



Proyecto Fin de Carrera

Estudio experimental en el campo cercano e
intermedio de un flujo turbulento circular

Autor/es

Jorge Sorbe Casorrán

Director/es y/o ponente

Pilar García Navarro
Shahriar Ghahremanian

Escuela de Ingeniería y Arquitectura / Universidad de Zaragoza
2016

RESUMEN GENERAL

Este proyecto estudia el flujo turbulento a bajo número de Reynolds a la salida de una tobera. El objetivo del proyecto es la verificación de los datos del método Particle Image Velocimetry (PIV) con otros autores y analizar el flujo en la zona cercana e intermedia.

El proyecto ha sido dividido en tres partes: procesamiento de los datos obtenidos mediante el método PIV, los datos han sido normalizados y unidos; validez de los mismos, mediante la comparación con datos de otros autores y métodos; y análisis de la zona cercana y de transición.

Una vez definido el método de trabajo, los resultados y su discusión son mostrados. La preparación de los datos obtenidos experimentalmente se ha realizado con gran precisión a lo largo del documento. La verificación de los datos obtenidos ha sido afirmativa habiendo obtenido una gran similitud con los datos de otros autores y métodos.

En el análisis se han obtenido varios patrones y una ecuación verificada para la región de transición y cercana. En la región cercana, un modelo ha sido encontrado para la auto similitud de la intensidad de turbulencia. En la región de transición, la velocidad media inversa ha sido probada que sigue una función lineal dependiente del número de Reynolds y la geometría de la tobera; y que la auto similitud de la velocidad media sigue el patrón de una distribución Gaussiana.

Finalmente, se han evaluado las zonas principales de formación de los remolinos mediante la energía cinética turbulenta. Estos vórtices se forman en la salida de la tobera y la zona de cohesión de la región cercana e intermedia.

Tabla de contenido

RESUMEN GENERAL	1
TABLA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABLAS.....	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Número de Reynolds	6
1.2 Ley de Sutherland.....	6
1.3 Ecuaciones del flujo.....	6
2. PROCESO	8
2.1. Datos del estudio.....	8
2.2. Tratamiento de los datos del método PIV	9
2.3. Validación de los valores del método PIV	9
2.4. Análisis de la zona cercana y de transición en el flujo turbulento.....	9
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL FLUJO	10
3.1. Procesamiento de los datos obtenidos en el ensayo del método PIV.....	10
3.2. Validez de los datos obtenidos en el método PIV.....	11
3.3. Análisis de la zona cercana y de transición en el flujo turbulento.....	19
3.4. Fortalezas y debilidades	22
4. CONCLUSIONES	24
5. BIBLIOGRAFÍA	25
ANEXO 1: An experimental study in the near field of a turbulent round free jet.....	27

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un fluido libre en coordinadas axiales.....	5
Figura 2. Diferentes zonas de los datos del PIV de entrada.....	8
Figura 3. Evolución de la velocidad media en el sentido del flujo a lo largo de la línea de simetría.....	11
Figura 4. Comparación de la velocidad media a lo largo de la línea simétrica de desarrollo del flujo de estudios realizados por varios autores y métodos.	12
Figura 5. Comparación de la velocidad media en varios puntos del eje axial entre el método HWA y PIV.	13
Figura 6. Intensidad de turbulencia normalizada con velocidad en la linea central a lo largo del eje de desarrollo del flujo.	14
Figura 7. Perfiles de intensidad de turbulencia para el método PIV a lo largo de su desarrollo.	15
Figura 8. Intensidad de turbulencia radial a lo largo de la línea central de desarrollo del flujo.	15
Figura 9. Perfil de intensidad radial en la zona de transición.	16
Figura 10. Esfuerzo de Reynolds en la zona cercana a la tobera.	17
Figura 11. Esfuerzo de Reynold en la zona de transición.	17
Figura 12. Auto similitud de la velocidad media a lo largo de la línea simétrica del flujo.	18
Figura 13. Auto similitud de la intensidad de turbulencia durante el desarrollo del flujo.	18
Figura 14. Energía cinética turbulenta a lo largo de la línea central de desarrollo del flujo.	19
Figura 15. Energía cinética turbulenta a la salida de la tobera.	20
Figura 16. Perfiles de energía cinética turbulenta a lo largo del desarrollo del flujo.	20
Figura 17. Campo vectorial de la evolución de la velocidad en distintas regiones.....	21

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones y velocidades de referencia en cada zona.	10
Tabla 2. Características de las gráficas de turbulencia para los datos de Todde y PIV.....	14

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, será explicado la razón de ser del proyecto, es decir el objeto y el alcance del mismo. Los trabajos en los que ha sido basado y las diferentes técnicas utilizadas en la consecución del trabajo serán mencionados en ámbitos generales para ser desarrollados posteriormente. Finalmente, se expondrá una breve introducción de cada capítulo contenido en esta memoria.

El flujo turbulento puede encontrarse en muchas de las actividades diarias, como el flujo de un río, el humo de una chimenea, los vórtices formados por las aspas de un helicóptero, etc. En la industria, también es habitual su aparición, como en la mezcla de fluido, en el transporte, etc. Es por ello, que es necesario poder predecir el comportamiento de los fluidos para adaptar lo más convenientemente posible los equipos utilizados en el transporte de fluidos para todos sus casos.

A lo largo de los años, diferentes autores han estudiado la evolución del flujo en sus diferentes regiones. Los primeros estudios datan del siglo 18, cuando Reynolds estudió la transición del flujo laminar al turbulento. Entre los años 1950 y 1960 han sido muchos los autores que han estudiado el comportamiento de diferentes flujos y en las diversas zonas. Algunos de los más destacados son Wygnanski y Fiedler, Pachapakesan y Lumley, Hussein et Al, Bogulawski y Popiel, Quinn y Militzer, etc.

En este proyecto se estudiará un flujo a la salida de una tobera. Este flujo es generado como consecuencia de la variación de presión producida por la contracción de la boca de la tobera. A la salida de la misma, el flujo llegará con un perfil laminar y será entonces cuando el fluido cambie su régimen debido a entrar en contacto con el ambiente. Este fluido se desarrollará hasta generarse un flujo turbulento. Este fluido será dividido en tres zonas diferentes desde su salida de la tobera, como puede verse en la figura 1.

- Región cercana a la salida de la tobera. Las características de velocidad del flujo son similares a las de la tubería, es decir, con un perfil de sombrero de copa y pueden variar en cierto modo dependiendo del tipo de tobera.
- Región intermedia o zona de transición. En esta zona, el flujo forma una estructura turbulenta con alta anisotropía, que depende del número de Reynolds y la geometría de la tobera. Esta zona y la anterior son conocidas como las zonas de desarrollo del flujo.
- Región lejana o zona turbulenta completamente desarrollada. En esta zona el flujo es turbulento y existe posibilidad de su estudio debido a la auto-similitud. La velocidad de desarrollo del fluido normalizada por el número de Reynolds a lo largo de la línea central sigue la ecuación 1.

Ecuación 1.

$$\frac{U}{U_0} = \text{constante} \left(\frac{d_0}{y - y_p} \right)$$

Donde d_0 es el diámetro de la tobera y $(y - y_p)$ es el origen virtual.

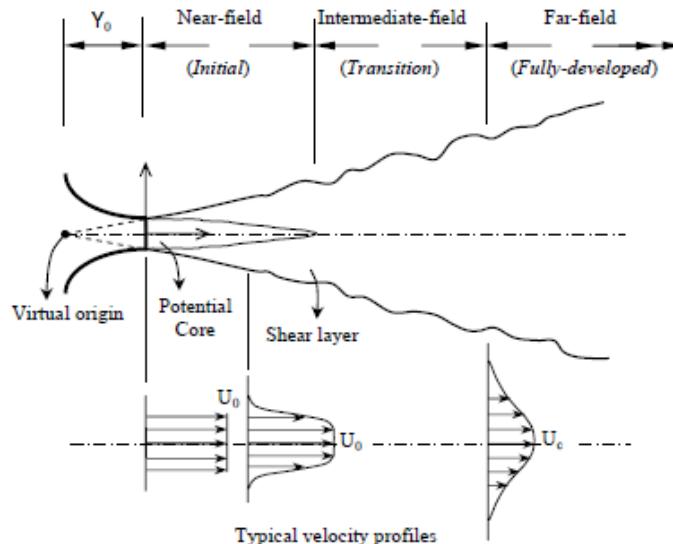


Figura 1. Esquema de un fluido libre en coordenadas axiales.

Este trabajo surge del desconocimiento de la zona de transición, el cual es citado en el estudio científico “The flow field in turbulent round free jets” realizado por Ball et al. (2012) [3]. En el cual nombra el desconocimiento generalizado de la zona debido a la escasez de trabajos sobre la misma. En su contra, la zona desarrollada está perfectamente definida, y por tanto, se puede predecir perfectamente la evolución del flujo en ella.

Por todo lo desarrollado en este capítulo, el objeto de este proyecto será el estudio de la zona de transición y cercana, para tratar de comprender la evolución del flujo y tratar con ello de aportar un mayor conocimiento de la misma. Se estudiarán datos obtenidos por los métodos PIV (Particle Image Velocimetry) y HWA (Hot Wire Anemometry) en dos dimensiones, los cuales serán validados, previos a la consecución de su análisis, comparándolos entre ellos y con técnicas teóricas obtenidas por otros autores.

En el proyecto, serán utilizados los datos del método PIV obtenido desde una sola posición de cámara y en condiciones normales de la sala habilitada para la toma de datos. Serán obviadas influencias posibles de diferentes condiciones de la zona ambiente en la que podría encontrarse en caso de aplicarlo a la realidad.

El método PIV es un sistema óptico de visualización del flujo usado en investigación y desarrollo de flujos. Proporciona velocidades instantáneas del mismo y diversas propiedades. Estas variables son obtenidas por la visualización del movimiento de pequeñas partículas trazadoras del flujo que son visibles mediante una cámara y un haz de luz. Su principal ventaja frente a otros métodos es que no disturba el flujo, por el contrario, su principal defecto es que se asume que las partículas siguen el movimiento del flujo, por lo que es muy importante su correcta selección. Este método es explicado con mayor precisión en el anexo 1, apartado 2.6.

1.1 Número de Reynolds

El número de Reynolds es una característica del flujo adimensional que será utilizada a largo del proyecto. Sirve tanto para flujo laminar como turbulento y se define en la ecuación 2.

Ecuación 2.

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} = \frac{U \cdot D}{v\mu}$$

Donde ρ es la densidad, U es la velocidad del fluido, D es el diámetro de la tobera, μ es la viscosidad y $v\mu$ es la viscosidad cinética.

1.2 Ley de Sutherland

Esta ley nos permite calcular la viscosidad de un fluido siempre que lo consideremos un gas ideal según la ecuación 3.

Ecuación 3.

$$\mu = \mu_{ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{2/3} \cdot \frac{T_{ref} + S}{T + S}$$

Donde S es la temperatura de Sutherland (k) (110,4 para el aire) y T y T_{ref} la temperatura y la temperatura del aire respectivamente.

1.3 Ecuaciones del flujo

Las ecuaciones que representan el movimiento de un fluido tanto laminar como turbulento son las ecuaciones de continuidad y Navier-Stokes.

La ecuación de continuidad es obtenida de la ley de conservación de la masa y es expuesta en la ecuación 4.

Ecuación 4.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho(x, t) dV = - \int_{\delta V} \rho(x, t) \vec{u}(x, t) d\vec{S} = - \int_V \vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{u}) dV$$

Donde V es el volumen y δV es el área del volumen.

Si suponemos estado estático y volumen incompresible, la ecuación 5 se puede aplicar a la ecuación 4.

Ecuación 5.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad \text{ó} \quad \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

La ecuación de Navier-Stokes proviene de la segunda ley de Newton donde la variación temporal del momento es igual al sumatorio de las fuerzas en el volumen (ecuación 6).

Ecuación 6.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot \vec{u} \cdot dV = - \int_{\delta V} \rho(x, t) dS + \int_V B(x, t) dV + \int_{\delta V} \sigma(x, t) dS$$

Donde el primer componente de fuerza es la presión ejercida sobre la superficie del volumen, el segundo las fuerzas del cuerpo y el tercero es debido a los esfuerzos internos.

Si suponemos que es un gas ideal, estático, tridimensional e incompresible y aplicando el teorema de la divergencia, se obtiene la ecuación 7.

Ecuación 7.

$$\frac{\partial(U_j U_i)}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial P}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right)$$

2. PROCESO

En este capítulo, el método utilizado en la consecución del proyecto va a ser explicado. La tesis ha sido dividida en cuatro apartados: información de partida, tratamientos de los datos del método PIV, validación de los valores del método PIV y análisis de la zona cercana en el flujo turbulento.

2.1. Datos del estudio

Los datos han sido obtenidos en cuatro zonas en tiempos diferentes. Cada una de estas zonas tienen una longitud aproximada de 8 veces el diámetro de salida de la tobera, como se puede ver en la figura 2. Estas áreas tienen una pequeña zona de intersección, la cual deberá ser separada para que los datos sean consecutivos.



Figura 2. Diferentes zonas de los datos del PIV de entrada.

Las magnitudes que se han obtenido son:

- Velocidad en las dos dimensiones.
- Velocidad media.
- Energía cinética.
- RMS de la velocidad en las dos dimensiones.
- RMS de la velocidad media.
- Energía cinética turbulenta.
- Esfuerzo Reynolds (XX, YY, XY).
- Esfuerzo de cizalla turbulento.

Para cada zona en la que se han obtenido los valores son conocidos las condiciones del experimento, número de Reynolds, temperatura, presión, humedad y frecuencia.

2.2. Tratamiento de los datos del método PIV

El objetivo de este apartado es unificar las cuatro zonas en una sola para poder trabajar con una superficie uniforme y continua a lo largo de la línea de desarrollo del flujo.

El primer paso será estandarizar los valores de todas las zonas mediante una velocidad de referencia (bulk velocity), calculada a partir de la ecuación de Reynolds y la regla de Sutherlands, ver apartado 3.2 del anexo 1. Para el cálculo de la velocidad de referencia de cada zona serán utilizadas las condiciones del experimento.

Una vez los datos están estandarizados, el siguiente punto será la unificación de los datos en una sola superficie como ha sido explicado anteriormente. Para calcular la línea óptima de unión, dos métodos diferentes serán utilizados: cálculo de la mínima área de la diferencia de todos los puntos y magnitudes de las zonas de intersección, y la comparación visual de las diferentes magnitudes, tanto en el desarrollo a lo largo de la línea central y los diferentes perfiles del flujo en todos los puntos de las zonas de intersección. Ambos métodos son desarrollados en el anexo 1, apartado 3.2.

2.3. Validación de los valores del método PIV

Para aceptar los valores obtenidos experimentalmente mediante el método PIV, se compararán las diferentes características obtenidas del mismo con otros estudios o métodos experimentales explicado posteriormente. Las magnitudes comparadas son explicadas en el anexo 1, apartado 3.3.

2.4. Análisis de la zona cercana y de transición en el flujo turbulento

Una vez corroborados los datos, un análisis de la zona cercana e intermedia será realizado. El cual será expuesto mediante gráficos y notaciones para continuar contribuyendo en este campo de los flujos turbulentos todavía sin total conocimiento. Las diversas partes analizadas son expuestas en el anexo 1, apartado 3.4.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL FLUJO

En este apartado, en primer lugar, se van a procesar los datos obtenidos en el método PIV para su posterior estudio, a continuación se utilizarán diversos métodos para validar los mismos, y finalmente un estudio de los resultados obtenidos será presentado.

3.1. Procesamiento de los datos obtenidos en el ensayo del método PIV.

Una vez conocidos los datos de los experimentos, el objetivo de este punto es unir las diferentes zonas generadas como consecuencia de la toma de medidas. En primer lugar, se normalizarán los datos al no tener las mismas condiciones de medida en todas las zonas. Seguidamente, se hallará el punto óptimo para unir las cuatro zonas con las que se cuenta.

Para normalizar los datos según las condiciones de medida, una velocidad de referencia ha sido calculada en función de sus condiciones. Ella ha sido obtenida de la ecuación de Reynolds y la ley de Sutherland, ver anexo 1, apartado 3.2. En la tabla 1, se puede ver los datos que se han obtenidos, todos ellos muy similares debido a la similitud en las condiciones de las diferentes tomas de medida.

Tabla 1. Condiciones y velocidades de referencia en cada zona.

	Temperature (ºC)	Pressure (mbar)	Humidity (%)	Bulk velocity (m/sec)
Zone 1	22	1010	37	8,67
Zone 2	22	1009	38	8,68
Zone 3	22	1008	41	8,69
Zone 4	23	1012	32	8,71

Como se puede ver en la figura 3, no se puede establecer una zona óptima de unión de las diferentes regiones visualmente. En la velocidad en el sentido del flujo a lo largo del eje simétrico de la tobera, se puede apreciar la similitud de los datos en las zonas de unión de las zonas por lo que será necesario calcular el área de todos los puntos en todas las magnitudes para seleccionarlos. En el anexo 1, apartado 4.1, se pueden ver muchas otras gráficas y la similitud de las gráficas.

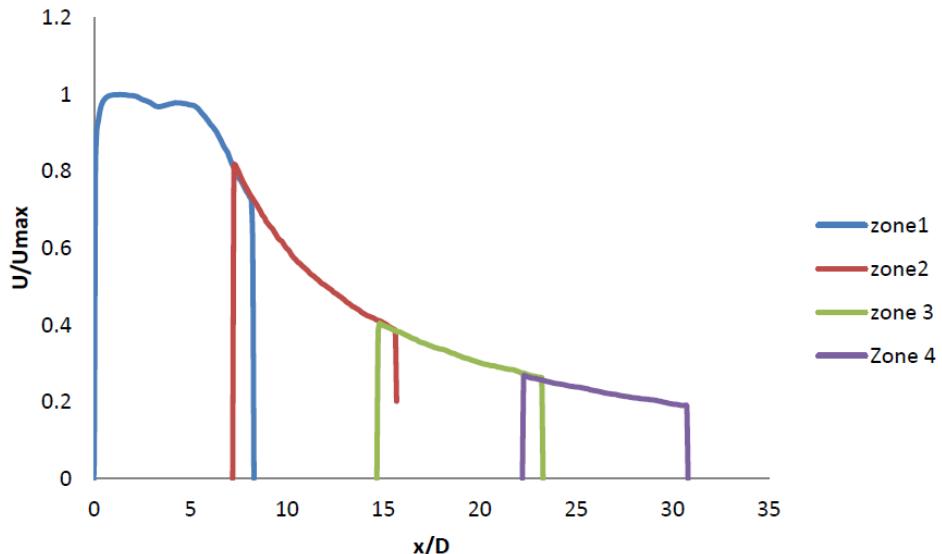


Figura 3. Evolución de la velocidad media en el sentido del flujo a lo largo de la línea de simetría.

Mediante el método de mínimas áreas, se puede observar en las tablas 4.2, 4.3 y 4.3 del anexo 4.1, los puntos donde se unirán las diferentes zonas duplicadas.

3.2. Validez de los datos obtenidos en el método PIV.

Diversas variables y perfiles se van a analizar en el proyecto, tanto valores a lo largo de la línea de desarrollo del flujo como perfiles en la misma.

- **Velocidad media a lo largo de la línea simétrica que sigue el flujo:**

En la gráfica de abajo, se puede apreciar la similitud entre los datos obtenidos en el estudio objeto del proyecto con el de otros métodos y autores. En la zona cercana a la tobera ($y/D < 5$), la velocidad permanece constante, pese a que previamente se produce una oscilación dependiente del número de Reynolds, por lo que algunos de los valores varían. Otras pequeñas divergencias en estas zonas son causadas por esto y la geometría de la tobera.

En la zona de transición, el decaimiento de la velocidad es similar en todos los estudios y difícil de asemejar en la figura 4. En el anexo 1, apartado 4.2, se ha estudiado el inverso de esta función, pudiendo observar que la pendiente de la gráfica es ligeramente inferior a datos de Todde, siendo debido a la geometría de la tobera y a la posición de la pared de donde sale la misma.

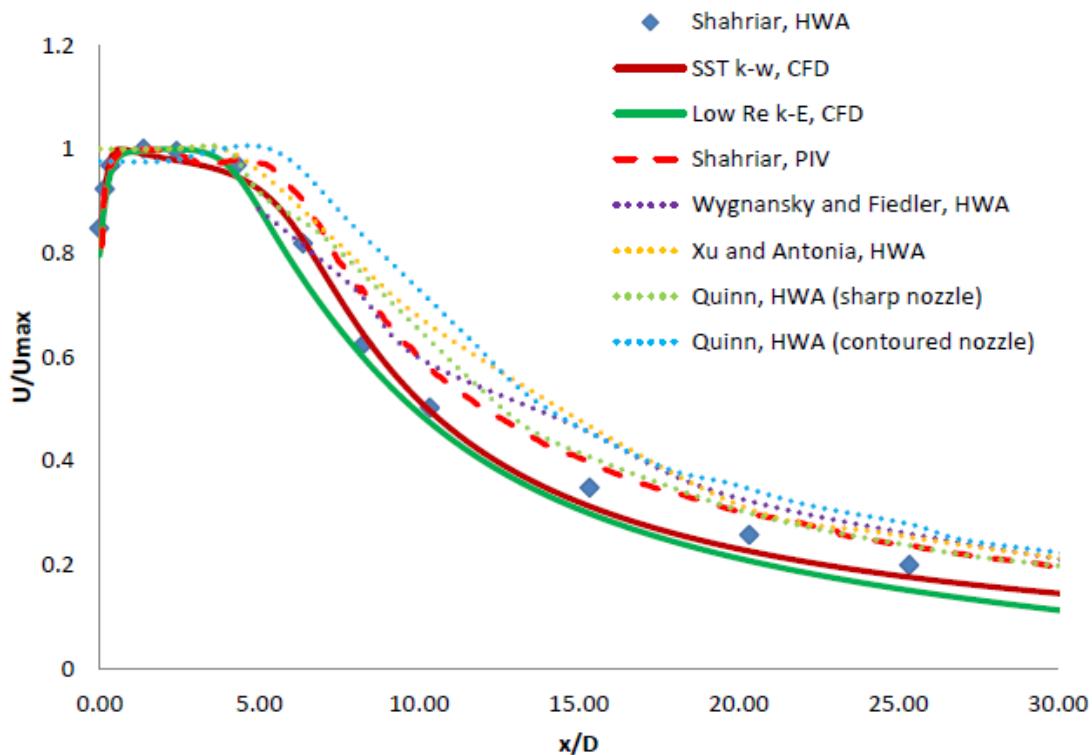


Figura 4. Comparación de la velocidad media a lo largo de la línea simétrica de desarrollo del flujo de estudios realizados por varios autores y métodos.

- **Perfiles de velocidad media en sentido de desarrollo del flujo:**

En la figura 5, se puede observar la evolución de los perfiles de velocidad a lo largo de la línea simétrica de evolución del flujo. El flujo comienza con forma de silla de montar, que evoluciona en perfil de sombrero de copa para terminar con forma de campana de Gauss.

En el anexo 1, apartado 4.2, se pueden ver los perfiles de velocidad obtenidos en el estudio de Mi et al. en comparación con los del método PIV. Se puede apreciar la similitud entre ellos. También se ha comparado el punto de velocidad normalizada máxima ($U/U_c = 1,08$) que es similar al de otros estudios.

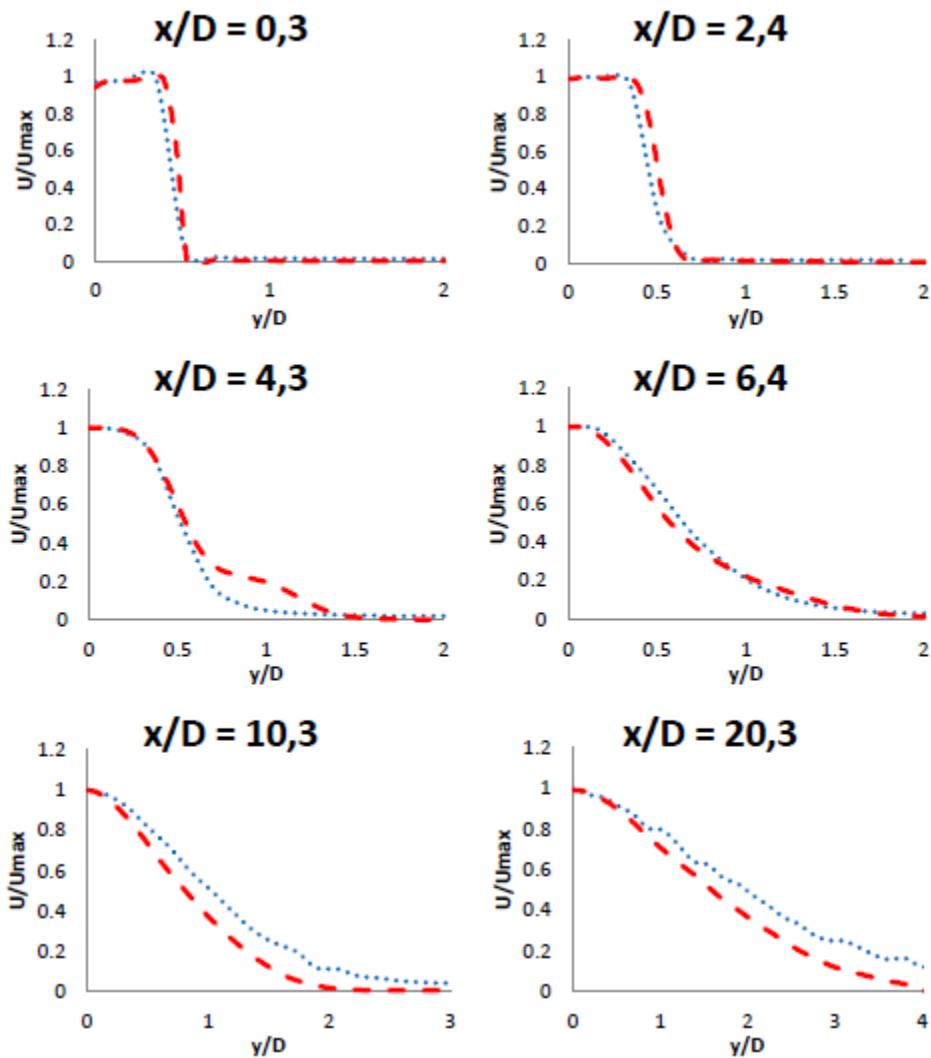


Figura 5. Comparación de la velocidad media en varios puntos del eje axial entre el método HWA y PIV.

- **Intensidad de turbulencia a lo largo de la línea de desarrollo del flujo.**

En la figura 6 se muestra la evolución de la magnitud del enunciado normalizada por la velocidad de la línea central de varios investigadores. En la primera región ($1 < y/D < 5$), la gráfica crece hasta el primer máximo local que se encuentra en $y/D \approx 4,5$, este valor puede variar según el número de Reynolds. A continuación la magnitud decrece hasta encontrar un mínimo en $y/D \approx 5,5$. Seguidamente la gráfica aumenta hasta el máximo global que se encuentra en $y/D \approx 8$, y finalmente la magnitud se estabiliza adiabáticamente.

En la tabla 2, se muestra los valores de los puntos máximos y mínimos de la gráfica según Todde y un valor igual de Reynolds. Las diferencias apreciadas son debidas a la diferencia en la geometría de la tobera y la diferencia en la distancia de la colocación de la pared detrás de la tobera.

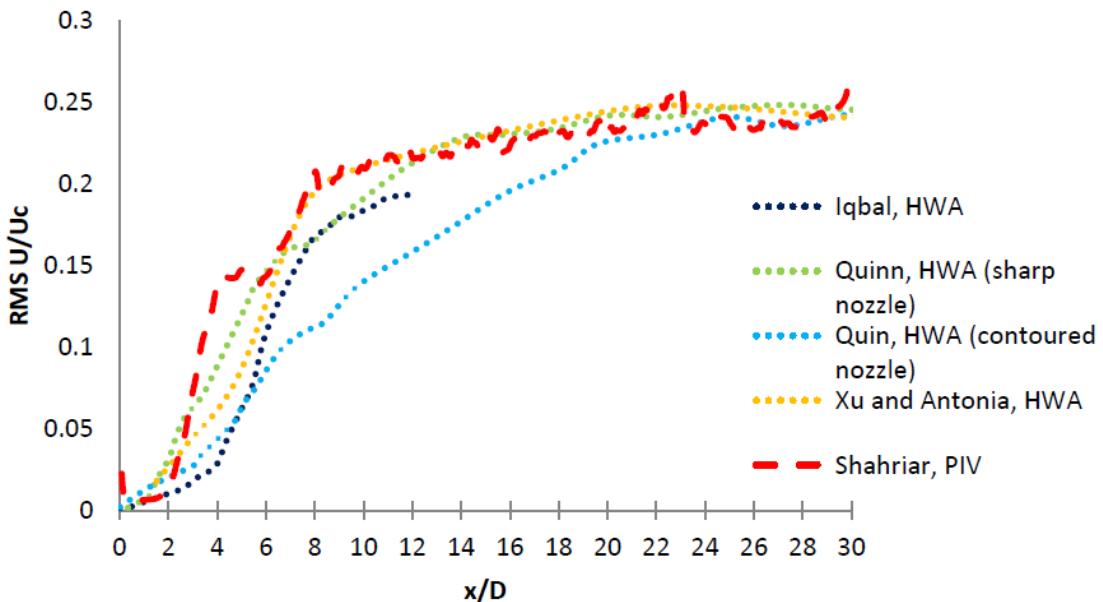


Figura 6. Intensidad de turbulencia normalizada con velocidad en la linea central a lo largo del eje de desarrollo del flujo.

Tabla 2. Características de las gráficas de turbulencia para los datos de Todde y PIV.

	First peak		Dwell		Second peak		Plateau
	y/D	Level (%)	y/D	Level (%)	y/D	Level (%)	Level (%)
PIV	4,5	14,3	5,4	14,3	8	20,4	24
Todde [17]	4,1	21	6,1	17,5	10	23	23,5

- **Perfiles de intensidad de turbulencia durante el desarrollo del flujo.**

En otros estudios se puede apreciar que el pico de intensidad aparece a una distancia de $0,5 \cdot D$ para zonas cercanas a la tobera ($y/D = 1$) y con un valor absoluto de 0,025. En la figura 7, se puede observar que en $1,38 \cdot D$, en nuestros datos aparece este pico en $0,46 \cdot D$ con el mismo valor absoluto. Para las siguientes imágenes, se puede observar que la caída es mayor.

En el anexo 1, apartado 4.2, otras comparaciones han sido realizadas para valores dentro de la zona de transición, comprobando la similitud de los mismos.

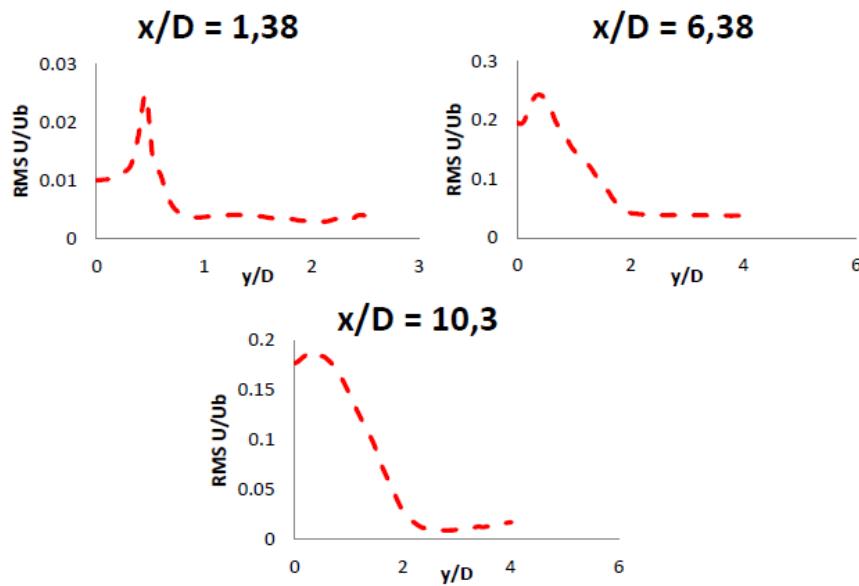


Figura 7. Perfiles de intensidad de turbulencia para el método PIV a lo largo de su desarrollo.

- **Intensidad de turbulencia radial a lo largo de la línea de desarrollo del flujo.**

En la figura 8 se compara esta magnitud con otros autores, pudiendo apreciar una alta similitud. En la zona cercana, la intensidad es nula hasta $y/D = 2$. A continuación un fuerte incremento es observado hasta $y/D = 8$ y un valor de 0,15. Finalmente esta magnitud es estabilizada en 0,2.

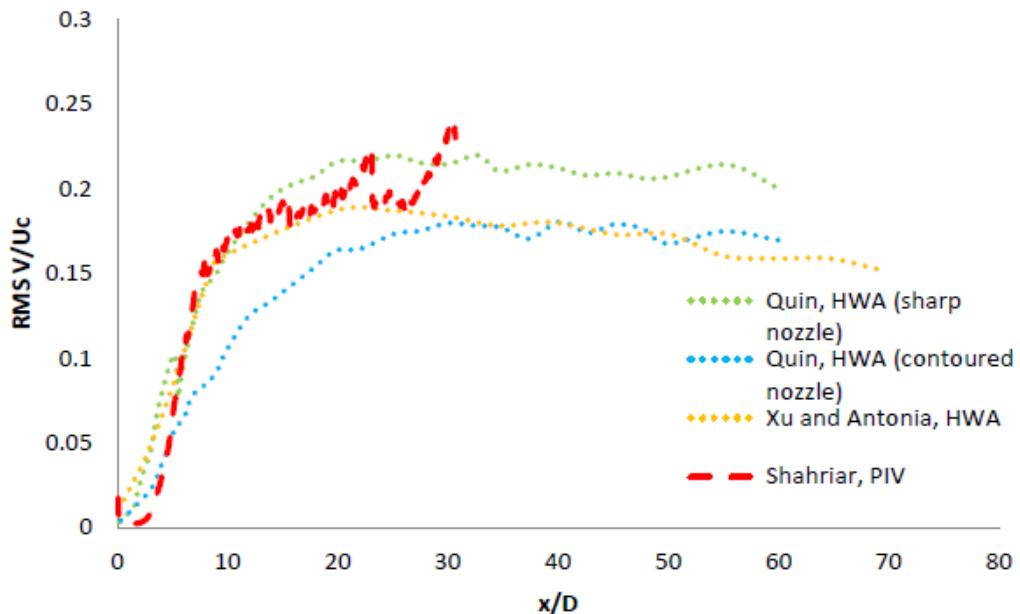


Figura 8. Intensidad de turbulencia radial a lo largo de la línea central de desarrollo del flujo.

- **Perfiles de intensidad de turbulencia radial.**

El perfil del estudio de Weisgraber y Liepmann y los datos PIV han sido comparados en la zona de transición, figura 9. La evolución de los mismos es igual pese a que su valor es distinto debido a la diferencia en el número de Reynolds y la geometría de la tobera.

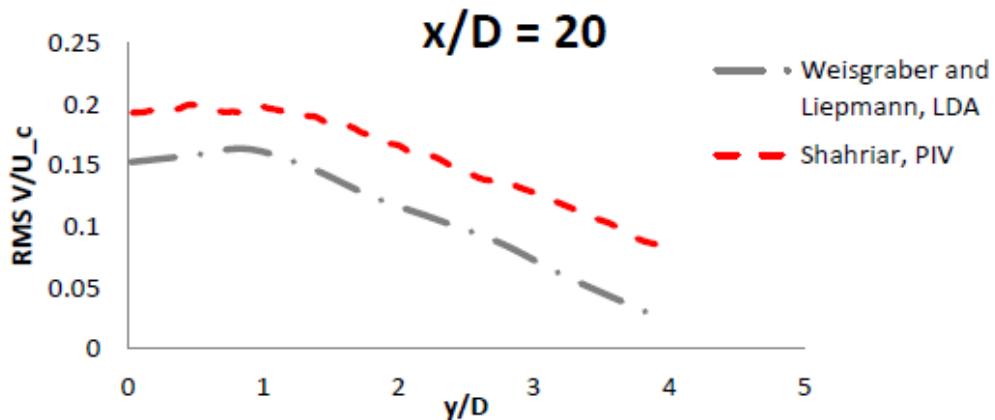


Figura 9. Perfil de intensidad radial en la zona de transición.

- **Perfiles para esfuerzos de Reynolds.**

Esta magnitud sigue el mismo patrón de desarrollo que los autores con los que ha sido comparado, pese a que los valores son un tanto diferentes debido a la geometría de la tobera, figura 10. En la zona cercana a la tobera es más apreciable esta variación, ya que la función obtenida es más estrecha y el valor obtenido mayor, figura 11.

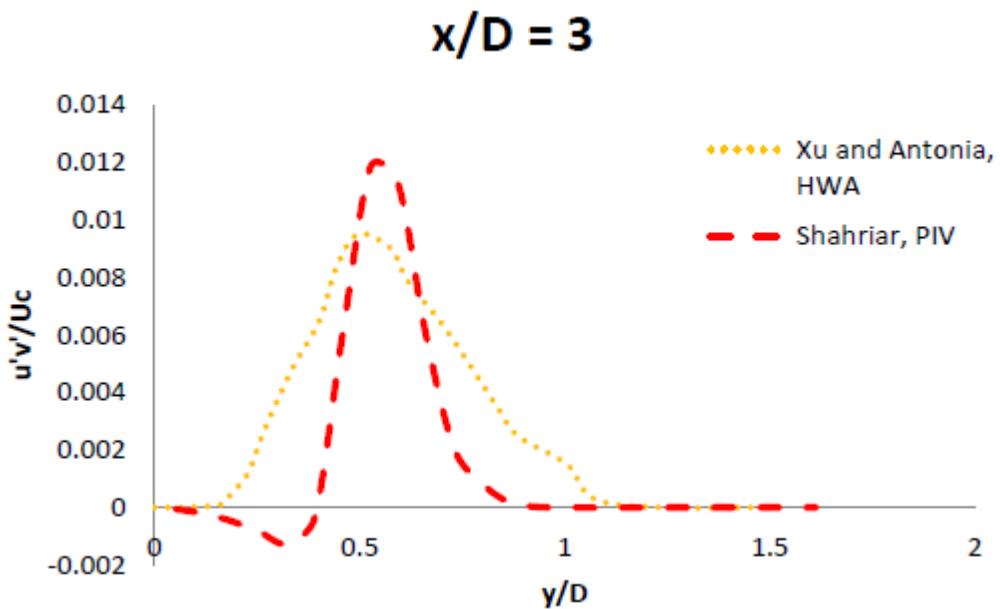


Figura 10. Esfuerzo de Reynolds en la zona cercana a la tobera.

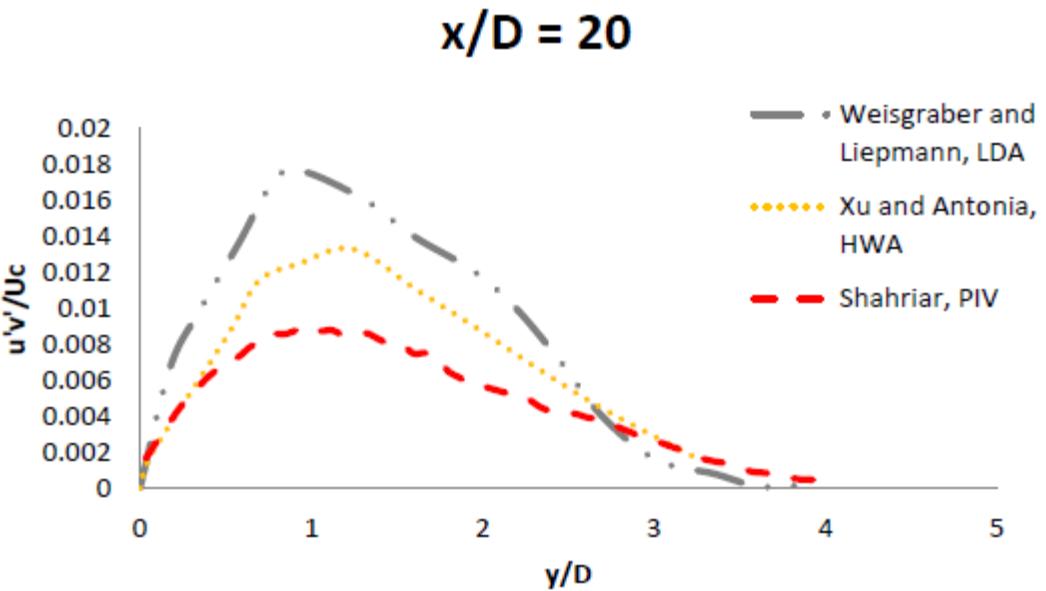


Figura 11. Esfuerzo de Reynold en la zona de transición.

- **Auto similitud.**

En la figura de abajo, se puede ver que la auto similitud en los valores del método PIV comienza en $15 \cdot D$ y para el resto de valores obtenidos por otros autores en $6,38 \cdot D$. Pese a ello, en $8,93 \cdot D$, la línea es similar a una distribución de Gauss, figura 12.

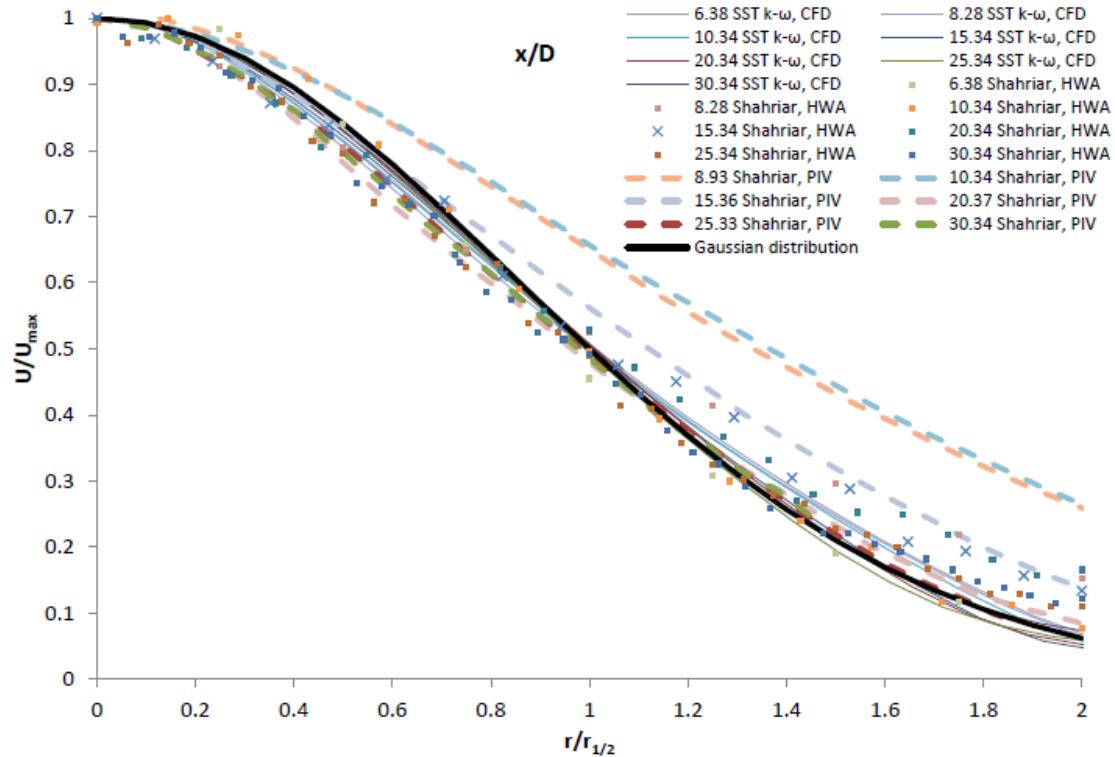


Figura 12. Auto similitud de la velocidad media a lo largo de la línea simétrica del flujo.

Para el caso de la intensidad de turbulencia mostrada en la figura 13, la de los datos del método PIV sigue el mismo patrón que el de otros autores y métodos.

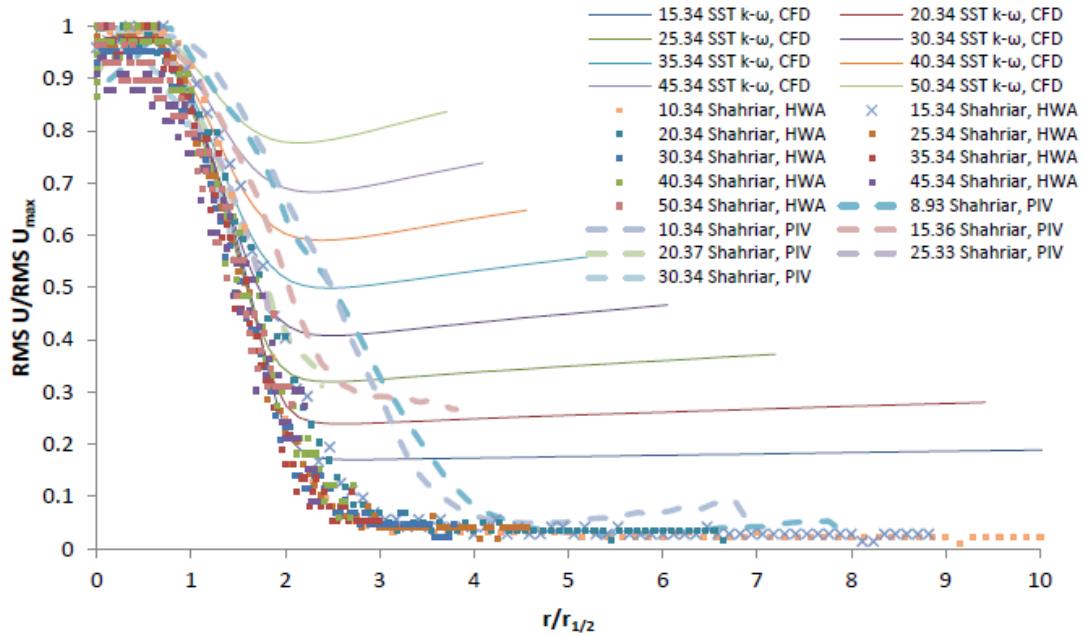


Figura 13. Auto similitud de la intensidad de turbulencia durante el desarrollo del flujo.

3.3. Análisis de la zona cercana y de transición en el flujo turbulento.

En este apartado nuevas tablas y magnitudes van a ser analizadas además de algunos comentarios sobre las anteriores para obtener conclusiones sobre estas zonas comentadas previamente.

- **Energía cinética turbulenta.**

En la figura 14, el desarrollo de la energía cinética turbulenta se ha representado para los datos del PIV. Se puede observar que en la zona cercana a tobera es nula, debido a que la intensidad turbulenta también lo es, ya que el flujo se expande en la dirección axial pero no en la radial. Una vez sobrepasado este punto ($y/D = 2$), la energía crece hasta encontrar su máximo en $y/D = 8$. Finalmente, disminuye tiendiendo a cero.

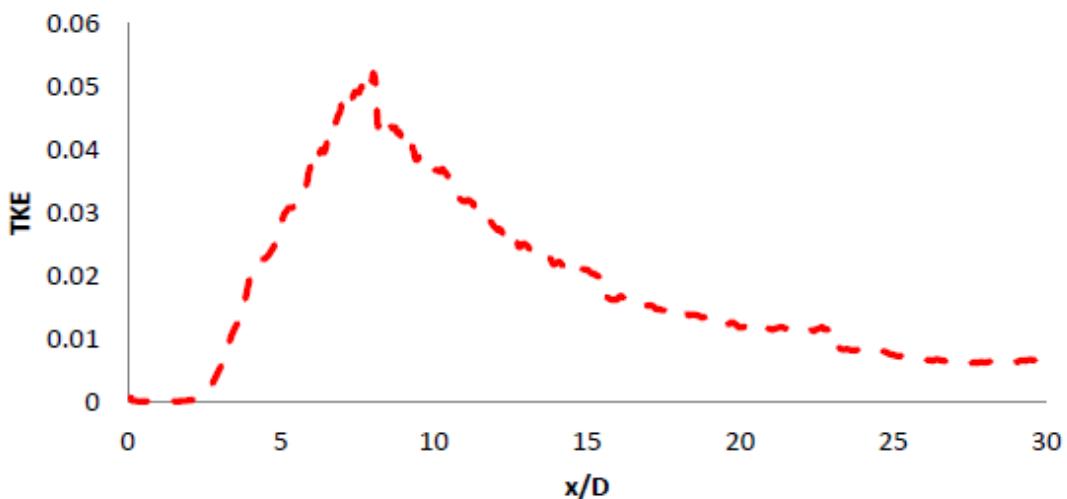


Figura 14. Energía cinética turbulenta a lo largo de la línea central de desarrollo del flujo.

En las figuras 15 y 16, se puede ver que dos zonas de formaciones de remolinos deberían ser encontradas en este flujo. La primera a la salida de la tobera ($x/D = 0$) donde se puede apreciar un pico de energía debido a la intersección entre el flujo de la tobera y el exterior. La segunda zona, en la zona de transición, donde el área potencialmente activa para la formación de los mismos es mayor pero su intensidad es menor.

$x/D = 0$

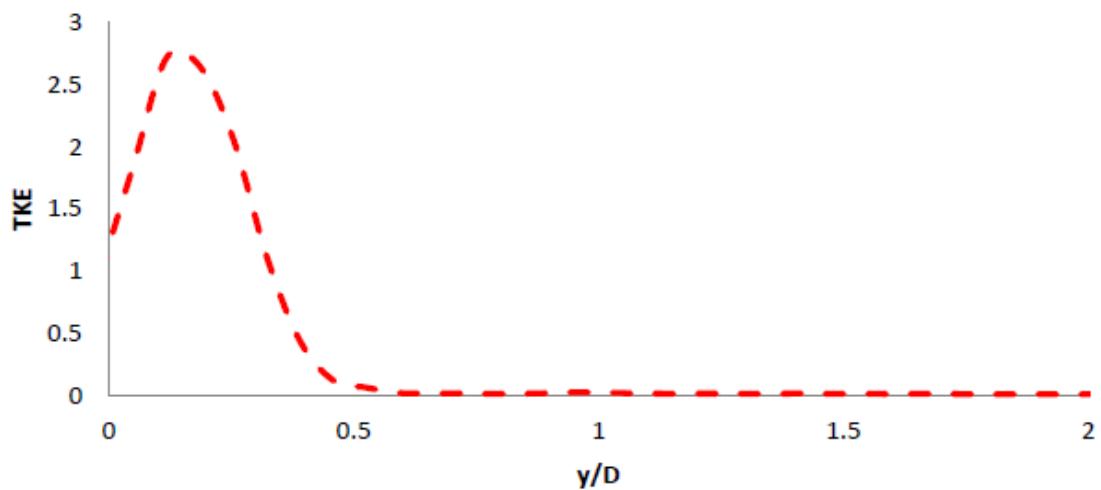


Figura 15. Energía cinética turbulenta a la salida de la tobera.

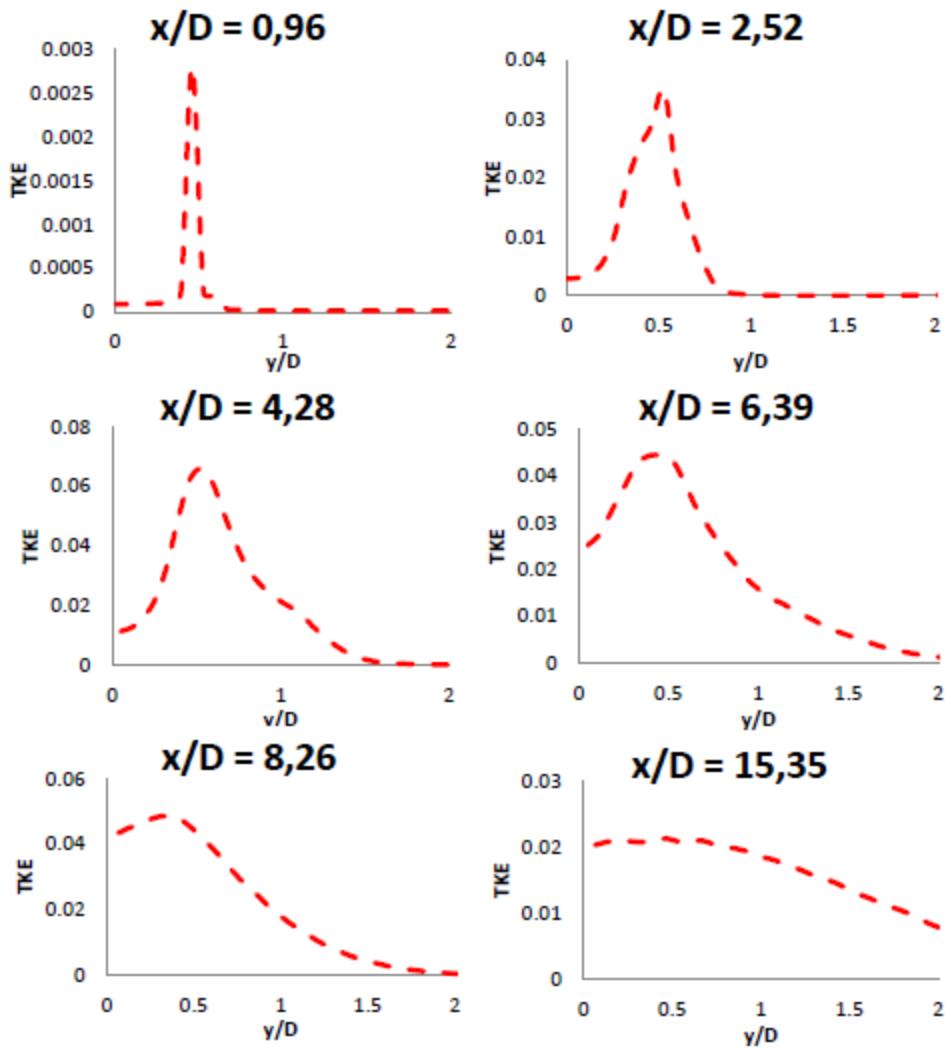


Figura 16. Perfiles de energía cinética turbulenta a lo largo del desarrollo del flujo.

- Campos vectoriales.

Los campos vectoriales de la figura 17 muestran la evolución tanto axial como radial del flujo. En la zona cercana ($x/D < 3$) el flujo se expande totalmente en dirección axial. Es a partir de este punto cuando empieza a expandirse en la dirección radial y la velocidad del flujo disminuye.

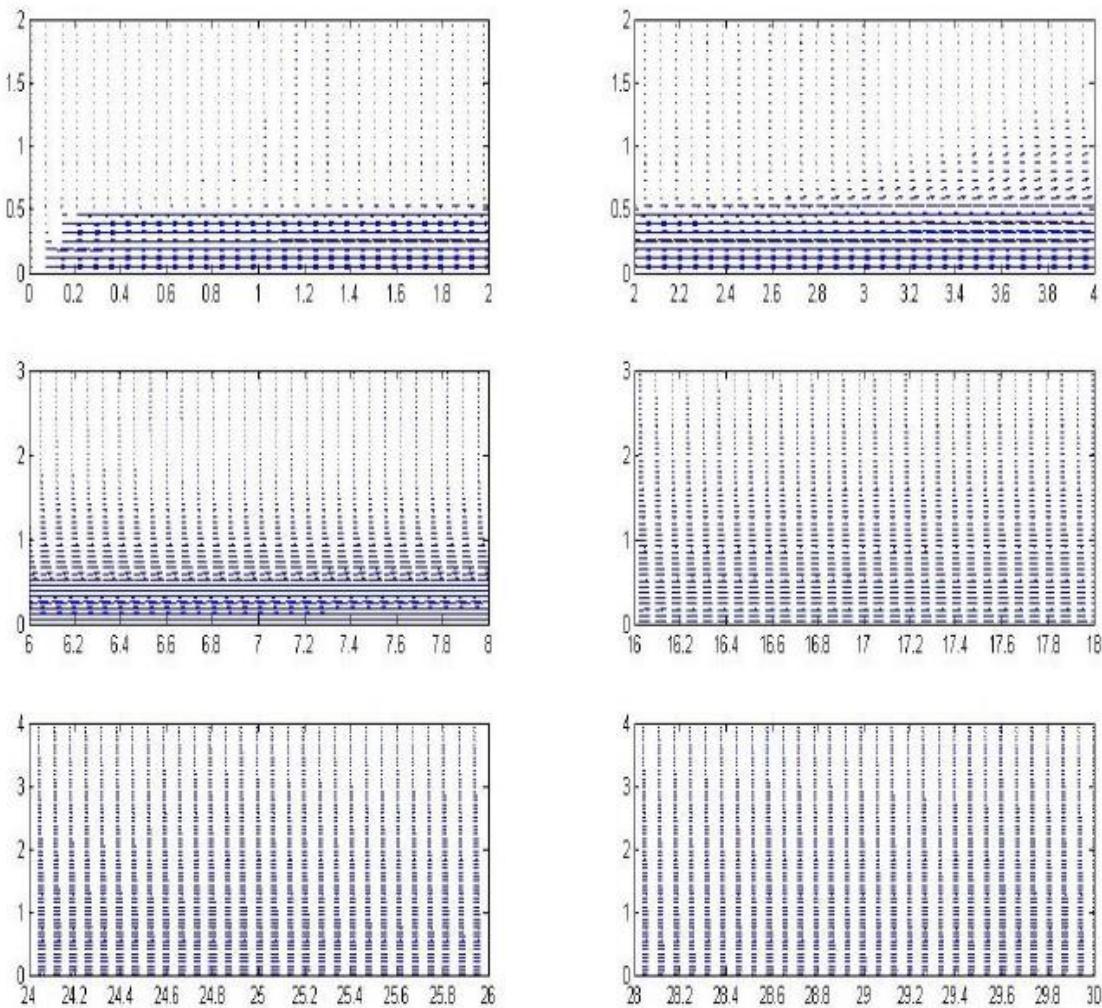


Figura 17. Campo vectorial de la evolución de la velocidad en distintas regiones.

- Auto similitud.

En la figura 12, podemos ver que la velocidad media en la dirección de desarrollo del flujo en la zona de transición sigue una distribución Gaussiana para bajos números de Reynolds. También indica que el método CFD (SST k-w) es bastante preciso en la zona de

transición respecto a esta magnitud. También se puede comprobar que la zona cercana no sigue esta distribución.

En la figura 13, se obtiene que la auto similitud de la intensidad de turbulencia sigue un mismo patrón para los distintos métodos de medida. En esta magnitud, los perfiles cercanos siguen mejor los patrones. En el caso del método CFD, no sigue la misma trayectoria que se ha podido medir.

Por tanto, podemos concluir con que la zona de transición queda definida por los gráficos de auto similitud. Además con los programas CFD podemos predecir la velocidad media del flujo pero no la intensidad de turbulencia.

- **Velocidad media en la dirección de desarrollo del flujo.**

La velocidad media se puede predecir mediante una ecuación lineal para la zona de transición, según la ecuación 8. Esta zona para el número de Reynolds que estamos tratando comienza en $x/D = 7$, ver anexo 1, apartado 4.2, figura 4.14. La pendiente de dicha recta es dependiente del número de Reynolds, la geometría de la tobera y la distancia de la pared a la salida de la tobera.

Ecuación 8.

$$\frac{U}{U_{max}} = k \cdot \frac{D}{X - X_p}$$

La evolución del flujo sigue un mismo patrón independientemente de sus características. Comienza con un perfil de silla de montar en la salida de la tobera, donde se encuentra el mayor punto de velocidad. Esto es debido al efecto de vena contraída. En el medio de la zona cercana, el perfil de velocidad se asemeja al de un sombrero de copa y al final del mismo y en la zona de transición a una distribución Gaussiana. A medida que el fluido se aleja de la salida de la tobera, se puede apreciar que su velocidad disminuye progresivamente.

3.4. Fortalezas y debilidades

El procesamiento de los datos es uno de los puntos fuertes del proyecto, tanto método utilizado como su discusión. La normalización de los datos se ha llevado a cabo mediante la “bulk velocity”, que ha sido obtenida mediante las leyes de la fluido dinámica con sus consiguientes desarrollos. Para la unión de las diferentes áreas de los datos obtenidos, la línea mediante la que se han unido dichos valores se han aportado los suficientes valores y tablas para corroborar su idoneidad.

La validez de los datos del método PIV ha sido simple, pero a su vez efectiva y suficiente. Dicho apartado ha sido dependiente de la información externa disponible y para algunas magnitudes ha sido limitada, como para la intensidad de turbulencia radial o el esfuerzo de cizalla radial. El trabajo de otros científicos ha sido de gran utilidad en dicho apartado.

Quizá la mayor debilidad del proyecto ha sido el análisis de los datos para la obtención de resultados concluyentes sobre la zona cercana y de transición de un flujo turbulento. Pese a ello, varios resultados interesantes se pueden concluir de la investigación.

4. CONCLUSIONES

El alcance de este proyecto ha sido dividido en tres partes: procesamiento de los datos del PIV, validez de los mismos y análisis de la zona cercana y de transición del flujo turbulento. La primera ha consistido en la normalización y unión de los datos obtenidos mediante el método PIV. La segunda, los datos de este método han sido comparado con los de otros autores y métodos, los datos han sido calificados como OK. Finalmente, el análisis ha contribuido a un mayor conocimiento del flujo en las zonas pretendidas.

En el primer apartado, la “velocity bulk” ha sido calculada para normalizar todos los datos de las diferentes zonas y poder unirlas. Su valor ha sido alrededor de 8,7 m/s dependiendo de las condiciones en la obtención de los datos.

Una vez normalizados todos los datos, la unión de las 4 zonas se ha llevado a cabo con éxito. Primero mediante un método cualitativo se han comparado multitud de gráficos, pero la similitud de los datos ha hecho imposible la obtención de los mejores puntos de unión. Por ello, se ha utilizado un método cuantitativo. Todas las diferencias de áreas de todas las magnitudes y puntos se han calculado en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 del anexo 1, apartado 4.1. Con ello el, se ha obtenido el punto más preciso de unión.

La validación de los datos en la segunda sección se ha realizado mediante la comparación de las distintas magnitudes de los datos de PIV con las de otros científicos y métodos. La similitud entre todas ellas en general, hace posible dar por correctos los datos obtenidos experimentalmente y proceder a su análisis. Las principales diferencias se han podido apreciar que son debidas al número de Reynolds, la geometría de la tobera y la distancia de la tobera a la pared.

Ambos apartados pueden ser comprobados y mejorados si obtenemos datos con diversas posiciones de la cámara y a diversas frecuencias. Con ello, obtendríamos una mayor cantidad de datos para un mismo flujo, pudiéndolos comparar y elegir el más idóneo.

Finalmente, se ha procedido al análisis de los datos de la zona cercana y de transición. El análisis de la energía cinética de turbulencia muestra que los remolinos tienen mayor probabilidad de aparición entre la zona cercana y la de transición ($3 < x/D < 11$) debido a que el momento se mantiene y la proporción de flujo de masa aumenta. El otro punto de posible formación es a la salida de la tobera por la intersección entre el flujo y el fluido exterior.

Se ha encontrado un desarrollo similar entre la auto similitud de la velocidad media en la dirección del flujo y la distribución de Gauss en la zona de transición. En la zona cercana, se ha obtenido un patrón para la auto similitud de la intensidad de turbulencia en la zona cercana a la salida de la tobera.

Por último, in la región de transición, una ecuación lineal de dependencia ha sido confirmada para la inversa de la velocidad media en la dirección axial. Los distintos términos dependen del número de Reynolds y la geometría de la tobera.

Este estudio puede ser continuado con el estudio de flujo con distintos números de Reynolds y así obtener patrones con los datos actuales y poder cuantificar cuales son las variaciones comentada para los flujos a distinto número de Reynolds.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wikipedia. Available at website: www.wikipedia.org. Accessed 22th May.
- [2] Adel Abdel-Rahman. A Review of Effects of Initial and Boundary Conditions on Turbulent Jets. Department of Mechanical Engineering, Beirut Arab University (BAU), Beirut, P.O.B: 11-5020, 2010
- [3] C.G. Ball, H. Fellouah, A. Pollard. The flow field in turbulent round free jets. *Progress in Aerospace Sciences* 50 1–26, 2012.
- [4] Karsten Staack, Reinhard Geisler, Andreas Schröder, Dirk Michaelis. 3D3C-coherent structure measurements in a free turbulent jet. 15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal. July 2010.
- [5] Christopher G. Ball and Andrew Pollard. A Review of Experimental and Computational Studies of Flow from the Round Jet. Computational and Experimental Fluid Dynamics Laboratory Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, internal report no. CEFDL/2007/01. June 2007.
- [6] Siavash Narimousa, Robert R. Long and Serge A. Kitaigorodski. Entrainment due to turbulent shear flow at the interface of a stably stratified fluid. Department of Earth and Planetary Sciences, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218, 1985.
- [7] Luca Facciolo and Nils Tillmark, Alessandro Talamelli, P. Henrik Alfredsson. A study of swirling turbulent pipe and jet flows. *Physics of fluids* 19, 035105, 2007.
- [8] Vouros, Th. Panidis. Turbulent properties of a low Reynolds number, axisymmetric, pipe jet. *Experimental Thermal and Fluid Science* 44 (2013) 42–50, 2013.
- [9] Kevin Daniel Galli. Hot-Wires Measurements of Statical and Spectral Evolution of an Axisymmetric Turbulent Jet. Massachusetts institute of technology, 1991.
- [10] Efunda. Available at website: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/hot_wires/hot_wires_theory.cfm. Accessed 4th June.
- [11] R. J. Adrian. Twenty years of image particle velocimetry. *Experiments in Fluids* 39: 159–169, 2005.
- [12] Ye Cheng. A study of the fine-scale three-dimensional flow structures in turbulence using time-resolved stereoscopic scanning particle image velocimetry. The State University of New Jersey, 2011.
- [13] S. V. Alekseenko, A. V. Bilsky, and D. M. Markovich. Application of the Method of Particle Image Velocimetry for Analyzing Turbulent Flows with a Periodic Component. *Instruments and Experimental Techniques*, Vol. 47, No. 5, 2004, pp. 703–710, 2004.
- [14] C. Fukushima, L. Aanen, J. Westerweel. Investigation of the Mixing Process in an Axisymmetric Turbulent Jet Using PIV and LIF. Laboratory for Aero and Hydrodynamics Delft University of Technology Rotterdamseweg 145, 2628 AL Delft, The Netherlands.

[15] W. Sutherland. The viscosity of gases and molecular force. *Philosophical Magazine*, S. 5, 36, pp. 507-531, 1893.

[16] Shahriar Ghahremanian and Bahram Moshfegh. Evaluation of RANS Models in Predicting Low Reynolds, Free, Turbuent Round Jet. *Journal of Fluids Engineering* Vol. 136 / 011201-1, 2013.

[17] Valentino Todde, Pier Giorgio Spazzini, Mats Sandberg. Experimental analysis of low-Reynolds number free jets. *Exp Fluids* 47:279–294, 2009.

[18] J. Mi, D. S. Nobes and G. J. Nathan. Influence of jet exit conditions on the passive scalar field of an axisymmetric free jet. *J. Fluid Mech.*, vol. 432, pp. 91–125, 2000.

[19] Shahriar Ghahremanian, Klas Svensson, Mark J. Tummers, Bahram Moshfegh. Near-field mixing of jets issuing from an array of round nozzles. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 47 84–100, 2014.

[20] Kareem Akhtar. Numerical Investigation using RANS Equations of Two-dimensional Turbulent Jets and Bubbly Mixing Layers. Master of Science in Engineering Science and Mechanics, Virginia, 2010.

[21] Elizabeth Smith, Jianchun Mi, Graham Nathan and Bassam Dally. The "Round Jet Inflow-Condition Anomaly" for the $k-\epsilon$ Turbulence Model. School of Mechanical Engineering, University of Adelaide (Australia).

[22] D. Kuzmin and O. Mierk. On the implementation of the $k-\epsilon$ turbulence model in incompressible flow solvers based on a finite element discretization. Institute of Applied Mathematics (LS III), University of Dortmund, Vogelpothsweg 87, D-44227, Dortmund, Germany, 2006.