); % Se ordenan los valores propios ascendentemente - I es contiene los índices
correspondientes a dicho orden

for i=1:length(Diag)
...

```

```

...
    eValue(length(Diag)+1-i)=L(i); % Se ordenan los valores propios descendientemente
    eVec(:,length(Diag)+1-i)=e_V(:,I(i)); % Se ordenan los vectores propio según el orden
anterior
end;

eValue(length(eValue))==0; % El último valor propio debe ser nulo

E_mode(n,1:n_snap)=eValue/sum(eValue)*100; % Fracción de energía correspondiente a cada uno de
los modos
E_mode2(n,1:n_snap-1)=E_mode(n,2:n_snap)/sum(E_mode(n,2:n_snap))*100;

% Se obtiene el número de modos necesarios para representar una determinada
% fracción de energía:
for i=1:n_snap
E_mode_acu(i)=sum(E_mode(n,1:i)); % Fracción de energía recogida hasta un modo determinado
if ((E_mode_acu(i))>=energy_fraction)&&(n_modes==0)
    n_modes=i;
end
end
% Se calculan los primeros n_modes:
for i=1:n_modes
    phi(:,i)=U_all*eVec(:,i)/norm(U_all*eVec(:,i)); % Se calcula el modo 'i'
end

delete(h) % Cerramos la waitbar

%% ---RECONSTRUCCIÓN DE LAS INSTANTÁNEAS---
h = waitbar(1,'Realizando la Reconstrucción de las Instantáneas');

a_n=phi'*U_all; % Coeficientes temporales
% U_recons=phi*a_n; % Componente de velocidad reconstruida

delete(h) % Cerramos la waitbar

%%---ANÁLISIS (FFT) DE LOS COEFICIENTES TEMPORALES---
% Mostramos gráfica con el valor temporal de velocidad
clear Y nft ny freq
rate_POD=frame_rate*step_snap;
Fs=rate_POD; % Frecuencia de muestreo (Hz)
nft=100*10^3;
signal_fft=a_n(1+MODE_0,:);
signal_fft=signal_fft-mean(signal_fft);
Y=fft(signal_fft,nft);
Y=Y(1:nft/2);
ny=abs(Y).^2;
freq_pod=(0:nft/2-1)*Fs/nft;
[max_ny ind]=max(ny); % Calculamos la frecuencia de mayor energía y el índice de la misma
freq_main(n)=freq_pod(ind); % Frecuencia de mayor energía y por tanto la de oscilación
% plot(freq,ny)

end

```

### FIG\_Campo\_vec\_FINAL

```

close all;clc;
% ---Campo vectorial de velocidad y contorno---%

FASE=0; % Fase a representar (0=campo de velocidad promedio)

...

```

```

...
vectors_size=0.12; % Tamaño de los vectores (con color) [0.12]
vectors_scale=0.12; % Tamaño de los vectores (sin color)
vectors_x=30; % Número de vectores que quiero visualizar a lo largo del eje axial
rel_yx=1; % Relación entre el número de vectores en Y en X
x_off=0.025*1; % Off set en la posición axial de los vectores

graph_colour=1; % Campo vectorial en color (1=campo vectorial en color)
graph_cont=0; % Velocidad escalar como contorno (1=hacer contorno)
map='jet'; % Mapa de colores a utilizar ('jet','parula')

for FASE=1:length(caudal_PIV)

%%
figure(1)

hold on
set(gcf,'color','white')
set(gca,'linewidth', 1.5,'fontsize',16,'fontname','Times New Roman') % Fijamos el espesor de las líneas
de los ejes, tamaño de la fuente y tipo de fuente
set(gca,'XTick',[0 0.5 1 1.5])
set(gca,'YTick],[-0.5 -0.25 0 0.25 0.5])
xlabel('\it x/D','FontSize',16,'FontWeight','normal','Color','k')
ylabel('\it r/D','FontSize',16,'FontWeight','normal','Color','k')
axis equal
axis off
ylim([-0.5 0.5])
if strcmp(geom,'MH1')==1
    xlim([-0.1 1.55])
elseif strcmp(geom,'MH3')==1
    xlim([-0.1 0.6])
end

%% Recinto- Dibujamos el contorno de las paredes y de los deflectores
recinto_MH()

%%
% Contorno escalar
if graph_cont==1
    colormap(map)
    x_contour=reshape(x_adim,number_y,number_x);
    y_contour=reshape(r_adim,number_y,number_x);
    if FASE==0
        U_MAG=sqrt(U_mean.^2+V_mean.^2);
    else
        U_MAG=sqrt(U(:,FASE).^2+V(:,FASE).^2);
    end
    z_contour=reshape(U_MAG,number_y,number_x);
    contourf(x_contour,y_contour,z_contour/max(max(z_contour)),100,'LineStyle','none');
end

%% Campo vectorial
clear xq yq uq vq
if FASE==0
    [xq yq uq vq]=f_gridmod(x_adim+x_off,r_adim,-
    U_mean,V_mean,vectors_x,floor(rel_yx*vectors_x));
else
    [xq yq uq vq]=f_gridmod(x_adim+x_off,r_adim,-
    U(:,FASE),V(:,FASE),vectors_x,floor(rel_yx*vectors_x));
end
...

```

```

...
end

if graph_colour==1
    c=f_quiverC2D(xq,yq,uq,vq,vectors_size,map) % Campo vectorial en color
else
    quiver(xq,yq,-uq,vq,vectors_scale,'Color','k','Autoscale','off');           % Campo vectorial en
negro
end

tit1='CICLO';
tit2=num2str(FASE);
titulo=strcat(tit1,tit2);
print('-f1',titulo,'-djpeg')
delete(c)
close all

hold off

end

```

### Recinto\_MH

```

% Dibuja el recinto según GEOMETRÍA
lw=1;
color=[0.92 0.92 0.92]
e_adim=esp/D;
l_cell=D*px_l/px_D+esp;

if strcmp(geom,'MH1')==1

    plot([-e_adim 1.5],[0.5 0.5],'k','LineWidth',lw) % Pared superior del tubo
    plot([-e_adim 1.5],[-0.5 -0.5],'k','LineWidth',lw) % Pared inferior del tubo

    % Deflector izquierda superior [p_x p_y largo_x largo_y]
    rectangle('Position',[-e_adim 0.5/2 e_adim 0.5/2],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
    % Deflector izquierda inferior
    rectangle('Position',[-e_adim -0.5 e_adim 0.5/2],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
    % Deflector derecha superior
    rectangle('Position',[1.5-e_adim 0.5/2 e_adim 0.5/2],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
    % Deflector derecha inferior
    rectangle('Position',[1.5-e_adim -0.5 e_adim 0.5/2],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)

elseif (strcmp(geom,'MH3'))||(strcmp(geom,'MH3_2021'))==1

    plot([-e_adim l_cell/D],[0.5 0.5],'k','LineWidth',lw) % Pared superior del tubo
    plot([-e_adim l_cell/D],[-0.5 -0.5],'k','LineWidth',lw) % Pared inferior del tubo

    % Tuerca
    %
    % e_tuerca=0.15;
    % h_tuerca=0.08;
    % rectangle('Position',[27.7/32-e_tuerca 0-h_tuerca/2 e_tuerca
h_tuerca],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
    %
    % e_tuerca=0.12;
    % h_tuerca=0.18;
    % rectangle('Position',[27.7/32-e_tuerca 0-h_tuerca/2 e_tuerca
h_tuerca],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
    %
...

```



```

...
% Deflector izquierda inferior [p_x p_y largo_x largo_y]
rectangle('Position',[-e_adim -0.5 e_adim (16-9.2)/2/D],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
% Deflector izquierda superior
rectangle('Position',[-e_adim -(16-9.2)/2/32 e_adim (16+(16-
9.2)/2)/32],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
% Deflector derecha inferior [p_x p_y largo_x largo_y]
rectangle('Position',[-e_adim+l_cell/D -0.5 e_adim (16-9.2)/2/D],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
% Deflector derecha superior
rectangle('Position',[-e_adim+l_cell/D -(16-9.2)/2/32 e_adim (16+(16-
9.2)/2)/D],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)

% Orificio izquierda
rectangle('Position',[-e_adim -(4.6-4)/D e_adim
9.2/D],'FaceColor','none','LineWidth',lw,'LineStyle',':')
% Orificio derecha
rectangle('Position',[-e_adim+l_cell/D -(4.6-4)/D e_adim
9.2/D],'FaceColor','none','LineWidth',lw,'LineStyle',':')

elseif (strcmp(geom,'MH3_b')==1

plot([-e_adim l_cell/D],[0.5 0.5],'k','LineWidth',lw) % Pared superior del tubo
plot([-e_adim l_cell/D],[-0.5 -0.5],'k','LineWidth',lw) % Pared inferior del tubo

% Tuerca
%
% e_tuerca=0.15;
% h_tuerca=0.08;
% rectangle('Position',[27.7/32-e_tuerca 0-h_tuerca/2 e_tuerca
h_tuerca],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
%
% e_tuerca=0.12;
% h_tuerca=0.18;
% rectangle('Position',[27.7/32-e_tuerca 0-h_tuerca/2 e_tuerca
h_tuerca],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
%
% Deflector izquierda inferior [p_x p_y largo_x largo_y]
rectangle('Position',[-e_adim -0.5 e_adim (16-9.2)/2/D],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
% Deflector izquierda superior
rectangle('Position',[-e_adim -(16-9.2)/2/D e_adim (16+(16-
9.2)/2)/D],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
% Deflector derecha inferior [p_x p_y largo_x largo_y]
rectangle('Position',[-e_adim+l_cell/D -0.5 e_adim (16+(16-
9.2)/2)/D],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)
% Deflector derecha superior
rectangle('Position',[-e_adim+l_cell/D 0.4 e_adim (16-9.2)/2/D],'FaceColor',color,'LineWidth',lw)

% Orificio izquierda
% rectangle('Position',[-e_adim -(4.6-4)/32 e_adim
9.2/32],'FaceColor','none','LineWidth',lw,'LineStyle',':')
% Orificio derecha
% rectangle('Position',[-e_adim+27.7/32 -(4.6-4)/32 e_adim
9.2/32],'FaceColor','none','LineWidth',lw,'LineStyle',':')

end

```

## SORT\_images\_OSC

```

clear all;close all;clc;

%% ENTRADAS

geom='MH3_2021';      % Geometría a estudiar: ['MH3_2021', 'MH3_2021_TRESB']
tipo_test='OSCILATORIO+NETO' % Tipo de ensayo: ['OSCILATORIO','OSCILATORIO+NETO']
punto_test='PIV1';    % Punto a analizar
folder_cycle='PIV1_001'; % Ejemplo de nombre de la carpeta con las imágenes de un ciclo
n_fases=8;           % Número de fases equidistantes que quiero estudiar de 1 ciclo

f_laser=50; % Frecuencia de disparo del láser (Hz) [VER EN 'ORIGEN_IMAGEN.xlsx']
f_osc=0.0562; % Frecuencia de la oscilación (Hz) [LA OBTENIDA DEL AJUSTE ESTADÍSTICO:
'f_caudal' tras ejecutar PIV_MAIN]

step_snap=2; % Indica el paso (en imágenes) entre campos de velocidad consecutivos (1=periodo del
láser, 2=doble del periodo del láser)
campo_fase0=12; % Número de CAMPO DE VELOCIDAD donde consideramos que se inicia el
ciclo ['FASE_0' tras ejecutar PIV_MAIN ]

guardado=1; % Si es 1 guarda las imágenes agrupadas en fases

%% DIRECTORIOS Y NÚMERO DE CICLOS Y DE FASES

folder_test=strcat('0-Datos brutos\',geom,'\,tipo_test,\'); % Nombre de la carpeta con los datos

dir_current= pwd; % Dirección del directorio actual
dir_test=  strcat(dir_current,'\,folder_test,punto_test,\');
dir_cycles= strcat(dir_test,'Ciclos,\'); % Directorio con las carpetas con los ciclos
dir_fases=  strcat(dir_test,'Fases,\'); %
dir_imag=  strcat(dir_cycles,folder_cycle,\'); % Directorio con las imágenes de uno de los ciclos

imag_pref='ImgA'; % Prefijo común de las imágenes

n_cycles=length(dir(dir_cycles))-2; % Número de carpetas (ciclos) en la carpeta con los datos del
ensayo. (Siempre hay dos archivos de más)
n_imag=length(dir(dir_imag))-3; % Número de imágenes a tratar (contamos los .tiff que hay, siempre
suma dos de más)(Además hay un archivo adicional)

n_imag_cycle=f_laser/f_osc; % Número de imágenes que debería haber en un ciclo (no tiene porqué
ser entero)

% Si no hay suficientes imágenes significa que podemos tener problemas en el algoritmo:

if n_imag>n_imag_cycle
    display('Número de imágenes suficiente')
else
    display('AVISO: Número de imágenes INSuficiente')
end

%% IMÁGENES DE INTERÉS

% Primer par de imágenes:
imag_fase0=step_snap*(campo_fase0-1); %
number_imagA(1)=imag_fase0;
number_imagB(1)=number_imagA(1)+1;
...

```

```

...
step_imag=n_imag_cycle/n_fases; % Pasos (en número de imágenes) entre fases

for i=2:n_fases
    next_imag=number_imagA(1)+(i-1)*step_imag;

    if next_imag<n_imag % Si no sobrepaso el número de imágenes...
        number_imagA(i)=floor(next_imag);
    else
        number_imagA(i)=floor(next_imag-n_imag_cycle);
    end

    number_imagB(i)=number_imagA(i)+1;
end

if guardado==1

    %% CREAMOS CARPETAS PARA AGRUPADAR LAS IMÁGENES DE CADA FASE
    for i_f=1:n_fases
        folder_fase=strcat('fase_',num2str(i_f,'%02d'));
        mkdir(dir_fases, folder_fase); % Creamos una nueva carpeta
    end

    %%

    for i_f=1:n_fases

        folder_fase=strcat('fase_',num2str(i_f,'%02d'));

        for i_c=1:n_cycles

            % Leemos el par de imágenes correspondiente al CICLO i_c
            folder_cycle=strcat(punto_test,'_',num2str(i_c,'%03d')); % !!!

            name_imagA=strcat(imag_pref,num2str(number_imagA(i_f),'%06d'),'tiff');
            name_imagB=strcat(imag_pref,num2str(number_imagB(i_f),'%06d'),'tiff');

            dir_imagA=strcat(dir_cycles, folder_cycle, '\', name_imagA);
            dir_imagB=strcat(dir_cycles, folder_cycle, '\', name_imagB);

            try % Intentamos cargar el par de imágenes y si no es posible cogemos el par anterior
                XA= imread(dir_imagA);
                XB= imread(dir_imagB); % image(X) % Si queremos mostrar la imagen
            catch
            end

            % Guardamos el par de imágenes
            new_name_imagA=strcat(imag_pref,num2str(2*(i_c-1) ,'%06d'),'tiff');
            new_name_imagB=strcat(imag_pref,num2str(2*(i_c-1)+1,'%06d'),'tiff');

            new_dir_imagA=strcat(dir_fases, folder_fase, '\', new_name_imagA);
            new_dir_imagB=strcat(dir_fases, folder_fase, '\', new_name_imagB);

            imwrite(XA,new_dir_imagA);
            imwrite(XB,new_dir_imagB);

        end
    end
end
end
end

```

### Jmc\_signal\_to\_noise

```

clear all;close all;clc

% Calcula una estimación del signal to noise ratio. (Tesis de David)

%% -----ENTRADAS-----%%

n_puntos=899; % Número de pares de imágenes a los que calcular el S2N ratio
PPR_limit=1.5; % Número límite por debajo del cual se considera mala correlación (David=1.5,
Otros=2)
estadis=1; % 0= No calculo los parámetros generales (número de vectores válidos)

plot_s2n=1; % Decidimos si dibujar gráfica

%%
% Indicamos la carpeta donde se encuentran los datos de las correlaciones cruzadas:
dir_actual=pwd;

%-----ALGORITMO DE CÁLCULO S2N RATIO-----&

wb=waitbar(0,'Calculando S2N ratio');
for n=1:n_puntos

    n
    waitbar(n/n_puntos,wb);

    clear result_conv
    load(strcat(dir_actual,'\jmc_result_conv_',num2str(n),'mat')) % Cargo el fichero con los resultados de
    la correlación cruzada
    dim_conv=size(result_conv); % Dimensiones de la matriz anterior (window size x window size x
    number of windows)
    pix_window=dim_conv(1); % Tamaño de la ventana de interrogación (pix)

    for window=1:length(result_conv(1,1,:))

        clear perfilx perfily picosx picosy

        if max(max(result_conv(:, :, window)))==0 % Si es un plano horizontal es que es un punto que cae en
        la mask
            PPR(window,n)=0; % Ningún punto cualquiera puede tener cero, con lo cual tenemos
            identificados con un valor cero a los de la mask
        else
            perfilx=max(result_conv(:, :, window), [], 1); % Proyecto la superficie en eje 1
            perfily=max(result_conv(:, :, window), [], 2); % Proyecto la superficie en eje 2

            picosx=sort(findpeaks(perfilx),'descend'); % Saco picos de perfil 1
            picosy=sort(findpeaks(perfily),'descend'); % Saco picos de perfil 2

            % En el eje 1
            if (length(picosx)>=2) % Si ha detectado al menos dos picos calculo la relación
                pprx=picosx(1)/picosx(2);
            else % Si no se han detectado dos picos es que este método no vale en ese eje
                pprx=NaN;
            end
            % En el eje 2 (igual)
            if (length(picosy)>=2)
                ppri=picosy(1)/picosy(2);
            else
                ppri=NaN;
            end
        end
    end
end
...

```

```

...
end

    PPR(window,n)=min([pprx ppry]); % Me quedo con la peor relación pico-pico
end
end

end

%% -----ESTADÍSTICA GENERAL -----%%

% PPR_limit=1.5

for n=1:n_puntos
    if estadis~=0
        n_PPR=length(PPR(:,n))-sum(isnan(PPR(:,n)))-sum(PPR(:,n)==0); % Número de puntos en
        que los que el cálculo es válido (quito los de la mask y en los que ha fallado el algoritmo)
        PPR_calc=n_PPR/(length(PPR(:,n))-sum(PPR(:,n)==0))*100; % Porcentaje de vectores para
        los que se ha podido calcular el PPR
        PPR_valid=sum(PPR(:,n)>=PPR_limit)/n_PPR*100; % Porcentaje de los vectores cuyo PPR
        ha sido calculado y que se pueden considerar válidos
        PPR_valid_total(n)=PPR_calc*PPR_valid/100; % Procentaje de vectores del total que ha sido
        bien calculado
    end
end

figure('Name','S2NRATIO OK','Units','centimeters','Position',[5 5 15 10])
set(gcf,'color','white')
plot(PPR_valid_total)
xlabel('Image pair')
ylabel(['Fraction of vectors with S2N > ' num2str(PPR_limit) ' (%)'])
grid on

%% -----RESULTADOS-----%%

waitbar(1,wb,'Preparando resultados');

save('PPR_results_1','PPR') % Guardamos la matriz con los valores de S2N ratio (número de ventanas
x número de pares de imágenes)

if estadis~=0
    display('Porcentaje de ventanas en las que ha sido posible calcular el 2SN Ratio:')
    PPR_calc
    text=strcat('Porcentaje de ventanas para las que 2SN Ratio>=',num2str(PPR_limit),':')
    display(text)
    mean(PPR_valid_total) % Valor medio de vectores válidos
end

close(wb)

%%
figure(1)
% > Para representar un histograma de los S2N calculados válidos:
hold on
PPR_hist=vector(PPR);
PPR_hist(PPR_hist==0)=[];
PPR_hist(PPR_hist>10)=[];
h=hist(PPR_hist,10);
h=h/sum(h)*100;
...

```

```

...
bar(h)
xlabel('Signal to noise ratio')
ylabel('Fracción de vectores (%)')
hold off

%% GRÁFICA: superficie de correlación cruzada:
if plot_s2n==1

figure('Name','CROOS-CORRELATION','Units','centimeters','Position',[5 5 15 10])

window=100;

% Parámetros
fontsize=12;
fontname='Times New Roman';
fontsize_leg=fontsize-2;
markersize=8;

% GENERAL
set(gcf,'color','white') % Fijamos el color de
fondo como blanco
set(gca,'linewidth', 1.5,'fontsize',fontsize,'fontname',fontname) % Fijamos el espesor
de las líneas de los ejes, tamaño de la fuente y tipo de fuente

% REJILLA
ax=gca;
ax.XGrid='on'; % Activa la rejilla en las líneas del eje X
ax.YGrid='on';
ax.ZGrid='on';
ax.GridLineStyle='-'; % Estilo de línea de la rejilla principal
ax.GridAlpha=0.1; % Grosor de línea de la rejilla principal. Por defecto es 0.15
ax.MinorGridLineStyle=': '; % Estilo de línea de la rejilla secundaria
ax.MinorGridAlpha = 0.1; % Grosor de línea de la rejilla secundaria. Por defecto es 0.15

hold on

% EJES
xlabel('X position (pix)','FontSize',fontsize,'FontWeight','normal','Color','k')
ylabel('Y position (pix)','FontSize',fontsize,'FontWeight','normal','Color','k')
zlabel('C_f')
set(gca,'FontSize',fontsize)

% GRÁFICAS
surf(linspace(1,pix_window,pix_window),linspace(1,pix_window,pix_window),result_conv(:, :, window));

color='r';
plot3(0*perfil_y,linspace(1,length(perfil_y),length(perfil_y)),perfil_y,...
strcat('-',color),... % Tipo de línea. Color de línea.
'LineWidth',2)
plot3(linspace(1,length(perfil_x),length(perfil_x)),0*perfil_x,perfil_x,...
strcat('-',color),... % Tipo de línea. Color de línea.
'LineWidth',2)
plot3(0*perfil_y,linspace(1,length(perfil_y),length(perfil_y)),perfil_y,...
strcat('-',color),... % Tipo de línea. Color de línea.
'LineWidth',2)
hold off
end

```

## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Muñoz-Cámara J., Egea A., Crespí-Llorens D., Solano J.P., Corella-García J., EFFECT OF THREE-ORIFICE BAFFLES ARRANGEMENT ON THE FLOW BEHAVIOUR UNDER NET AND OSCILLATORY FLOW CONDITIONS
- [2] X. Ni, G. Brogan, A. Struthers, D.C. Bennett, S.F. Wilson, A systematic study of the effect of geometrical parameters on mixing time in oscillatory baffled columns, *Chem. Eng. Res. Des.* 76 (1998) 635–642. doi:10.1205/026387698525162.
- [3] P. Stonestreet, P.M.J. van der Veecken, The effects of oscillatory flow and bulk flow components on residence time distribution in baffled tube reactors, *Chem. Eng. Res. Des.* 77 (1999) 671–684.
- [4] K.B. Smith, The Scale-Up of Oscillatory Flow Mixing, 1999.<https://core.ac.uk/download/pdf/1334175.pdf>.
- [5] C.R. Brunold, J.C.B. Hunns, M.R. Mackley, J.W. Thompson, Experimental observations on flow patterns and energy losses for oscillatory flow in ducts containing sharp edges, *Chem. Eng. Sci.* 44 (1989) 1227–1244. doi:[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(89\)87022-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(89)87022-8).
- [6] M.E. Mackay, M.R. Mackley, W. Y., Oscillatory flow within tubes containing wall or central baffles, *Trans IChemE.* 69 (1991) 506–513.
- [7] M.R. Mackley, G.M. Tweddle, I.D. Wyatt, Experimental heat transfer measurements for pulsatile flow in baffled tubes, *Chem. Eng. Sci.* 45 (1990) 1237–1242. doi:10.1016/0009-2509(90)87116-A.
- [8] Raffel, M., Willert, C. Kompenahns, J., “Particle Image Velocimetry. A Practical Guide”. Publicado por Springer, Berlin, Heidelberg, 1998
- [9] Fuente: Frank M. White, *Fluid Mechanics*, 4th edition. McGraw-Hill:
- [10][http://www.hoskinscientifique.com/uploadpdf/Instrumentation/Redlake/hoskin\\_M3\\_47d53c4cf0fae.pdf](http://www.hoskinscientifique.com/uploadpdf/Instrumentation/Redlake/hoskin_M3_47d53c4cf0fae.pdf)
- [11]<https://www.jove.com/t/61949/nasal-brushing-sampling-processing-using-digital-high-speed-ciliary>

- [12] José Muñoz Cámara, Análisis experimental de los mecanismos de mejora termohidráulica en reactores de flujo oscilatorio.
- [13] Thielicke, W. (2014). The flapping flight of birds: Analysis and application
- [14] J. Westerweel, F. Scarano, Universal outlier detection for PIV data, *Exp. Fluids*. 39 (2005) 1096–1100. doi:10.1007/s00348-005-0016-6.

