



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

RESUMEN PROYECTO FIN DE CARRERA:

“Study of Turbulent Jets by means of PIV Technique”

Alumnos:

- Begoña Collar Sagardía 100048747
- Luis Miguel Morera Moreno 100056618

Coordinador académico: Giovanni Paolo Romano
Institución en la que se ha realizado: Università degli Studi di Roma La Sapienza
Periodo de realización: Octubre 2009 - Junio 2010
Idioma de realización: Inglés
Coordinador académico uc3m: Antonio Lecuona Neumann

INTRODUCCIÓN

El presente Proyecto Final de Carrera ha sido realizado en las instalaciones del laboratorio de Hidráulica del Departamento de Mecánica y Aeronáutica de la Universidad La Sapienza de Roma.

Se pretende profundizar en el estudio de la turbulencia mediante la técnica PIV (particle image velocimetry). Para tal efecto se ha seleccionado el chorro turbulento, ya que en él se encuentran presentes todas las estructuras características de la turbulencia y, además, su conocimiento está bastante extendido lo cual facilitará el confronto de nuestros datos con la bibliografía. Es necesario destacar el amplio abanico de aplicaciones, tanto científicas como industriales que el chorro turbulento tiene en la actualidad.

Así mismo, se presentará la técnica de medida PIV, que ha demostrado ser un método muy potente para diversos problemas de mecánica de fluidos, en líquidos, gases e incluso en flujo multifase. Puede brindar medidas globales de un campo de velocidades con un nivel satisfactorio de precisión, por lo que su aplicación ha encontrado mucha aceptación en los laboratorios de mecánica de fluidos.

Para alcanzar estos objetivos se han llevado a cabo dos experimentos;

- En el primero se ha tratado de optimizar la resolución espacial de la técnica PIV, determinando la distancia óptima a la que situar la cámara respecto a la línea central del chorro. Fijando el número de Reynolds, cuatro distancias han sido estudiadas mediante el análisis de los parámetros turbulentos y los campos fluidos.
- En el segundo, partiendo de los resultados del primer experimento, se estudia el comportamiento del chorro en función del número de Reynolds. Para ello, se consideran ocho números de Reynolds distintos comprendidos entre 700 y 70000, tomando medidas en tres zonas consecutivas a lo largo del eje axial del chorro.

INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA

Teniendo en cuenta que el flujo turbulento es altamente aleatorio, el análisis estadístico cobra vital importancia en su estudio.

Sabemos que la mayoría de flujos existentes en la naturaleza son turbulentos. El parámetro que nos indica, esencialmente, si estamos o no ante un flujo turbulento es el llamado número de Reynolds:

$$Re = \frac{ma}{F_p} = \frac{mu^2}{L} \cdot \frac{1}{\tau L^2} = \frac{\rho L^3 U^2}{L^3 \mu U/L} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (1.1)$$

Donde L es la longitud característica, U la velocidad característica y ν la viscosidad cinemática. Para cada tipo de flujo existe un valor (o rango de valores) que marca la transición de laminar a turbulento.

Es muy complicado dar una definición precisa de turbulencia, pero se pueden definir una serie de características comunes a todos los flujos turbulentos:

- Son altamente sensibles a las condiciones iniciales y de contorno.**
- Irregularidad:** obliga a recurrir a herramientas estadísticas.
- Difusividad:** favorece la mezcla rápida y aumenta el momento y la transferencia de masa.
- Números de Reynolds elevados:** el flujo es, por tanto, casi independiente de la viscosidad.
- Disipación:** los flujos turbulentos son siempre disipativos, por lo que se requiere un continuo aporte de energía, que suele provenir de los esfuerzos cortantes, para que la turbulencia no decaiga.
- Continuidad:** la turbulencia es un fenómeno continuo.
- Problema no cerrado:** lo que obliga a hacer suposiciones para llegar a alguna solución. Para solucionar esto definiremos la viscosidad de Eddy (o coeficiente

de difusión turbulenta), que juega el papel de la difusión molecular en régimen laminar.

La dependencia de la turbulencia con las condiciones iniciales y de contorno hace que no exista solución única para las ecuaciones de Navier-Stokes. Además, aun no existe ningún teorema que asegure la existencia y unicidad de soluciones a dichas ecuaciones.

Escalas de la turbulencia

- *Escalas grandes*: también llamadas escalas integrales. Dos puntos que estén separados entre sí más de una escala integral se pueden considerar independientes en lo que a su velocidad respecta. Se dice pues que no están correlacionados. La mayoría de la energía del flujo está asociada a estas escalas.
- *Escalas intermedias*: o Escalas de Taylor. Es aquí donde se da la transferencia de energía desde las escalas integrales a las escalas pequeñas, sin disipación viscosa.
- *Escalas pequeñas*: o más comúnmente Escalas de Kolmogorov. Son las escalas más pequeñas posibles, pues se ha alcanzado el equilibrio. Las estructuras más pequeñas son rápidamente disipadas por la viscosidad. La vorticidad del flujo se manifiesta, sobre todo, en estas escalas.

Para realizar nuestro estudio, las variables fluido dinámicas se dividen en dos términos: el valor medio y un término aleatorio que contiene la información sobre fluctuaciones en torno a la media:

$$q(x,t) = \bar{q} + q' \quad (1.2)$$

Las ecuaciones que gobiernan el flujo turbulento son las de Navier-Stokes, sobre las que se realizan las aproximaciones oportunas para adaptarlas al flujo que se desea estudiar, obteniéndose:

$$\underline{\nabla} \bullet \underline{\bar{V}} = 0 \quad (1.3)$$

$$\rho \frac{D\underline{\bar{V}}}{Dt} = -\underline{\nabla} \bar{p} + \underline{\nabla} \bullet \underline{\tau}_{ij} \quad (1.4)$$

Recuperación de isotropía

En turbulencia la isotropía se refiere siempre a los términos fluctuantes, implicando que las fluctuaciones de la velocidad deben ser idénticas en las tres direcciones del espacio. Existen una serie de parámetros estadísticos y de variables que nos ayudaran a razonar si el flujo se está comportando, o no, como isotrópico:

-Relación u'/v' : cuyo valor, lógicamente, debe tender a 1 si el flujo es isotrópico, si bien se ha demostrado experimentalmente que suele tender a 1,4.

-Skewness: definida como sigue:

$$\text{Skewness, } s_{u_i} = \frac{\overline{u_i'^3}}{(\sigma_{u_i}^2)^{3/2}} = \frac{1}{(\sigma_{u_i}^2)^{3/2}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{U}_i)^3 \quad (1.5)$$

Se trata de un parámetro que muestra cómo de centrados están los datos entorno a la media. Su valor isotrópico se demuestra que es cero.

-Kurtosis: cuya expresión es:

$$\text{Kurtosis, } k_{u_i} = \frac{\overline{u_i'^4}}{(\sigma_{u_i}^2)^2} = \frac{1}{(\sigma_{u_i}^2)^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{U}_i)^4 \quad (1.6)$$

Y su valor isotrópico es tres.

-También estudiaremos las relaciones de las derivadas cuadráticas medias:

$$K_1 = \frac{\overline{(\partial v / \partial x)^2}}{(\overline{\partial u / \partial x})^2}, \quad K_2 = \frac{\overline{(\partial u / \partial y)^2}}{(\overline{\partial u / \partial x})^2}, \quad K_3 = \frac{\overline{(\partial v / \partial y)^2}}{(\overline{\partial u / \partial x})^2}, \quad K_4 = \frac{\overline{(\partial u / \partial y)(\partial v / \partial x)}}{(\overline{\partial u / \partial x})^2} \quad (1.7)$$

Cuyos valores isotrópicos son respectivamente: $K_1=2$, $K_2=2$, $K_3=1$, $K_4=-0,5$.

-Por último analizaremos la **disipación de la energía cinética turbulenta** en cuatro casos diversos: ϵ_1 (isotrópico), ϵ_2 (homogéneo), ϵ_3 y ϵ_4 (axial-simétrico):

$$\begin{aligned}
 \epsilon_1 &= 15\nu \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2}, & \epsilon_2 &= 3\nu \left[\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \right], \\
 \epsilon_3 &= \nu \left[-\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} + 8\overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \right], & \epsilon_4 &= \nu \left[6\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + 3\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)} \right]
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

Chorro turbulento

Se decide estudiar el chorro turbulento, y particularmente el circular, por un doble motivo: ha sido ya estudiado en profundidad por lo que existe numerosa bibliografía y su comportamiento se conoce con precisión. Además, en el se encuentran presentes la mayoría de estructuras turbulentas de interés.

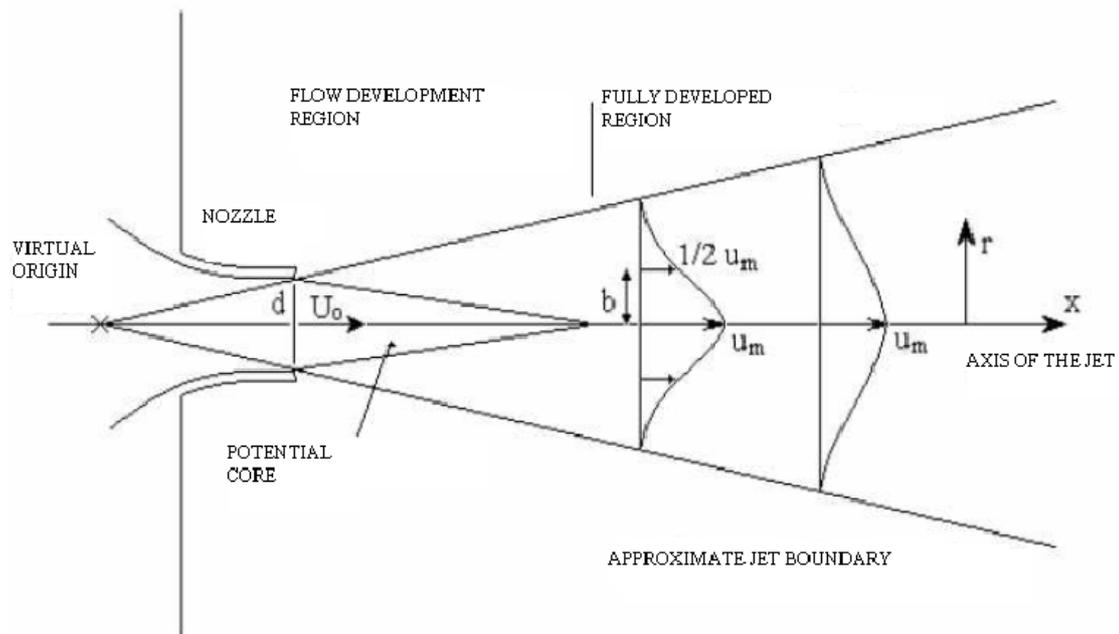


Fig. 1. Esquema de un chorro turbulento circular.

Una de las características más importantes es la autosemejanza: si representamos los perfiles de velocidad adimensionalizados comprobamos que todos tienden a converger en la misma curva.

VELOCIMETRÍA DE PARTÍCULAS(PIV)

El método de velocimetría de partículas (PIV) consiste en iluminar el plano en el cual se desea medir la velocidad, e introducir un campo de partículas de igual densidad que el fluido para que la luz se refleje sobre ellas y permita materializarlas. La fuente de luz utilizada más comúnmente en PIV para iluminar la superficie de medición es el láser. La lámina de láser se obtiene haciendo pasar un rayo láser a través de un lente cilíndrico o de una serie de lentes y espejos correctamente posicionados. El láser puede aplicarse en forma continua o por pulsaciones, según la técnica adoptada.

La técnica PIV utiliza un marco de referencia Euleriano, y permite la determinación del campo de velocidades (proporcionando los vectores de velocidad instantánea en una sección del flujo) basándose en la determinación del desplazamiento del promedio de un grupo de partículas microscópicas, con lo cual la velocidad se obtiene en una malla regular.

Algunas características de esta técnica son:

- Al ser una técnica óptica, la medida de la velocidad se realiza de forma no-intrusiva.
- Asimismo, la medida de la velocidad se realiza de manera indirecta, ya que se lleva a cabo gracias al estudio del movimiento de las partículas (trazas) añadidas al fluido.
- El retraso de tiempo Δt entre los pulsos del láser debe ser lo suficientemente grande como para determinar el desplazamiento de las partículas con una buena resolución y, para ser el adecuado, debe seleccionarse también de acuerdo al conocimiento de algunas de las propiedades del fluido

- El tamaño de las partículas debe ser lo suficientemente grande como para mejorar la eficiencia del sistema de iluminación, pero a su vez, cuanto más pequeñas sean, mejor seguirán el fluido y más homogénea será la distribución de las mismas.

Esta técnica se ha convertido hoy en día en una fiable y precisa herramienta para el cálculo y el estudio de los flujos, incluso en casos en los que el resto de técnicas fallan (flujos a altas temperaturas y altas velocidades, flujos con complicadas estructuras no estacionarias, etc.)

Para la llevar a cabo la ejecución de los dos experimentos que se describirán a continuación mediante la técnica PIV, era necesario disponer de un sistema de adquisición de imágenes que consta principalmente de un láser y de una cámara fotográfica digital, sincronizados ambos mediante un “pulse delay generator”.

Láser

El láser empleado “Big Sky Laser”(Q-Switched Nd: YAG Compact Oscillators) se trata de un láser de tipo semiconductor, está fabricado por la compañía QUAntel y trabaja a una frecuencia de 20Hz..

Cámara fotográfica para PIV

La adquisición de las imágenes se llevo a cabo mediante el modelo de cámara Ultima APX camera (10-bit CMOS sensor) con un objetivo NIKON AF 50 mm con la apertura adecuada.

Para controlar la adquisición de las imágenes y realizar el ajuste de parámetros requeridos en cada caso se ha utilizado el software específico PHOTRON FASTCAM VIEWER. (Version 3.0). Estas imágenes serán después exportadas y llevadas a Davis, software encargado del procesamiento de las mismas y con el que se obtienen los campos de velocidades del fluido.

DESCRIPCIÓN DEL PRIMER EXPERIMENTO: RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LA TÉCNICA PIV

En este primer experimento se pretende analizar la capacidad de la técnica PIV, y más concretamente su resolución espacial. El objetivo es encontrar una distancia, respecto al centro del chorro, a la que situar la cámara de modo que se consiga suficiente precisión para poder analizar incluso las microescalas de la turbulencia, pero procurando abarcar un espacio amplio que no obligue a mover demasiado la cámara si se quiere analizar la evolución lejos del orificio que produce el chorro.

Un objetivo paralelo será estudiar la recuperación de isotropía del chorro turbulento, esto es, encontrar -si efectivamente se produce- en qué punto el comportamiento del chorro es idéntico en todas las direcciones, o, dicho de un modo más plausible, cuándo las componentes transversal y axial de las velocidades fluctuantes son aproximadamente iguales.

Para ello, se ha elegido un orificio de diámetro 3cm, y cuatro distancias al centro del chorro de modo que la cámara se moverá perpendicularmente al mismo. Las distancias seleccionadas son aquellas que permiten una resolución espacial de $2D \times 2D$, $3D \times 3D$, $4D \times 4D$ and $5D \times 5D$ (el área que abarca la cámara es cuadrada). La disposición de la instalación que se ha usado se muestra en la figura 1:

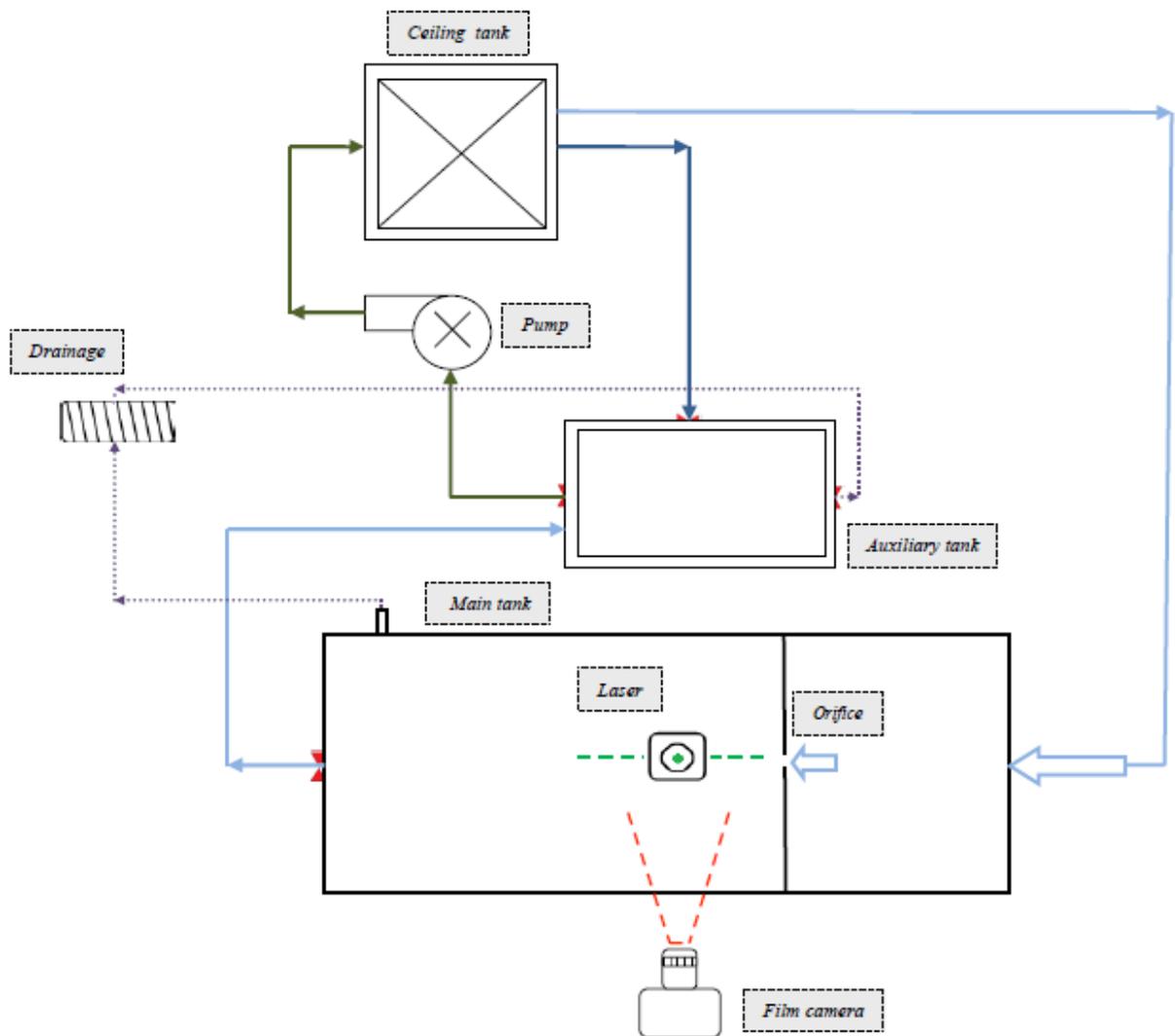


Fig. 2. Disposición de los componentes del primer experimento.

Dado que estamos interesados en analizar la resolución espacial, conviene fijar el resto de parámetros a fin de realizar un estudio lo más parecido posible en cada una de las resoluciones seleccionadas. Así, el número de Reynolds se fija a 35000, lo cual nos asegura trabajar en régimen turbulento.

La adquisición de imágenes se realiza con una cámara de alta velocidad, capaz de realizar los dos fotogramas necesarios de la técnica PIV en un intervalo de tiempo muy pequeño. Dicha cámara se sincroniza con el láser, de modo que la cámara capture una imagen en el instante en que el láser ilumina el chorro. En nuestro caso se llevaran a cabo diez series de 2048 fotogramas para cada una de las cuatro distancias. El objetivo de realizar tantas imágenes es poder llevar a cabo luego un análisis estadístico

suficientemente fiable. Una vez realizadas las imágenes se exportan a un software específico para PIV, llamado LaVision, en el que se llevan a cabo dos procesos:

- Uno primero en el que se optimiza la calidad de las imágenes eliminando defectos aislados de cada una que puedan distorsionar el análisis estadístico.

- Otro en el que se computa el campo instantáneo de velocidades de cada punto del área estudiada (tanto dentro como fuera del chorro)

Se ha decidido dividir el experimento en dos grandes partes, una primera donde se analiza el campo de velocidades del chorro turbulento, y otra segunda donde la recuperación de la isotropía es analizada:

- En la primera las siguientes variables fluidas son estudiadas: velocidad media axial, velocidad axial fluctuante cuadrática media, velocidad transversal fluctuante cuadrática media y esfuerzo de Reynolds.

- En el segundo los parámetros que muestran la recuperación de isotropía son calculados (skewness, kurtosis, derivadas cuadráticas de la velocidad fluctuante), así como la disipación de la energía cinética turbulenta.

En ambos casos se estudia la evolución de los parámetros o variables a lo largo de la línea central del chorro, pero también a lo largo de secciones transversales -perpendiculares al chorro- a fin de obtener una información lo más completa posible del comportamiento de un chorro turbulento.

DESCRIPCION DEL SEGUNDO EXPERIMENTO: EFECTO DEL NUMERO DE REYNOLDS EN TURBULENCIA

Una vez que hemos trabajado con la resolución espacial del método PIV, con este segundo experimento se pretende profundizar un poco más en el estudio del chorro turbulento variando ahora el número de Reynolds y mostrando especial interés en la

evolución del mismo a lo largo de su línea central. La nueva disposición de los elementos del sistema para llevar a cabo este nuevo experimento se muestra en la fig 3.

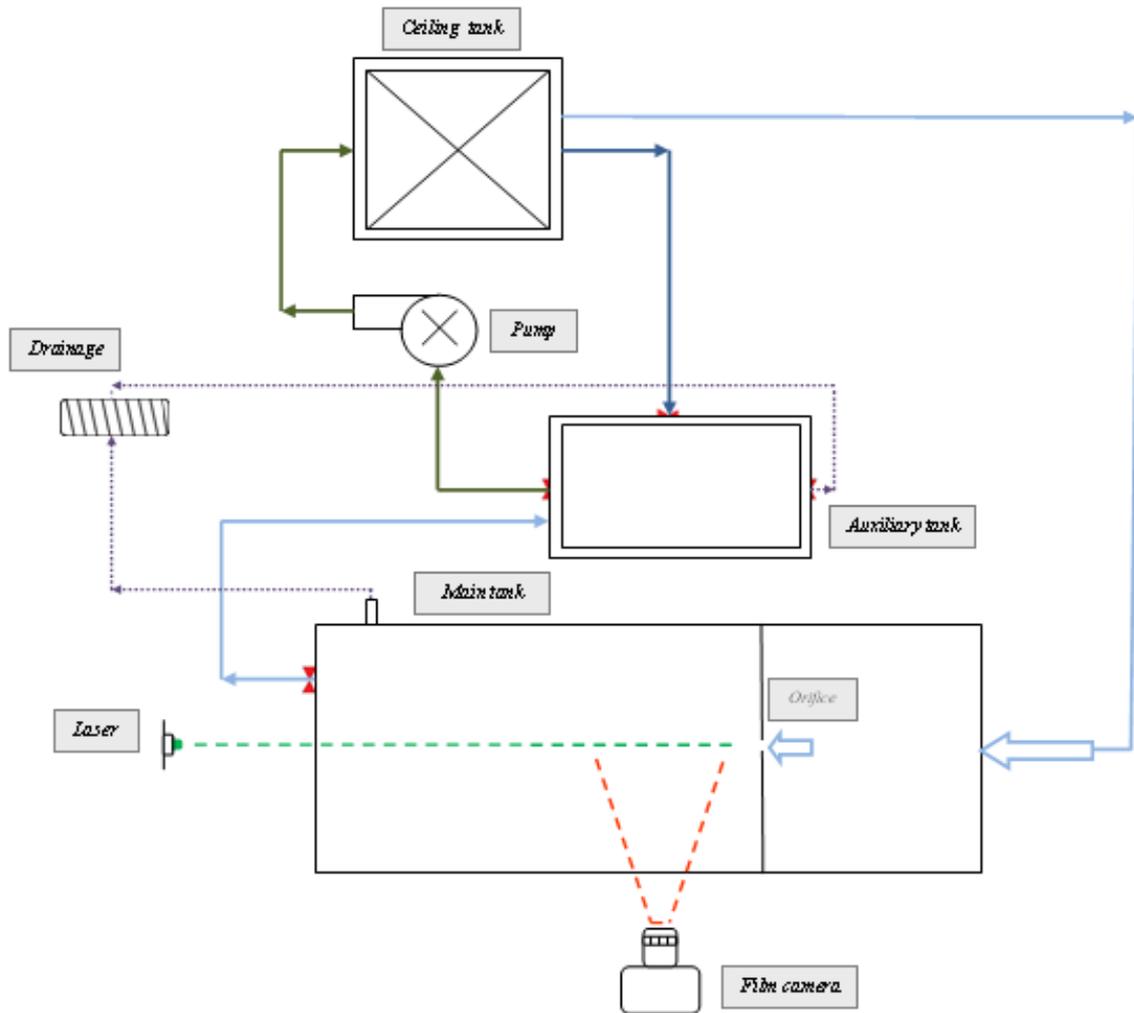


Fig.3 Disposición de los componentes en el laboratorio para la realización del segundo experimento

Para ello, en base a los resultados obtenidos en el primer experimento, y teniendo en cuenta que en este caso el diámetro del orificio es menor (1cm en vez de 3cm) seleccionamos una resolución de 15Dx15D y nos movemos paralelamente al chorro considerando tres zonas diferentes como se indica a continuación (vease fig.4)

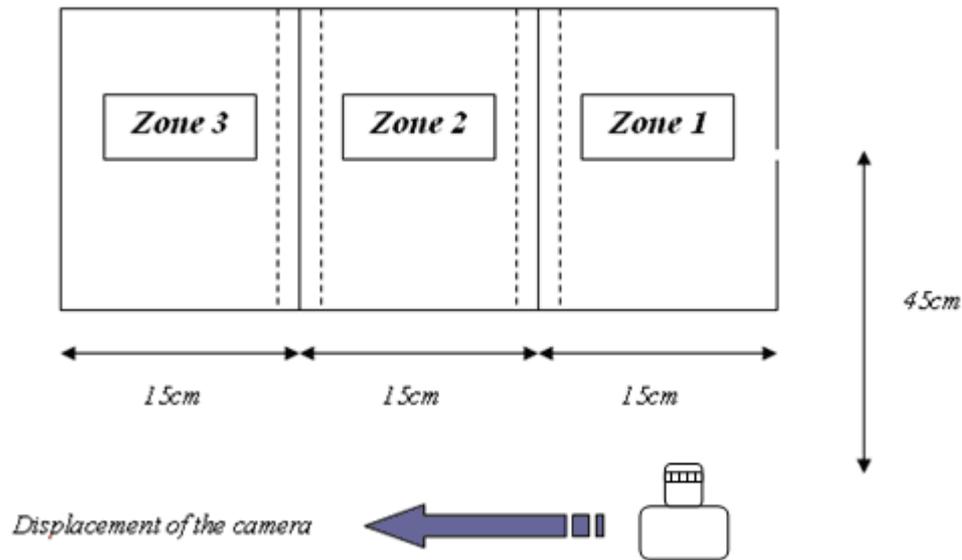


Fig.4 Esquema de las diferentes zonas estudiadas especificando el desplazamiento seguido por la cámara.

Para poder alcanzar los objetivos propuestos se realizan una serie de modificaciones respecto al experimento anterior:

- Para cada serie de medidas (se utilizan ocho números de Reynolds entre 700 y 70000) se realiza una sola adquisición de imágenes (cada set tendrá 2048 imágenes), y esto se repetirá a su vez, para cada una de las tres zonas consideradas a estudio. Es importante destacar que el análisis estadístico se verá ligeramente afectado por la considerable reducción del número de imágenes tomadas.
- Se introduce un fluxómetro a la salida del tanque principal que sustituye a la válvula existente (mucho menos sensible a los cambios) con el fin de facilitar la obtención de los diversos números de Reynolds utilizados.
- La posición del láser se ve también modificada. Se sitúa ahora detrás de la pared del tanque principal por donde se encuentra la salida del chorro (de forma que el plano de iluminación generado por el mismo ilumine aguas arriba e aguas abajo del chorro).
- Además, para cada uno de los números de Reynolds sometidos a estudio se varían todos los parámetros introducidos en el sincronizador, la resolución de la cámara y el número de frames per second (fps)

utilizados. A continuación se presenta, a modo de ejemplo, la tabla 1 que resume los parámetros empleados para el caso $Re=70000$:

	Re=70000		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Canal C	0.00200	0.00200	0.00200
Canal D	0.00267	0.00267	0.00267
Canal E	0.00225	0.00250	0.00300
Canal F	0.00292	0.00317	0.00367
Canal G	0.00250	0.00250	0.00250
Δt (s)	0.00025	0.00050	0.00100
Fps	4000	2000	1000
Resolution (pixels)	1024x512	1024x1024	1024x1024

Tabla 1 Parámetros seleccionados para trabajar con el sistema de adquisición de imágenes ($Re=70000$).

Al igual que en el primer experimento, a partir del post-procesamiento de las imágenes adquiridas se calculan los parámetros turbulentos, se realiza un análisis del campo de velocidades y se comprueba la recuperación de las condiciones de isotropía.

Las conclusiones obtenidas para ambos experimentos se detallan en la sección siguiente.

CONCLUSIONES

Para confrontar los resultados obtenidos en ambos experimentos se ha utilizado, principalmente, el artículo publicado por *Romano et Falchi* (Recovering isotropy in turbulent jets, Department of mechanics and aeronautics Università La Sapienza, Roma, INSEAN).

Se ha comprobado la importancia de pre-procesar las imágenes con un software específico para esta técnica, Davis en nuestro caso. Mediante el cálculo y posterior

extracción de la mínima intensidad luminosa a cada uno de los fotogramas, la calidad de éstos se ve notablemente mejorada, favoreciendo así el posterior cálculo del campo de velocidades.

Primer experimento

Analizando las gráficas realizadas con Matlab a partir de los campos de velocidades proporcionados por Davis, se concluye que el chorro se comporta como libre y que la región correspondiente al “potential core” se extiende hasta la sección $x/D=4$.

En relación a la recuperación de isotropía, el comportamiento de los distintos parámetros turbulentos es el siguiente:

- La relación u'/v' no tiende al valor teórico (1), sino al experimental (1,4).
- La kurtosis y la skewness alcanzan su valor isotrópico con bastante exactitud (3 y 0 respectivamente), sobre todo a partir de la resolución 5D, donde el chorro está suficientemente desarrollado.
- Los resultados obtenidos para las relaciones de las derivadas cuadráticas medias de la velocidad, y para la disipación de la energía cinética turbulenta “ ϵ ” se aproximan bastante a los experimentales obtenidos por Romano et Falchi, si bien divergen un poco de lo esperado en base a la teoría, sobre todo en los casos de K_1 y K_4).

Las posibles fuentes de error que justifiquen estas divergencias son la falta de hermeticidad del tanque de ensayo que provoca la existencia de pequeñas burbujas de aire que distorsionan el movimiento de las partículas dispersas en el chorro, así como la sedimentación de las mismas, que se acumulan en el fondo.

Finalmente, del análisis de la evolución de todos los parámetros turbulentos se concluye que la mejor resolución espacial de las cuatro estudiadas es la de 3D, por ser

en la que existe un mejor compromiso entre la posibilidad de analizar las microescalas de la turbulencia, y la de abarcar una región suficientemente amplia que evite desplazar excesivamente la cámara en caso de estudiar el campo lejano al orificio.

Segundo experimento

Analizando el comportamiento del chorro en función del número de Reynolds, se observa que:

- La región correspondiente al núcleo de potencial termina más lejos del orificio a medida que aumenta el número de Reynolds. Por ejemplo, para $Re=700$ finaliza en la sección $x/D \approx 4,4$, mientras que para $Re=70000$ en $x/D \approx 5,1$.
- Los perfiles transversales representados son un claro ejemplo de la axial simetría del chorro, especialmente para números de Reynolds elevados.
- Se comprueba, como predice la teoría, que al representar adimensionalmente los perfiles de la velocidad media axial todos tienden a converger, demostrando la autosemejanza del chorro.
- Este segundo experimento muestra de manera más clara la recuperación de isotropía del chorro, ya que el estudio se extiende a regiones más lejanas aguas abajo. Así, el valor isotrópico experimental de la relación u'/v' y los teóricos para skewness y kurtosis se alcanzan a partir de la sección $x/D=5$. Conviene reseñar que las derivadas cuadráticas medias de la velocidad (K_i) y la disipación de energía cinética turbulenta (ϵ_{s_i}) no han sido estudiados en este caso debido a la escasa resolución espacial escogida.
- Finalmente se puede afirmar que la recuperación de isotropía no es altamente dependiente del número de Reynolds, ya que se alcanza aproximadamente en la misma sección en los ocho casos estudiados.