

Medida experimental y simulación numérica del flujo turbulento en intercambiadores de calor mejorados con discos rascadores.

Damián Crespi^{2*}, Luís Climent¹, Pedro Vicente¹, Pedro Martínez¹,
Antonio Viedma²

1 – Dep. Ingeniería de Sistemas Industriales. Univ. Miguel Hernández. Edificio Torreblanca, Av. Del Ferrocarril, s/n., 03202, Elche (Alicante), España.
Tel.: 966 658 561, Fax: 966 658 979.

2 – Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Univ. Politécnica de Cartagena, Campus Muralla del Mar. C/ Dr Fleming, s/n – 30202 Cartagena (Murcia) España.
Tel.: 968 325 984, Fax: 968 325 999. e-mail: damiancrespi@yahoo.es

Resumen

Este trabajo presenta un estudio de visualización en intercambiadores de calor con elementos insertados dinámicos. Estos dispositivos son utilizados para la generación de hielo líquido. Mediante la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) se obtiene el patrón de flujo turbulento en el intercambiador. El dispositivo insertado consta de varios elementos circulares con seis orificios distribuidos radialmente en los mismos, que están montados sobre un eje a una distancia de 5D entre ellos. El conjunto se mueve alternativamente mediante un cilindro hidráulico. En el estudio, se analizará el aumento de la turbulencia derivado del uso de esta técnica y se relacionará con el aumento de transferencia de calor.

Mediante la técnica de PIV y agua como fluido de trabajo, se ha obtenido el campo bidimensional de velocidades en los dos planos de simetría: en el centro de los orificios y entre dos orificios consecutivos. Los resultados permiten establecer el patrón de flujo a lo largo del dispositivo.

En condiciones estáticas, se han identificado las características de flujo, así como su evolución para un rango del número de Reynolds entre 4000 y 6300. En condiciones dinámicas se ha analizado el flujo para $Re=7400$, variando la velocidad de rascado en relación de 0,5 respecto a la velocidad media del fluido. Se han estudiado las características del flujo para una etapa del ciclo de rascado, revelando los efectos del movimiento de rascado en el comportamiento del fluido.

Como parte final del trabajo, se ha realizado una simulación numérica del flujo utilizando el código comercial Ansys Fluent con diferentes dominios discretizados, condiciones de contorno y modelos de turbulencia. El objetivo de este estudio ha sido encontrar el modelo numérico que mejor se adapta a esta tipología de intercambiadores, por lo que se ha evaluado el comportamiento de estos modelos de turbulencia comparando las predicciones numéricas con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio.

Palabras clave: mejora de la transferencia de calor, flujo turbulento, hielo líquido, PIV.

1 Introducción

Los dispositivos insertados han sido investigados profundamente con el objeto de mejorar la eficiencia de los intercambiadores de calor: transferencia de calor frente a pérdida de presión. Webb [7] clasificó las técnicas de mejora de la transferencia de calor en "activas" y "pasivas". Las técnicas pasivas como los muelles insertados o los tubos deformados mecánicamente se vienen estudiando durante los últimos 30 años, siendo actualmente soluciones comerciales. Webb [7] dedujo en sus investigaciones que las técnicas de mejora "activas" pueden producir grandes incrementos en la transferencia de calor.

El problema del ensuciamiento tiene notable importancia en las industrias química, petroquímica y de alimentación. La prevención del ensuciamiento en intercambiadores de calor es esencial para evitar: reducciones importantes en la transferencia de calor, corrosión debida a la formación de depósitos y aumentos de la pérdida de presión, lo que afecta al correcto funcionamiento del dispositivo (Bergles [1]).

Los intercambiadores de calor asistidos mecánicamente, en los que un elemento móvil rasca de forma periódica la superficie de intercambio, pueden ser utilizados para incrementar la transferencia de calor y eliminar el ensuciamiento. En la industria, se utilizan ya equipos con rascadores rotativos, que previenen el ensuciamiento y mejoran el mezclado y la transferencia de calor. Muchas investigaciones se han centrado en dichos sistemas de prevención de ensuciamiento, estudiando las características del patrón de flujo (Wang et al [6]), su comportamiento termo-hidráulico (Goede y Jong [2]) o la eficiencia de raspado (Sun et al [5]).

Los dispositivos de con movimiento alternativo, también pueden ser utilizados para la generación de hielo líquido. Algunas investigaciones se han centrado en este tipo de aplicaciones (Kauffeld et al. [3], Stamatou et al. [4]).

Este trabajo presenta un estudio de visualización realizado en un intercambiador de calor con un dispositivo insertado dinámico. Se trata de elementos rascadores instalados sobre un eje que se mueve de forma alternativa dentro de un tubo circular. Se ha obtenido el patrón de flujo mediante el uso de la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV). El dispositivo activo insertado consiste en varios elementos circulares cada uno con seis orificios de 16 mm de diámetro distribuidos uniformemente, montados en un eje de 18 mm de diámetro con una distancia entre ellos de 5D (Figura 1). El conjunto se mueve alternativamente en la dirección axial impulsado por un cilindro hidráulico. En el estudio, se analizará el aumento de la turbulencia derivado del uso de esta técnica y se relacionará con el aumento de transferencia de calor.

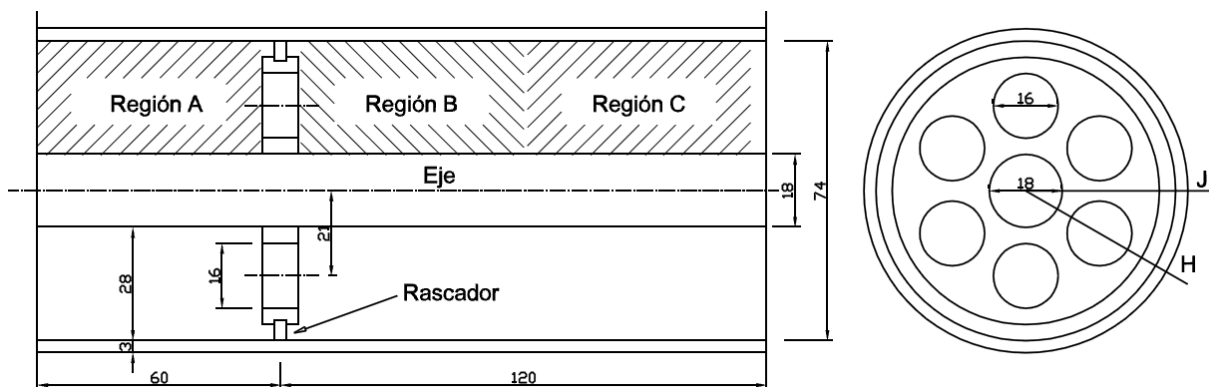


Figura 1. Esquema del dispositivo insertado analizado.

2 Instalación experimental

La instalación que se muestra en la Figura 2 fue construida con el objetivo de estudiar el patrón de flujo inducido en dispositivos insertados en el interior de un tubo. La sección principal consiste en un tubo acrílico de 74 mm de diámetro interior que se encuentra entre dos depósitos de regulación que tienen la finalidad de estabilizar el flujo.

La sección de ensayo se sitúa a una distancia de 15 diámetros de la entrada del tubo, con el objetivo de asegurar el pleno desarrollo del flujo. Para mejorar el acceso óptico en dicha sección se dispone de una caja de material acrílico con forma de prisma cuadrangular. Ésta caja se rellena con el fluido de ensayo.

Se utiliza agua como fluido de ensayo y se impulsa por el circuito mediante una bomba centrífuga regulada por un variador de frecuencia, lo cual permite controlar la velocidad media del fluido, que se mide con un caudalímetro electromagnético. Para controlar la temperatura del fluido, se dispone de un baño térmico en el depósito superior. Con el resto de las variables fijas, estos dos parámetros determinan el número de Reynolds. La instalación puede trabajar en un rango de temperaturas que va desde 25°C hasta 60°C, así como entre 100 l/h y 1600 l/h, lo cual permite obtener un número de Reynolds en el rango de 2500 hasta 14000.

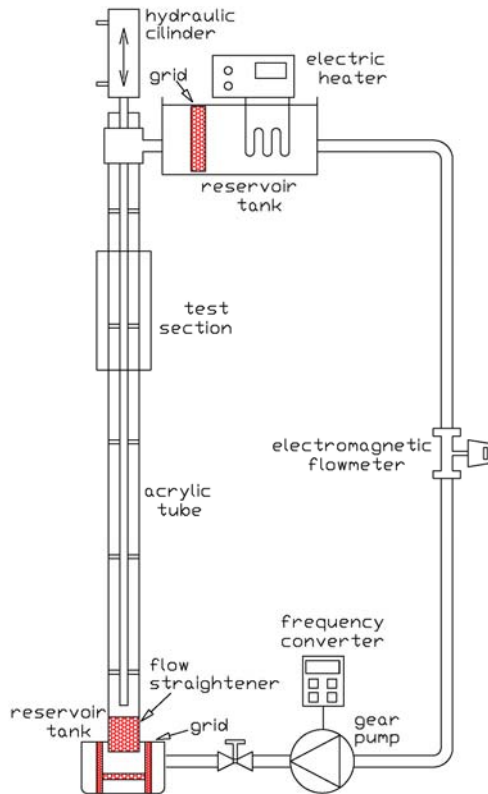


Fig. 2 Esquema de la instalación



Fig. 3 Fotografía del sistema de PIV

La Velocimetría por Imágenes de Partículas es una técnica extendida que permite medir patrones de velocidad en un flujo. Para ello, se siembra el fluido con pequeñas partículas que deben tener la misma densidad del fluido de ensayo. En este caso se han utilizado partículas de poliamida de 50 micras de diámetro y 1,016 Kg/l de densidad. Como se muestra en la Figura 3, un láser ilumina un plano del fluido, que contiene el eje del tubo (sección longitudinal). La cámara se sitúa en posición ortogonal a dicho plano, de forma que tenga una vista frontal del mismo. Tomando dos imágenes consecutivas de las partículas y conociendo el tiempo transcurrido entre ambos disparos, se puede obtener el campo de velocidades bidimensional del flujo.

El láser emite un plano de luz de 1 mm de espesor de forma pulsada entre 100 Hz y 500 Hz, permitiendo así la obtención de múltiples pares de imágenes. Tiene una longitud de onda de 808 nm. Un ordenador se encarga de controlar la captura de imágenes de la cámara, que a su vez se encarga de la sincronización con el láser. En los experimentos dinámicos las imágenes se toman por pares, y el disparo para la captura de cada par de imágenes viene determinado por el movimiento del rascador.

Para cada experimento se han procesado entre 500 y 1000 pares de imágenes, haciendo uso del software UraPIV que aplica algoritmos de correlación cruzada entre imágenes consecutivas.

En condiciones estáticas se ha utilizado un tamaño de ventana de 16x16 píxeles con un solapamiento del 50%, mientras que en condiciones dinámicas el tamaño de ventana utilizado es de 32x32 con un 75% de solapamiento. En el post procesado se aplican un filtro local y otro global para eliminar datos erróneos. No se ha utilizado interpolación y el campo de velocidades obtenido es el resultado de promediar los resultados obtenidos para cada par de imágenes.

3 Resultados

El plano de luz emitido tiene un grosor de 1 mm y una altura de 100 mm. Sin embargo, El tamaño de la zona en la que la técnica de PIV puede obtener buenos resultados es de entre 60 y 80 mm de longitud en el la dirección del eje. Es por ello que los resultados de velocidad han debido ser procesados en tres regiones diferentes, como se muestra en la Figura 1: la Región A se encuentra aguas arriba del rascador, la Región B inmediatamente aguas abajo del rascador y la Región C después de la Región B.

3.1 Dispositivo estático

Se ha analizado el patrón de flujo en condiciones estáticas, donde el rascador no se mueve. Se han realizado experimentos a diferentes números de Reynolds, en un rango entre 4000 y 6300. La velocidad media del fluido se ha mantenido constantes, variando la temperatura del mismo en el rango de 30°C a 56°C y el caudal entre 800 l/h y 1400 l/h.

En estas condiciones, se obtienen tres grupos de imágenes, cada uno de los cuales está compuesto por 500 pares de imágenes. El primer grupo corresponde a imágenes del flujo aguas arriba del rascador y los otros dos están localizados en posiciones consecutivas aguas abajo del mismo. Véase la Figura 1.

Las imágenes bidimensionales representan un plano del flujo. Los experimentos se han llevado a cabo en los dos planos de simetría existentes, que se encuentran en dirección radial. El primero está situado cruzando uno de los agujeros del rascador a través de su diámetro y el segundo se encuentra en el espacio intermedio entre dos agujeros consecutivos.

Las Figuras 4 y 5 muestran los campos de velocidades medidos en ambos planos de simetría: en el centro del agujero (H) y entre los agujeros (J). La Figura 4 muestra un patrón de flujo similar al de un chorro. El chorro produce altas velocidades aguas abajo de los agujeros y recirculaciones del flujo en la región cercana a la pared del tubo y en la región entre los agujeros (plano J).

El dispositivo insertado produce 6 chorros de 16 mm de diámetro cada uno. Los chorros inducen una corriente inversa de una longitud de 4-5 veces el diámetro de los chorros (64-80 mm). Las Figuras 6 y 7 muestran la evolución de los perfiles de velocidad en diferentes posiciones axiales, desde 32 mm aguas arriba del dispositivo hasta 130 mm aguas abajo del mismo.

La velocidad máxima en dirección axial disminuye aguas abajo del rascador. A la salida del rascador ($L = 4$ mm) the velocity profile is nearly constant ($V_y/V_m = 4,3$). 70 mm aguas abajo del dispositivo, la velocidad máxima adimensional está en torno a 3,2 y a 130 mm entorno a 2.

En la región entre los agujeros, se produce una recirculación grande por efecto de los chorros. A 70 mm aguas abajo del rascador, el chorro se ha expandido a la región entre los agujeros (plano J) y el flujo se transforma en axilsimétrico, con velocidades más altas cerca del eje central. A partir de este momento, la turbulencia inducen un perfil de velocidades homogéneo.

3.2 Dispositivo dinámico

En los experimentos en los que el dispositivo rascador se desplaza en la dirección equicorriente, la velocidad relativa entre éste y el flujo es menor que en los experimentos estáticos. Como consecuencia, el efecto que el dispositivo tiene sobre el flujo es más reducido.

En la Figura 8 y la Figura 9 se representa el campo de velocidades en los planos H y J. La velocidad relativa entre el dispositivo insertado y la velocidad media del flujo es $\omega=0,5$. En las Figuras 10 y 11 están representados los perfiles de velocidad.

Los chorros que se forman a partir de los agujeros son menos vigorosos, así como las recirculaciones resultantes en la región cercana a la pared y aguas arriba del rascador en el plano entre los agujeros (plano J). Tal como se muestra en la Figura 8 y en la Figura 10, los chorros han desaparecido prácticamente a una distancia de 43 mm del rascador, así como las recirculaciones inducidas por los mismos. A una distancia de 83 mm el flujo tiene las características de un flujo turbulento en un tubo con eje: el efecto del rascador ha desaparecido.

El flujo aguas arriba del dispositivo es muy parecido al perfil típico de un flujo turbulento en un tubo con eje. Este perfil cambia unos milímetros antes de pasar por el dispositivo insertado. Debido al movimiento del dispositivo insertado en la dirección del flujo, la velocidad máxima en la dirección axial es 2,5 veces la velocidad media del fluido ($V_y/V=2,5$), que es menor que en el caso del dispositivo estático ($V_y/V=4,3$).

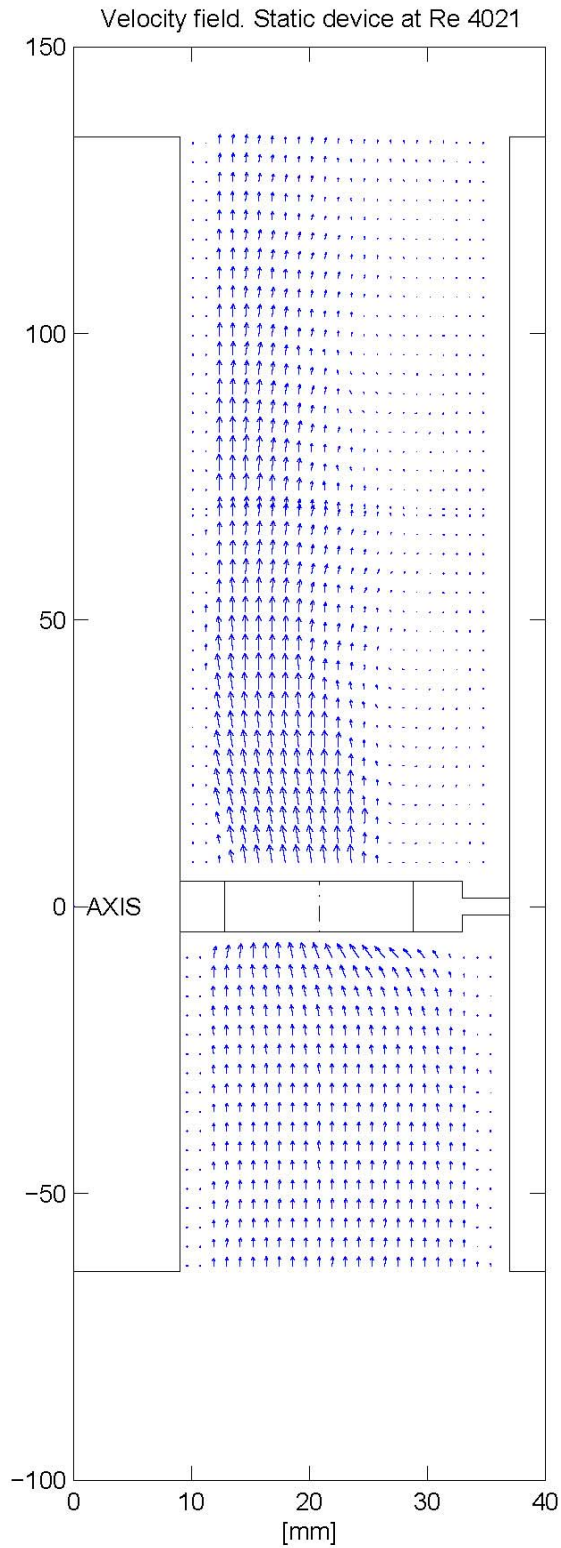


Figura 4 Disp. Estático Campo de velocidades en plano H. Re =4021.

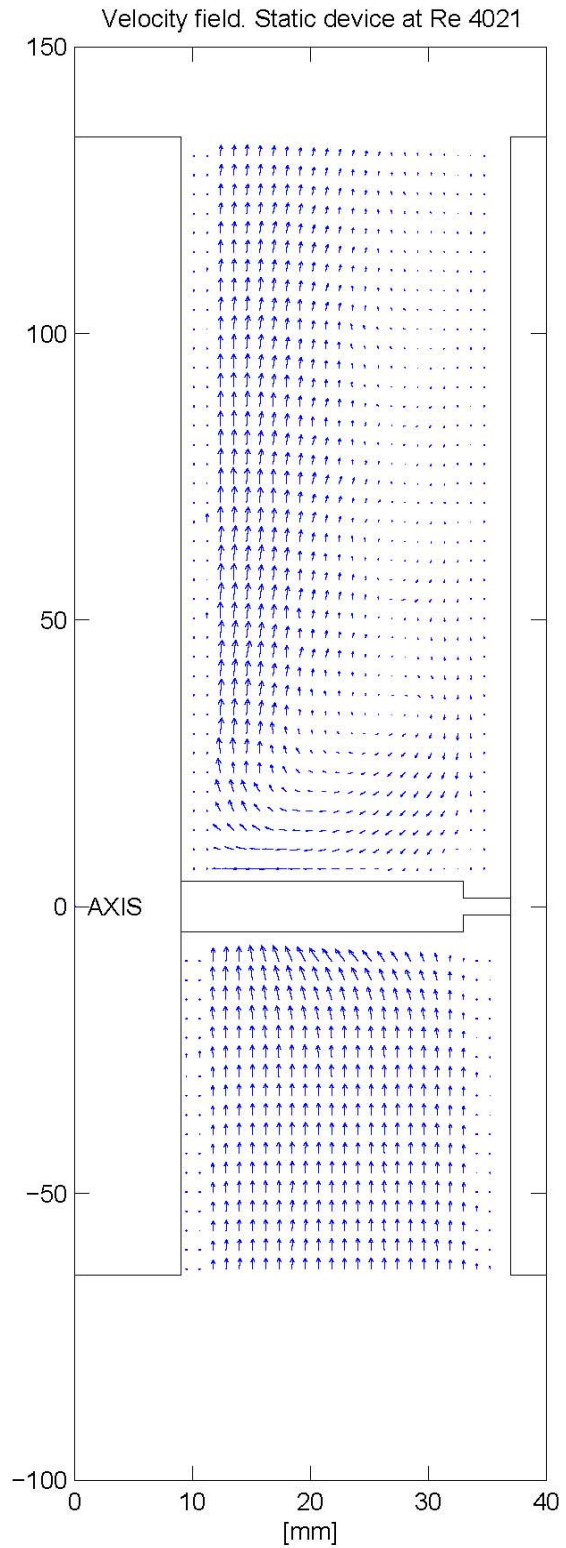


Figura 5 Disp. Estát. Campo de velocidad en plano J. Re =4021.

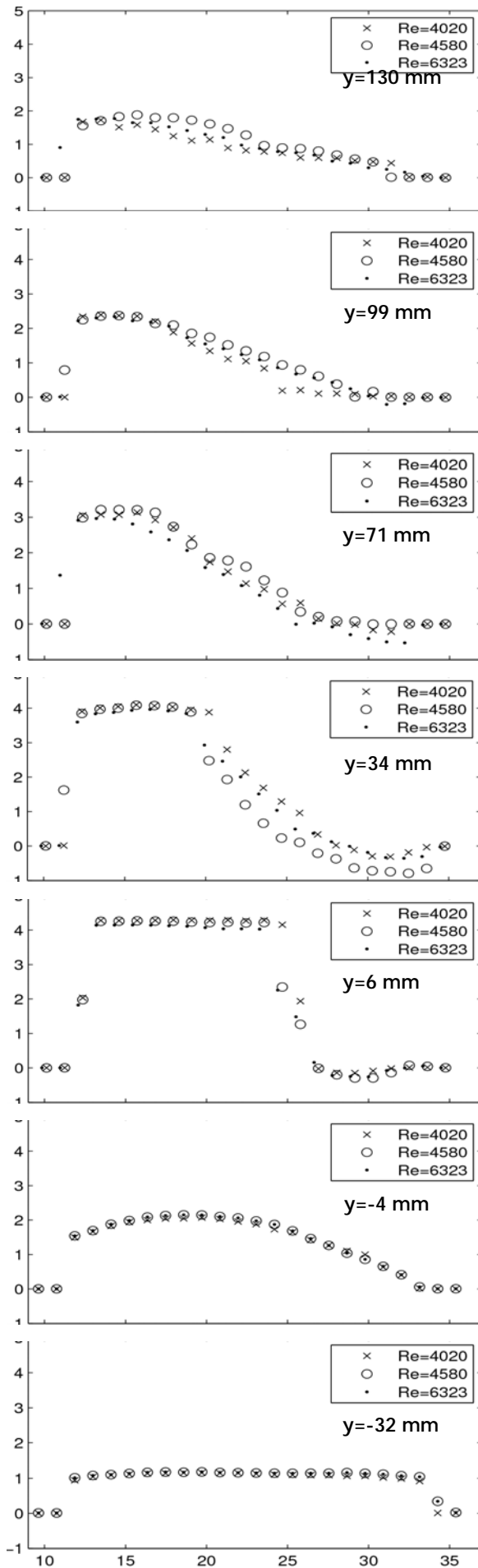


Figura 6 perfiles V_y/V disp. Estático. Plano H

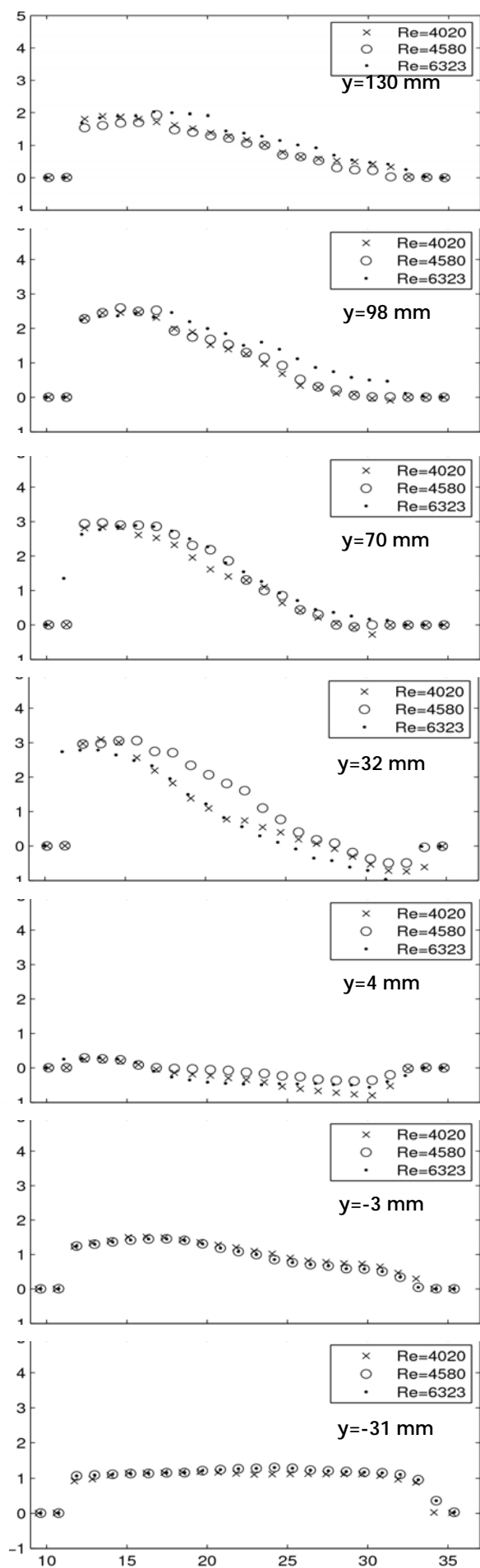


Figura 7 Perfiles V_y/V disp. Estático. Plano J

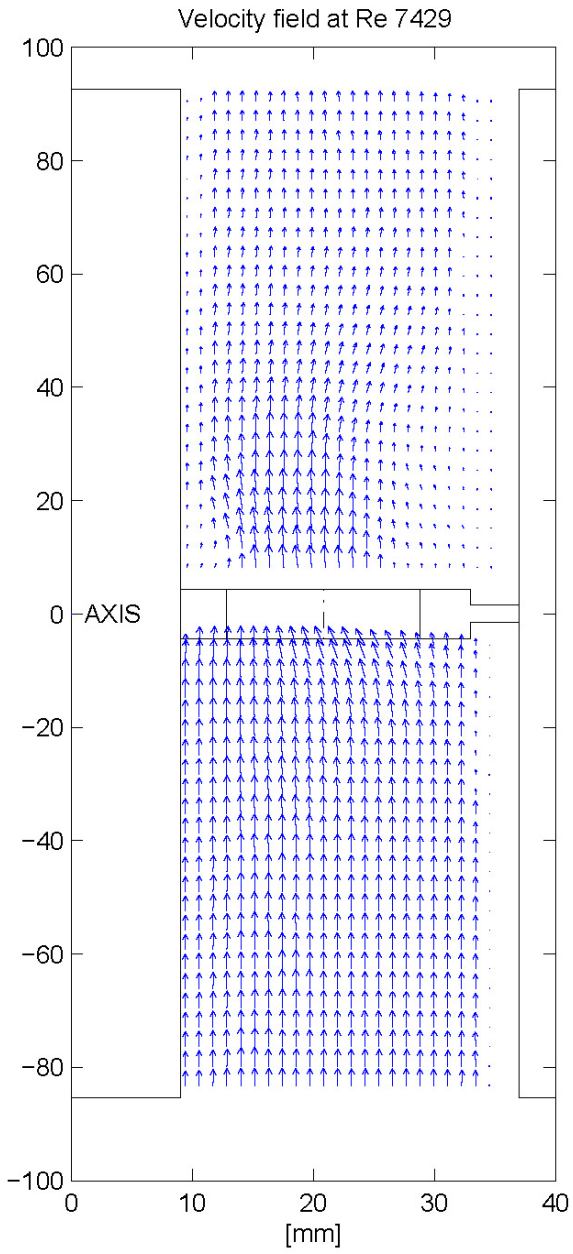


Figura 8 Campo velocidades plano H..
Re =7439. Disp. Dinámico a $\omega = 0,5$.

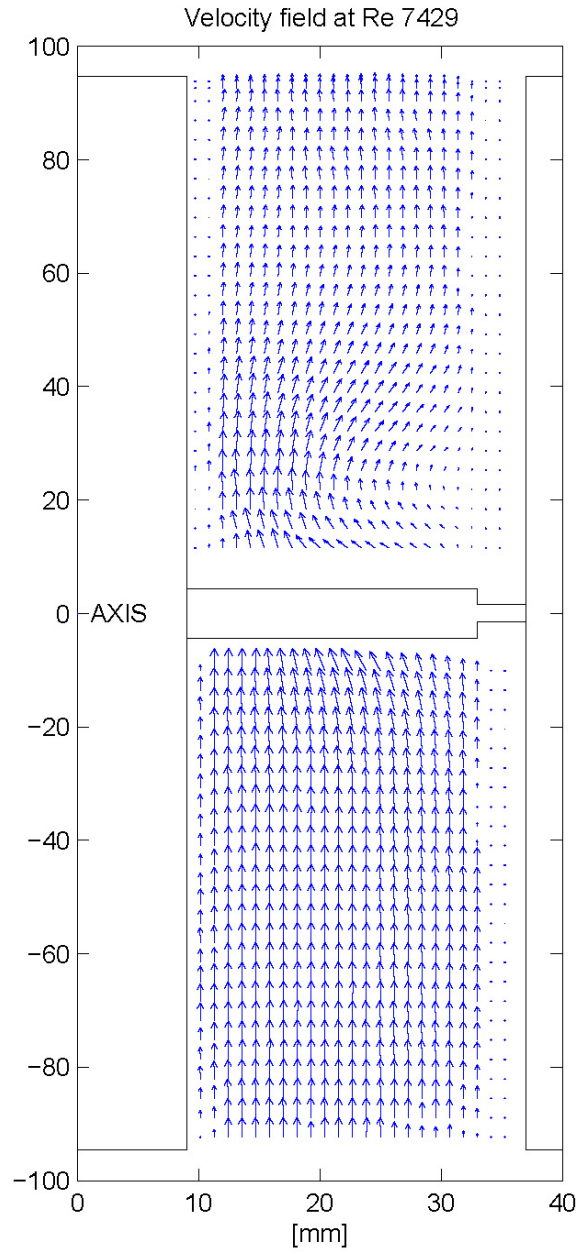


Figura 9 Campo velocidades plano J..
Re =7439. Disp. Dinámico a $\omega = 0,5$.

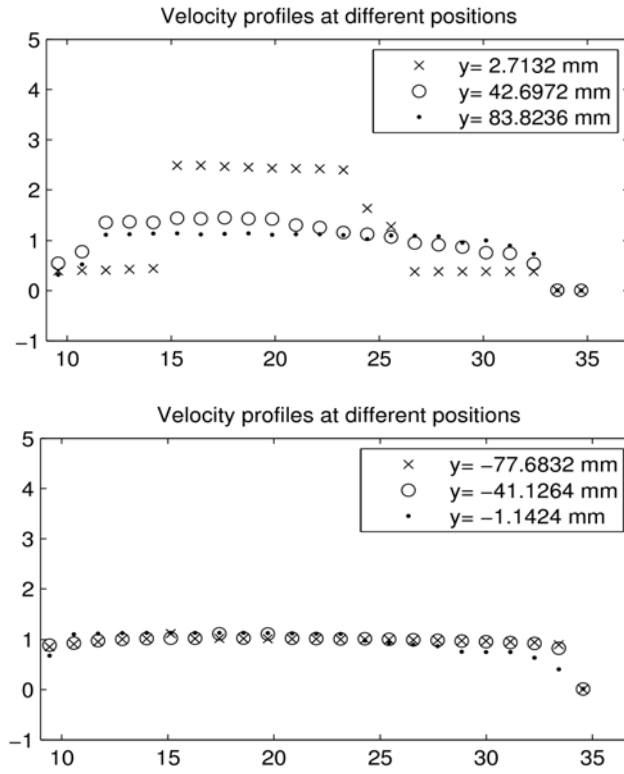


Figura 10 Perfiles de velocidad en el plano H. Dispositivo dinámico a $\omega = 0,5$, $Re = 7429$.

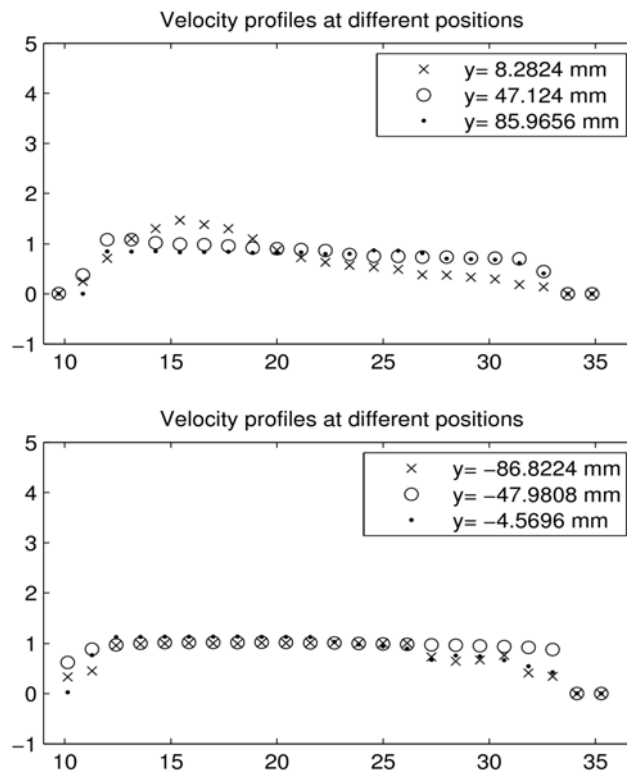


Figura 11 Perfiles de velocidad en el plano J. Dispositivo dinámico a $\omega = 0,5$, $Re = 7429$.

4 Simulación numérica del flujo

En este apartado se presentan los resultados del estudio numérico que se ha realizado sobre el dispositivo estático utilizando el código comercial Ansys Fluent. El objetivo de este estudio ha sido encontrar un modelo numérico que describa el comportamiento del flujo en régimen turbulento y en condiciones estáticas, sin movimiento del rascador. La validación del modelo se ha realizado en el plano H de simetría del dispositivo mediante la comparación con varios perfiles de velocidad obtenidos experimentalmente y situados aguas arriba y abajo del rascador.

4.1 Descripción del modelo numérico

La simulación del flujo se realizó con la licencia de Ansys Fluent versión 6.3 disponible en la Universidad Miguel Hernández y la creación de la malla con el software asociado Gambit versión 2.4. Ansys Fluent utiliza un método de discretización de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento en las simulaciones de flujo isoterma.

El dominio discretizado de simulación hace uso del comportamiento periódico del flujo a su paso por los sucesivos discos rascadores y por ello se reduce a un tramo de tubo que incluye un único rascador en una posición centrada. Además se aprovecha la distribución axilsimétrica de los agujeros de paso en cada rascador y la alineación de todos los rascadores sobre el eje para establecer una condición de contorno de periodicidad rotacional en dos planos H consecutivos. La figura 12 muestra el resultado del dominio de simulación finalmente seleccionado que permite lograr la convergencia de los casos simulados en un tiempo razonable. Las condiciones de contorno establecidas son de entrada y salida del flujo periódicas, planos H laterales periódicos y condición de pared en las superficies del tubo, eje y disco rascador.

Previamente a la selección de este dominio y de las condiciones de contorno correspondientes se hicieron ensayos con otras geometrías más extensas como la formada por la mitad de un tramo de tubo (condición de simetría), otra constituida por el tramo de tubo completo entorno a un rascador y una última que incluye a varios rascadores y condiciones de contorno de velocidad en la entrada y presión en la salida del dominio. En todos estos casos los resultados que se obtuvieron con respecto al dominio finalmente adoptado no fueron significativamente diferentes, pero sí muy elevado el coste en tiempo computacional.

El mallado del dominio se ha creado utilizando una topología estructurada de aproximadamente 45000 celdas, refinada hasta conseguir índices de convergencia de malla adecuados, y seleccionada tras un estudio de independencia de malla en función del número de celdas. Para resolver correctamente la subcapa viscosa, las dimensiones de las celdas en contacto con las paredes del tubo, del eje y del disco rascador se han ajustado hasta obtener valores de y^+ cercanos a 1 y en cualquier caso menores de 5. En la Figura 12 se puede observar el detalle de la malla generada y la distribución del tamaño de las celdas.

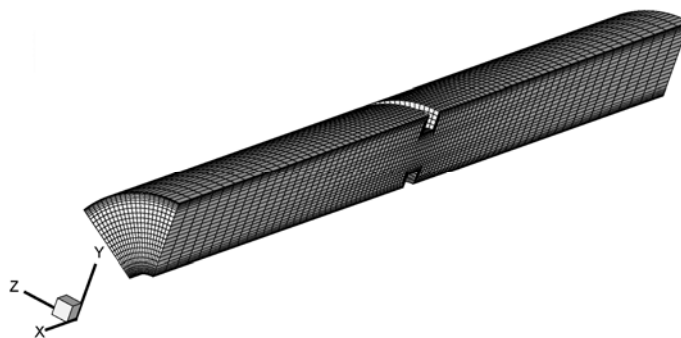


Figura 12 Dominio de la simulación y detalle de la malla estructurada realizada en Gambit, con el rascador en la posición central.

En cuanto a las condiciones del flujo, se ha realizado la simulación en régimen turbulento y para el caso particular de $Re=4021$ correspondiente a la temperatura de $30^{\circ}C$.

En el código Ansys Fluent se estableció un modelo estacionario con el esquema SIMPLE para el acoplamiento presión-velocidad y esquemas de segundo orden para las discretizaciones de presión, cantidad de movimiento y variables turbulentas. Se emplearon los siguientes modelos de turbulencia disponibles en el programa, con elección de leyes mejoradas de pared en los casos que el modelo lo permitió:

- Spalart-Allmaras (SA)
- Standard k-e (SKE)
- Renormalization-Group k-e (RNG)
- Realizable k-e (RKE)
- Standard k-w (SKO)
- Menter's k-w (SST)
- Reynolds Stress Model (RSM)

En el proceso de convergencia de la solución se monitorizaron velocidades en diferentes puntos de los perfiles y esfuerzos en la pared para garantizar la convergencia final de la simulación. El valor umbral de los residuos para considerar una solución convergida se fijó en 10^{-7} .

4.2 Resultados numéricos

Los resultados numéricos obtenidos con los distintos modelos de turbulencia se han comparado con los datos experimentales de los perfiles de velocidad medidos en cinco posiciones distintas, aguas arriba y abajo del rascador, sobre el plano H de simetría. La Figura 13 muestra la posición relativa de estos perfiles y su denominación. En concreto, los perfiles de velocidad se sitúan, con respecto a la posición central del rascador, a las siguientes distancias: $-60,8$ mm (P1), $-32,2$ mm (P2), $-5,8$ mm (P3), $+11,1$ mm (P4) y $+30,2$ mm (P5).

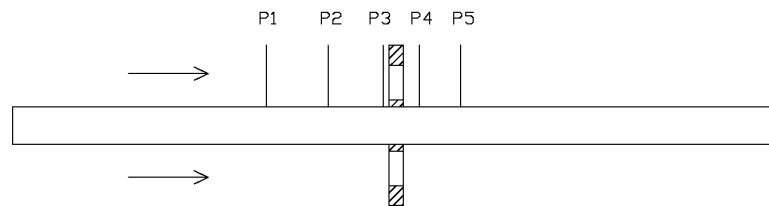


Figura 13 Posición de los perfiles de velocidad experimentales utilizados en la comparación de resultados y validación del modelo numérico.

Las siguientes figuras muestran la comparativa de los datos experimentales, representados por las series PIV-P1 a PIV-P5, con los perfiles de velocidad obtenidos con Ansys Fluent, representados por las series CFD-P1 a CFD-P5:

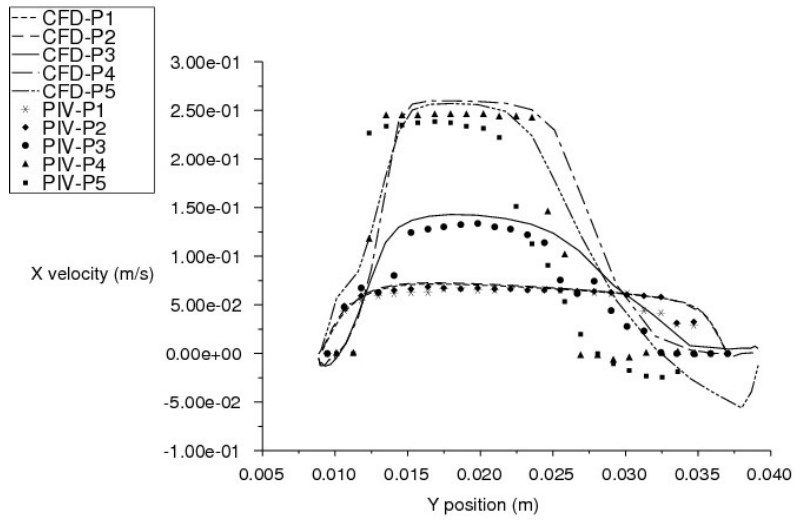


Figura 14 Modelo de turbulencia Spalart-Allmaras (SA) y comparativa de los perfiles de velocidad P1 a P5 obtenidos experimentalmente (PIV) con los calculados numéricamente (CFD).

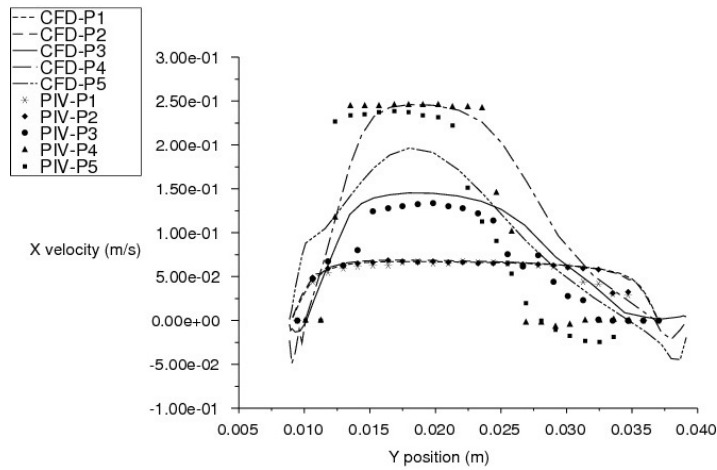


Figura 15 Modelo de turbulencia Standard k-e (SKE) y comparativa de los perfiles de velocidad P1 a P5 obtenidos experimentalmente (PIV) con los calculados numéricamente (CFD).

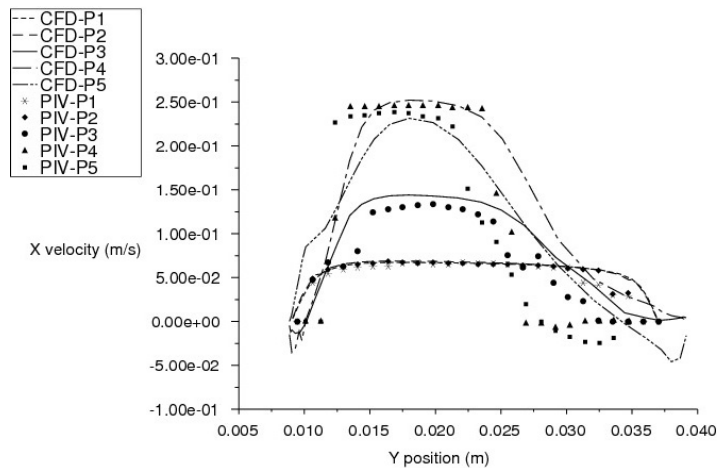


Figura 16 Modelo de turbulencia Renormalization-Group k-e (RNG) y comparativa de los perfiles de velocidad P1 a P5 obtenidos experimentalmente (PIV) con los calculados numéricamente (CFD).

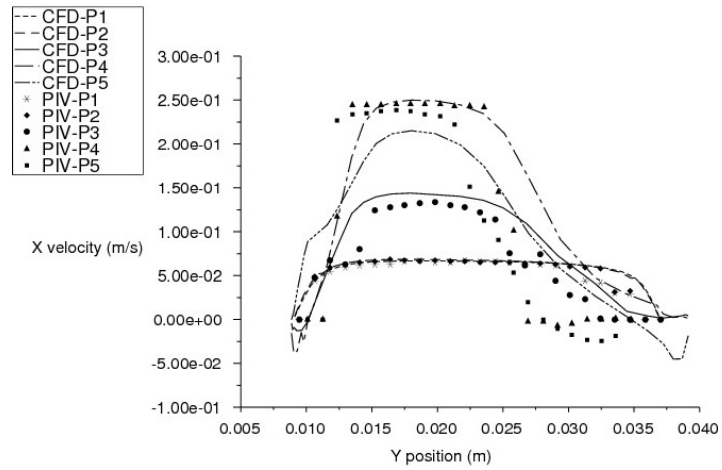


Figura 17 Modelo de turbulencia Realizable k- ϵ (RKE) y comparativa de los perfiles de velocidad P1 a P5 obtenidos experimentalmente (PIV) con los calculados numéricamente (CFD).

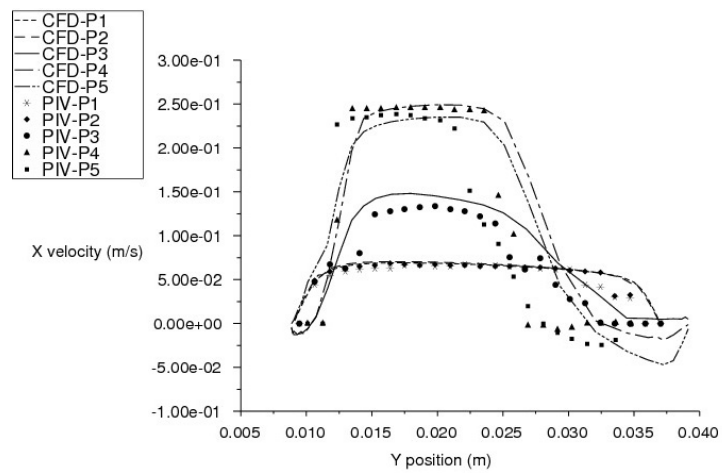


Figura 18 Modelo de turbulencia Standard k-w (SKO) y comparativa de los perfiles de velocidad P1 a P5 obtenidos experimentalmente (PIV) con los calculados numéricamente (CFD).

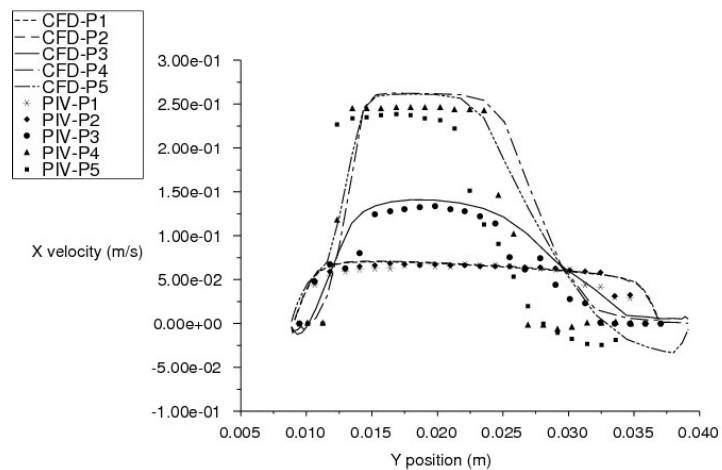


Figura 19 Modelo de turbulencia Menter's k-w (SST) y comparativa de los perfiles de velocidad P1 a P5 obtenidos experimentalmente (PIV) con los calculados numéricamente (CFD).

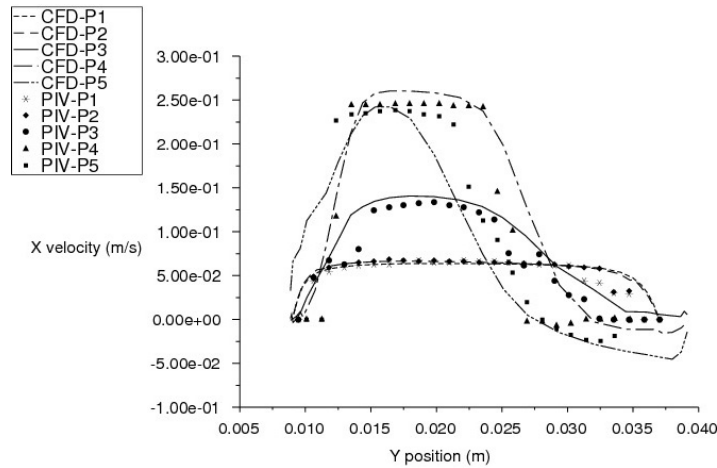


Figura 20 Modelo de turbulencia Reynolds Stress Model (RSM) y comparativa de los perfiles de velocidad P1 a P5 obtenidos experimentalmente (PIV) con los calculados numéricamente (CFD).

5. Conclusiones

Este trabajo presenta el campo de velocidades que se produce aguas arriba y aguas abajo de un dispositivo insertado en un tubo para mejorar la transferencia de calor, eliminar el ensuciamiento y producir hielo líquido.

En condiciones estáticas, el dispositivo produce un flujo en forma de "chorro" que deriva en velocidades axiales máximas de hasta 4 veces la velocidad media del flujo y vórtices de gran tamaño en la región entre los chorros.

El movimiento del dispositivo en dirección equicorriente reduce la influencia que el mismo tiene en el flujo. Cuando $\omega=0.5$, la velocidad axial máxima es 2,5 veces la velocidad media del flujo.

Los resultados numéricos muestran diferencias importantes en función del modelo de turbulencia que se haya seleccionado. Si bien todos ellos responden relativamente bien en la predicción de los valores máximos de velocidad en las zonas más alejadas del rascador, se observa que en las zonas cercanas y sobre todo en las regiones con recirculaciones de flujo existen notables diferencias.

En la zona aguas abajo del rascador, donde el campo de velocidades es acentuadamente tridimensional, los resultados numéricos en general son menos ajustados.

El modelo de turbulencia RSM es el que mejor se ajusta a los datos experimentales, especialmente en la región aguas arriba del rascador (perfiles P1, P2 y P3), siendo por otro lado el que mayor coste computacional requiere.

Por otra parte el modelo SKO es el que mejor predicción hace de las velocidades máximas aguas abajo del rascador. Finalmente, los resultados indican la necesidad de continuar los estudios numéricos con mallas mejor adaptadas a la geometría de los rascadores, teniendo en cuenta por ejemplo el redondeo real que existe en todas las aristas de éstos.

6. Referencias

- [1] Bergles, A.E., 2002, "ExHFT for fourth generation heat transfer technology", *Exp. Thermal. Fluid Sci.*, Vol. 26, pp. 335-344
- [2] De Goede, R., De Jong, E.J., 1993, "Heat transfer properties of a scraped-surface heat exchanger in the turbulent flow regime", *Chemical Engineering Science*, Vol. 48, pp.1393-1404

- [3] Kauffeld, M., Kawaji, M., Ego, P.W., 2005, "Handbook on Ice Slurries. Fundamentals and Engineering". International Institute of Refrigeration
- [4] Stamatiou, E., Meewisse, J.W., y Kawaji, M., 2005 "Ice Slurry Generation Involving Moving Parts", International Journal of Refrigeration, Vol 28, pp. 60-72
- [5] Sun, K.H., Pyle, D.L., Fitt, A.D., Please, C.P., Baines, M.J., Hall-Taylor, N., 2004, "Numerical study of 2D heat transfer in a scraped surface heat exchanger", Computers & Fluids, Vol. 33, pp. 869-880
- [6] Wang, W. Walton, J.H., McCarthy, K.L., 1999, "Flow profiles of power law fluids in scraped surface heat exchanger geometry using MRI", Journal of Food Process Engineering, Vol. 22, pp. 11-27
- [7] Webb, R.L., 1994, "Principles of Enhanced Heat Transfer", first ed., Wiley Interscience, New York