

Medida experimental del flujo laminar de fluidos no newtonianos en intercambiadores de calor mejorados

D. Crespi¹, I. Ballesta², P.G. Vicente², A. Viedma¹

1 – Departamento Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena. C/ Doctor Fleming, s/n. Cartagena.

Tel: +34 605230393

e-mail: damian.crespi@upct.es - web: <http://www.upct.es/~diff/>

2 – Departamento Ingeniería Mecánica y Energética. Universidad Miguel Hernández. Av. de la Universidad s/n. Elche.

Palabras clave: transmisión de calor, fluidos no newtonianos, intercambiador mejorado, ensuciamiento, PIV.

Resumen

Este trabajo presenta un estudio de visualización de fluidos no-Newtonianos en intercambiadores de calor con elementos insertados en movimiento. Estos dispositivos son utilizados para mejorar la transferencia de calor y eliminar el ensuciamiento propio del uso de la mayoría de fluidos no-Newtonianos. Mediante la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) se obtiene el campo de velocidades del flujo laminar en el intercambiador. El dispositivo insertado consta de varios elementos rascadores con forma de media luna. Los rascadores están montados a lo largo un eje al trespelillo, resultando en un paso de 5D. El conjunto se mueve de forma axial alternativa mediante un cilindro hidráulico. En el estudio, se analiza el aumento del nivel de mezclado derivado del uso de esta técnica, relacionándolo con el aumento de transferencia de calor.

1 Introducción

Las técnicas de mejora en intercambiadores de calor fueron analizadas por Bergles y Joshi [1], siendo los intercambiadores de calor de superficie rascada (ICSR) una de dichas técnicas. Diversos autores han estudiado el comportamiento de fluidos newtonianos en ICSR [2, 3, 4, 5], sin embargo se desconoce en gran medida el funcionamiento de los mismos con fluidos no-Newtonianos.

La instalación consta principalmente de un tubo acrílico de 37 mm de diámetro interior y un depósito de remanso a la salida. La sección de ensayo está situada a 27 diámetros desde la entrada al conducto acrílico para asegurar el flujo plenamente desarrollado. Como fluido de ensayo se utiliza una disolución de Carboximetil Celulosa en agua al 1%, el cual tiene un comportamiento seudoplástico de acuerdo al modelo *Power Law* [6]. Variando las propiedades de la mezcla y la temperatura entre 30°C y 60°C, se puede obtener un rango para el número de Reynolds entre 1 y 100.

Mediante la técnica de PIV [7], se ha obtenido el campo de velocidades en el plano de simetría. En condiciones estáticas, se han identificado las características de flujo para números de Reynolds entre $Re_{MR} = 3$ y $Re_{MR} = 40$. En condiciones dinámicas, se ha analizado el flujo para un rango entre $Re = 4$ y $Re = 50$ y cuatro velocidades distintas de rascado. Se han estudiado las características del flujo para las dos etapas del ciclo de rascado. Los ensayos revelan distribuciones de velocidades mayores que en las condiciones estáticas. Asimismo, se comprueba la importancia transcendental del *factor de bloqueo* en el flujo, que indica si el rascador, con su movimiento, ayuda o entorpece el desplazamiento del fluido.

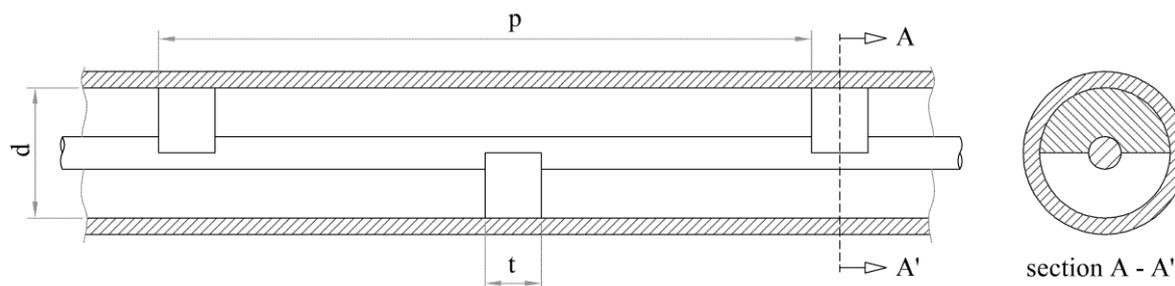


Figura 1. Esquema del dispositivo insertado. Vista del plano de simetría.

2 Metodología experimental

2.1 Fluido de ensayo y determinación de sus propiedades

Como fluido de ensayo se utiliza una disolución de Carboximetilcelulosa (CMC) de viscosidad ultra alta al 1% en agua. El fluido presenta un comportamiento no Newtoniano, en el cual la relación entre la velocidad de deformación y el esfuerzo tangencial es no lineal. Más concretamente, la disolución presenta un comportamiento pseudoplástico, en el cuál la viscosidad aparente disminuye al aumentar el esfuerzo tangencial.

Existen diversos modelos matemáticos que explican el comportamiento pseudoplástico de un fluido. De entre ellos, en la bibliografía [8],[9] y [10] se señala al modelo *Power Law* como el más apropiado para explicar el comportamiento del fluido de trabajo utilizado, el cuál formula la siguiente relación entre el esfuerzo tangencial aplicado al fluido y la velocidad de deformación que en él se produce:

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Siendo m es el coeficiente de consistencia del flujo y n es el índice de comportamiento del flujo. Los valores de m y n definen por tanto el comportamiento del fluido y dependen fuertemente de factores como: la concentración de CMC en la disolución, el método de preparación, la temperatura y la degradación del fluido.

Metzner y Reed [11] definieron el número de Reynolds en fluidos *Power Law* (Ec. 2), de forma que, análogamente a lo que ocurre con fluidos newtonianos, cumpliera la Ec. 3.

$$Re_{MR} = \frac{8^{1-n} D_h^n \rho u^{2-n}}{m \frac{bn+a}{n}} \quad (2)$$

$$f = \frac{16}{Re_{MR}} \quad (3)$$

Antes y después de la realización de cada ensayo, se ha realizado la medición de las propiedades del fluido. El método de obtención de las propiedades m y n del fluido, consiste en circular el fluido en las condiciones de ensayo, por un tubo liso de 18 mm diámetro interior y 1,5 m de longitud. La caída de presión en el tubo liso se mide mediante un sensor diferencial estacionario de rango 0-500 mmca. Para asegurar el pleno desarrollo del flujo laminar en el tramo en el que se realiza la medida, existen tramos de tubo liso adicionales en la región de entrada (27D) y de salida (11D).

A partir de la caída de presión en el tubo liso, se puede calcular el esfuerzo tangencial en la pared del siguiente modo:

$$\tau_w = \frac{\Delta p D}{4L} \quad (4)$$

Finalmente a partir de la ecuación que define el modelo *Power Law*, se puede obtener la Ec. (5), cuyo logaritmo permite obtener los valores de m y n del fluido en el momento de la prueba.

$$\tau_w = m \left[\frac{8u}{D} \left(\frac{a+bn}{n} \right) \right]^n \quad (5)$$

2.2 Instalación de visualización

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 32 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 45 diámetros de la entrada del tubo. 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.

En la Tabla 1 se detallan las dimensiones del intercambiador de calor ensayado.

Magnitud	Unid	Valor
Diámetro tubo (d)	mm	32
Diámetro del eje	mm	8
Paso (p)	mm	160
Espesor taco (t)	mm	13

Tabla 1. Dimensiones del intercambiador de calor y el dispositivo insertado.

El fluido de ensayo se impulsa por el circuito mediante una bomba volumétrica regulada por un variador de frecuencia, lo cual permite controlar la velocidad media del fluido, que se mide con un caudalímetro de Coriolis de gran precisión. 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, junto con las propiedades del fluido, determinan el número de Reynolds. La instalación puede trabajar en un rango de temperaturas que va desde 25°C hasta 60°C, así como en un rango de caudales entre 50 l/h y 300 l/h, lo cual permite obtener un número de Reynolds en el rango de $Re_{MR} = 1$ hasta $Re_{MR} = 100$.

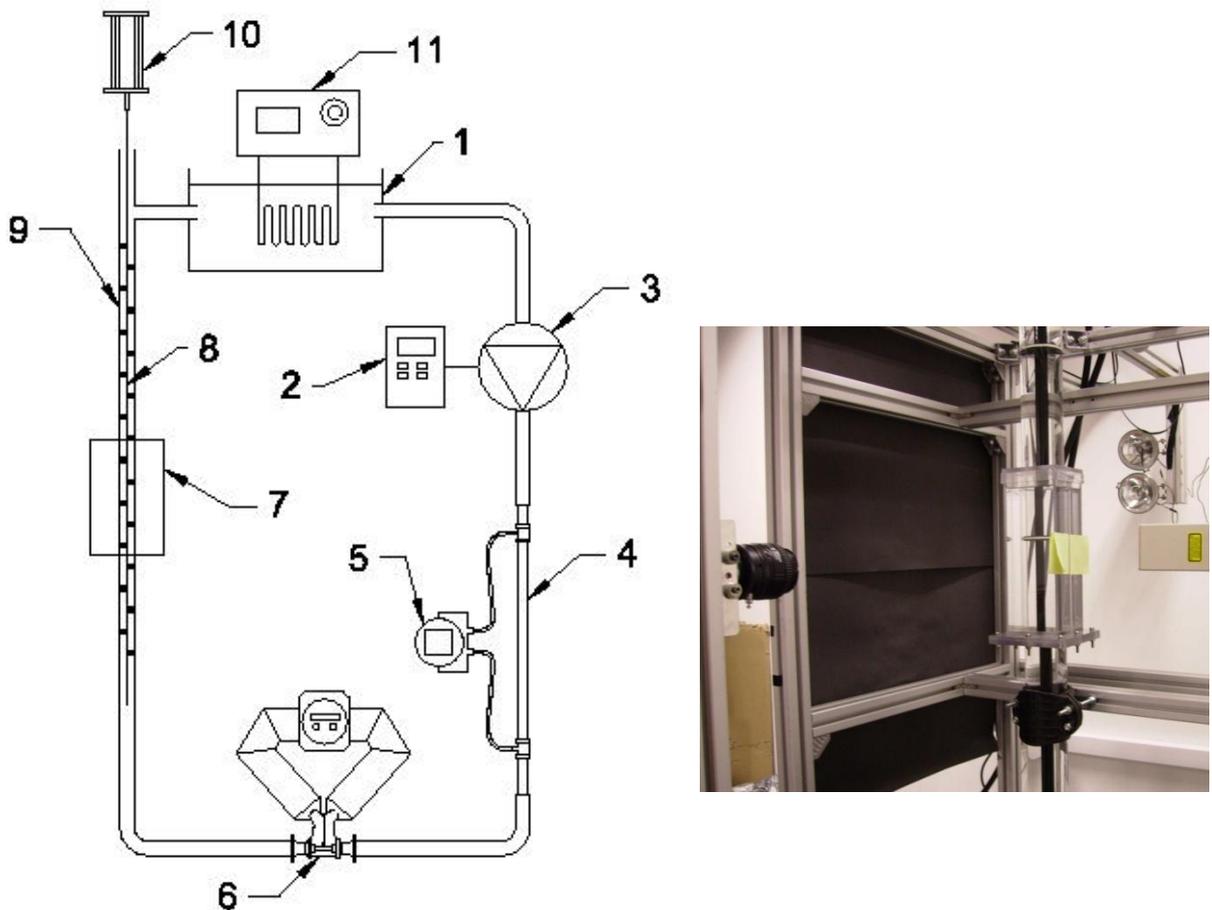


Figura 2. A la derecha, fotografía del dispositivo de PIV. A la izquierda, esquema de la instalación compuesta por los siguientes elementos: 1-Depósito, 2-Variador de frecuencia de la bomba, 3- Bomba de engranajes, 4-Viscosímetro en línea, 5-Transmisor diferencial de presión, 6- Caudalímetro de Coriolis, 7- Depósito de visualización, 8-Elemento insertado, 9-Tubo acrílico, 10-Cilindro neumático, 11-Baño térmico.

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 2 (derecha), 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 y 500 Hz, permitiendo así la obtención de múltiples pares de imágenes. El láser trabaja con luz infrarroja de 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. El mecanismo de disparo para la captura del par de imágenes está compuesto de un sensor fotoeléctrico y un temporizador, de forma que se puede configurar la posición del rascador a capturar.

Para cada experimento se han procesado entre 100 y 500 pares de imágenes, haciendo uso del software comercial VidPIV que aplica algoritmos de correlación cruzada adaptativa entre imágenes consecutivas.

Tanto en condiciones estáticas como dinámicas se aplican: primero el algoritmo de correlación cruzada y 2 algoritmos sucesivos de correlación cruzada adaptativa, en los cuales el tamaño de ventana utilizado disminuye: comenzando con una ventana de 32x32 con un 75% de solapamiento para los dos primeras iteraciones y finalizando con una ventana de 16x16 píxeles y un 50% de solapamiento. Después de cada iteración del algoritmo, se aplican un filtro local y otro global para eliminar datos erróneos y una interpolación para rellenar los huecos dejados por los datos erróneos. Finalmente, el campo de velocidades obtenido es el resultado de promediar los resultados de procesar cada par de imágenes.

Para la descripción de los resultados en régimen dinámico, es conveniente definir tanto la *velocidad relativa de rascador* (ω), como el *factor de bloqueo del rascador* (β). Por un lado, el primer parámetro expresa la velocidad del rascador en función de la velocidad media del flujo. Por otro lado, el factor de bloqueo expresa si el movimiento del rascador supone una ayuda en la impulsión del fluido ($\beta < 0$) o si por el contrario obstaculiza el flujo ($\beta > 0$).

$$\omega = \frac{u_r}{u} \quad (6)$$

$$\beta = 1 - \omega \quad (7)$$

3 Resultados

Aunque el plano de luz emitido tiene una altura de 100 mm, el tamaño de la zona en la que la técnica de PIV puede obtener buenos resultados es de 60-80 mm de longitud en la dirección del eje. Es por ello que los resultados de velocidad han debido ser procesados en tres regiones consecutivas, de modo que cubran el total de la región a visualizar (véase Figura 3). Posteriormente los resultados se superponen para componer las imágenes del dispositivo completo.

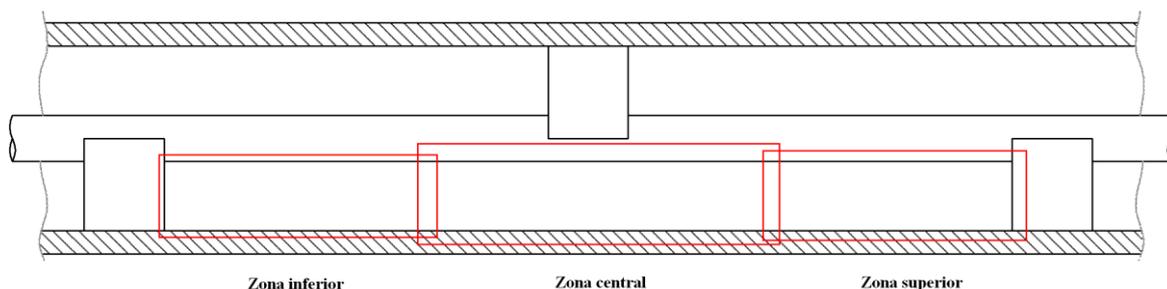


Figura 3. Zonas de captura de imágenes.

3.1 Dispositivo estático

Se ha analizado el patrón de flujo en condiciones estáticas, donde el rascador no se mueve. En este caso el factor de bloqueo es siempre igual a la unidad, $\beta = 1$. Se han realizado experimentos a diferentes números de Reynolds, en un rango entre $Re_{MR} = 3$ y $Re_{MR} = 40$. Los experimentos se han realizado a una temperatura de 29°C, variando el caudal entre 200 l/h y 300 l/h y con diferentes propiedades del fluido debido a la degradación.

En estas condiciones, se obtienen tres grupos de imágenes, cada uno de los cuales está compuesto por 100 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.

Las imágenes bidimensionales representan un plano del flujo. Los experimentos se han llevado a cabo en el único plano de simetría existente, el cual se detalla en la Figura 4.

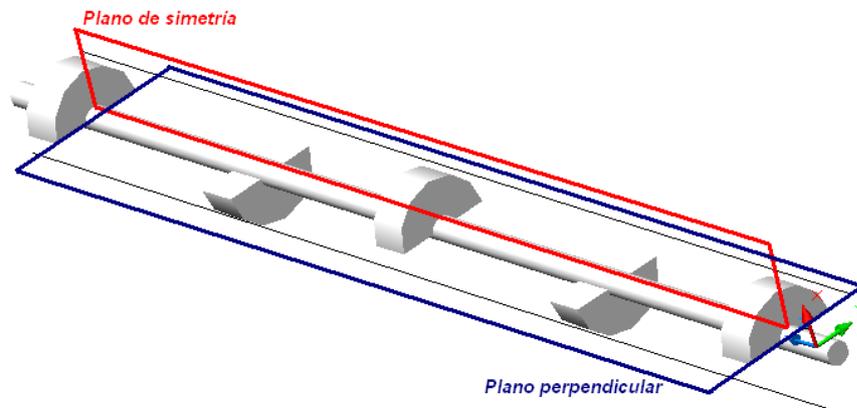


Figura 4. Plano de simetría del dispositivo insertado.

La Figura 5 muestra el campo de velocidad medido en el plano de simetría para un ensayo donde $Re_{MR} = 8$. El campo de velocidades muestra zonas de alta velocidad en la zona opuesta a los tacos rascadores y zonas de baja velocidad aguas arriba y aguas abajo de dichos tacos.

De este modo, el dispositivo insertado induce un patrón de flujo de estructura zigzagueante para evitar el obstáculo que producen los tacos. En las zonas de alta velocidad, se alcanzan velocidades de hasta 3 veces la velocidad media del flujo.

En el experimento mostrado en la Figura 5, existen zonas del flujo de muy baja velocidad, pero no se aprecian recirculaciones ni zonas de mayor mezclado. El flujo es fuertemente laminar.

Además del ensayo mostrado en la Figura 5, se han realizado otros tres ensayos con números de Reynolds entre $Re_{MR} = 8$ y 40. Sin embargo, en el resto de ensayos únicamente se aprecian pequeñas variaciones; al aumentar el número de Reynolds aumenta ligeramente el tamaño de las zonas de baja velocidad aguas abajo del rascador y el tamaño de la zona de velocidad máxima del flujo en el plano de simetría. Es de destacar que la variación de los valores de Reynolds en los ensayos no es significativa, debido a las limitaciones de la instalación al trabajar con un fluido altamente viscoso.

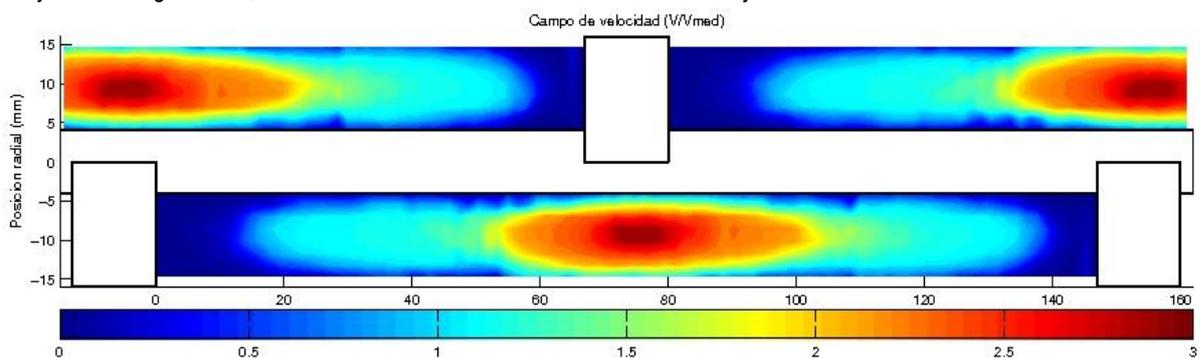


Figura 5. Resultados de visualización en ensayo con rascador estático y $Re_{MR} = 8$.

3.2 Dispositivo dinámico

Se han realizado ensayos dinámicos a números de Reynolds entre 11 y 48. El valor del *índice de comportamiento del flujo* varía entre $n=0,64$ para los ensayos a menor número de Reynolds y $n = 0,88$ para los ensayos a mayor número de Reynolds.

Resultados en equicorriente

En primer lugar se muestran los resultados de los ensayos en los que el rascador se mueve en sentido del flujo (equicorriente). Dicho caso de estudio es el que comprende una mayor variedad de estructuras de flujo, que dependen principalmente del *factor de bloqueo* (β).

En los casos en los que $\beta < 0$, la diferencia entre la velocidad del rascador y la velocidad media del fluido es todavía menor que en el caso estático. La influencia del rascador en flujo es menor que en el ensayo con rascador estático y debería disminuir a medida que β se acerque a 0.

En la Figura 6 se muestra el campo de velocidades obtenido para el caso $\omega = 0,5$ ($\beta = -0,5$), en el cuál se confirma que los efectos del rascador son menores que en el caso estático. Concretamente se observa que la velocidad máxima es 2,3 veces la velocidad media del fluido y que el tamaño de las zonas de baja velocidad se ha reducido considerablemente.

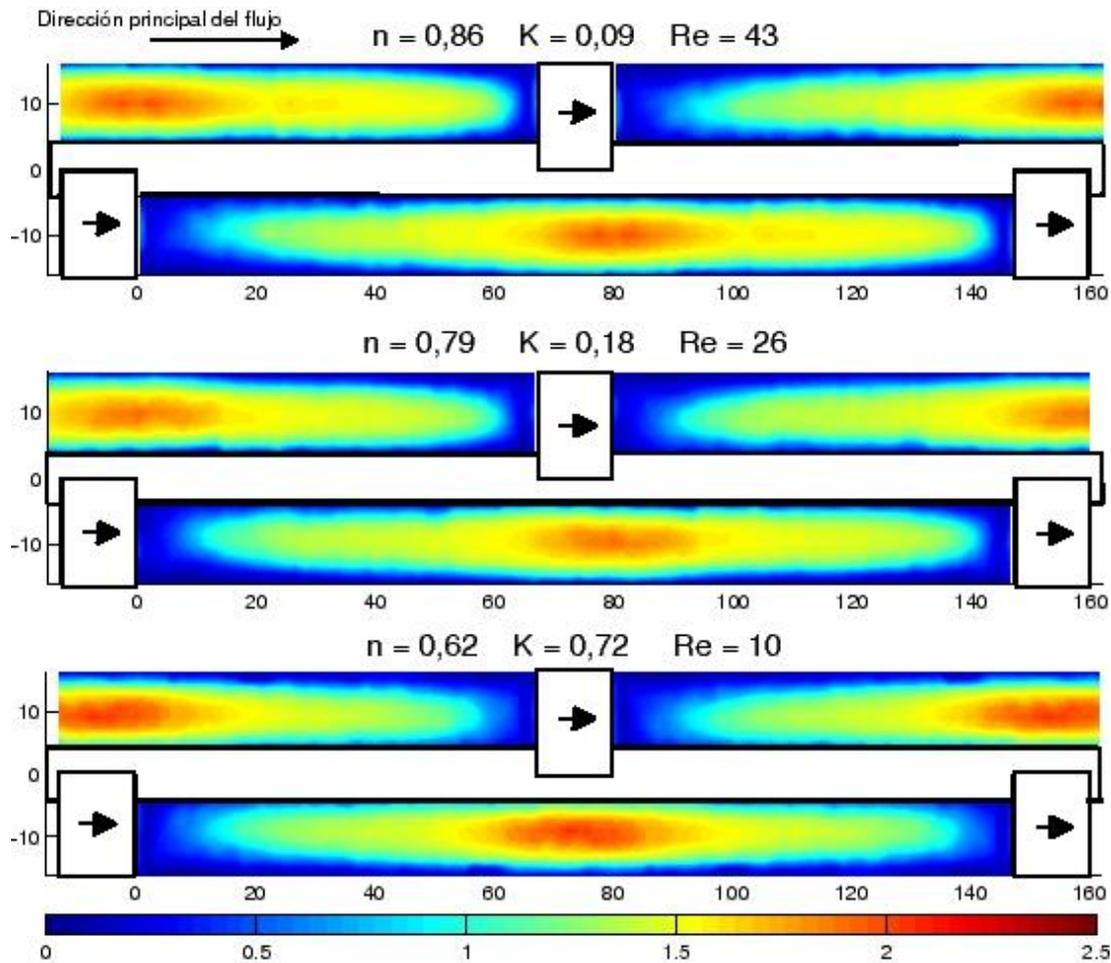


Figura 6. Resultados de visualización en ensayo dinámico en dirección equicorriente: $\omega = 0,5$ y $\beta = 0,5$. Bloqueo positivo.

El caso particular en el que $\beta = 0$, se da cuando la velocidad del rascador en el sentido del flujo es la misma que la velocidad media del propio flujo. En éste caso, la influencia del rascador en el flujo, aunque existente, será mínima. En la Figura 7 se muestra el campo de velocidades obtenido en el caso mencionado, a 3 valores distintos del número de Reynolds. En los resultados se observa la gran similitud del campo de velocidades obtenido, con el que se obtendría en un tubo con eje. La influencia del rascador no es apreciable mediante el uso de ésta técnica.

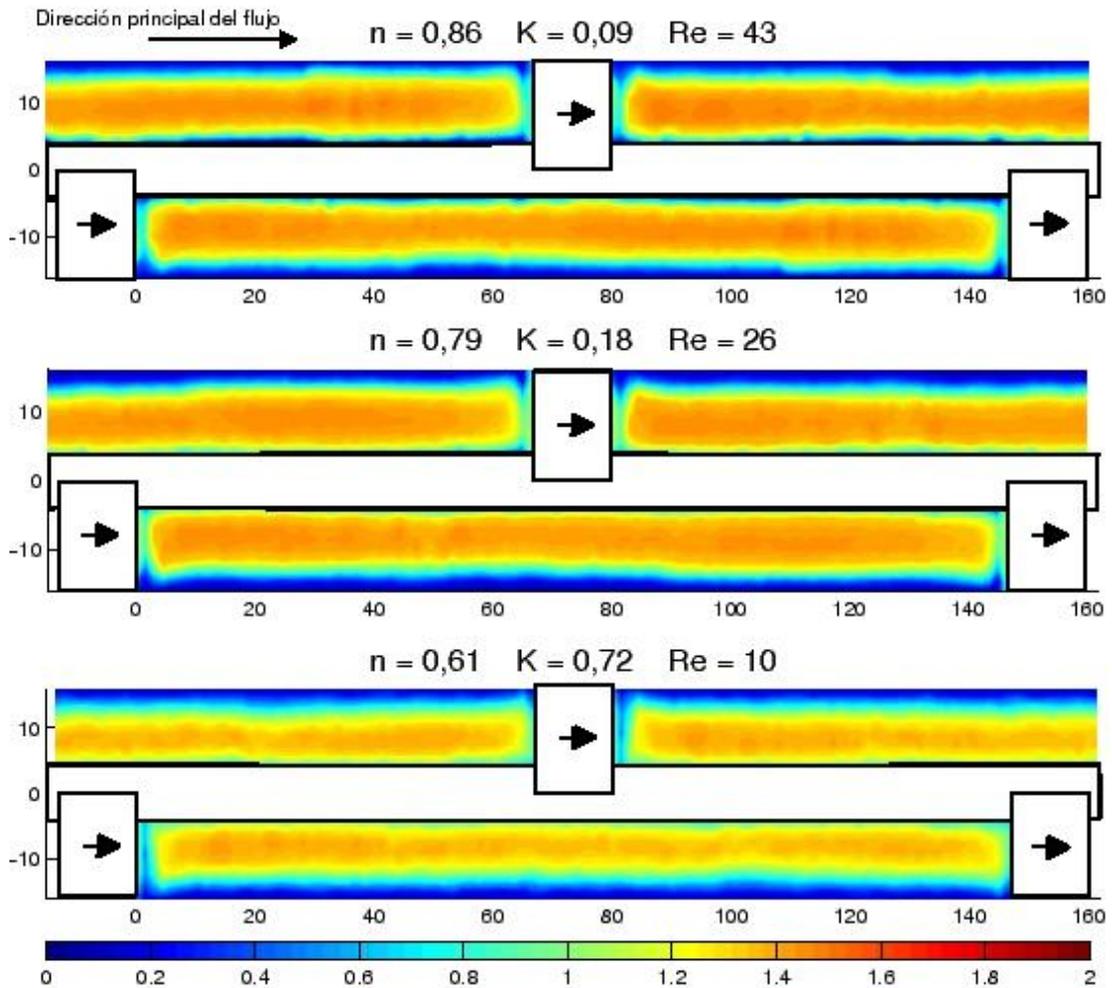


Figura 7. Resultados de visualización en ensayo dinámico en dirección equicorriente: $\omega = 1$ y $\beta = 0$. Bloqueo nulo.

Por último, en los ensayos en los que $\beta > 0$, la velocidad del rascador es superior a la velocidad media del fluido y la estructura cambia de forma significativa respecto a los casos anteriores. En estos casos el movimiento del rascador induce una depresión aguas arriba del mismo, lo cual a su vez provoca altas velocidades en esa zona. Además, por efecto de impulsión de rascador también se genera una pequeña zona de alta velocidad aguas abajo del rascador. Así, la región de mayor velocidad en sentido equicorriente se extiende desde la zona aguas debajo de un taco a la zona aguas arriba del siguiente taco, en posición opuesta.

En condiciones de bloqueo positivo y sentido equicorriente, se han realizado ensayos a valores de $\omega = 2$ y 3 , y a tres números de Reynolds en el rango entre 10 y 43. Los efectos del bloqueo positivo se observan más claramente en el ensayo a $\omega = 3$, mostrado en la Figura 8. Los resultados muestran velocidades máximas de hasta 5 veces la velocidad media en la zona de baja presión que se produce aguas arriba de los tacos en movimiento. Además, se aprecian corrientes que circulan en sentido opuesto al flujo principal, inducidas por las altas velocidades anteriormente mencionadas.

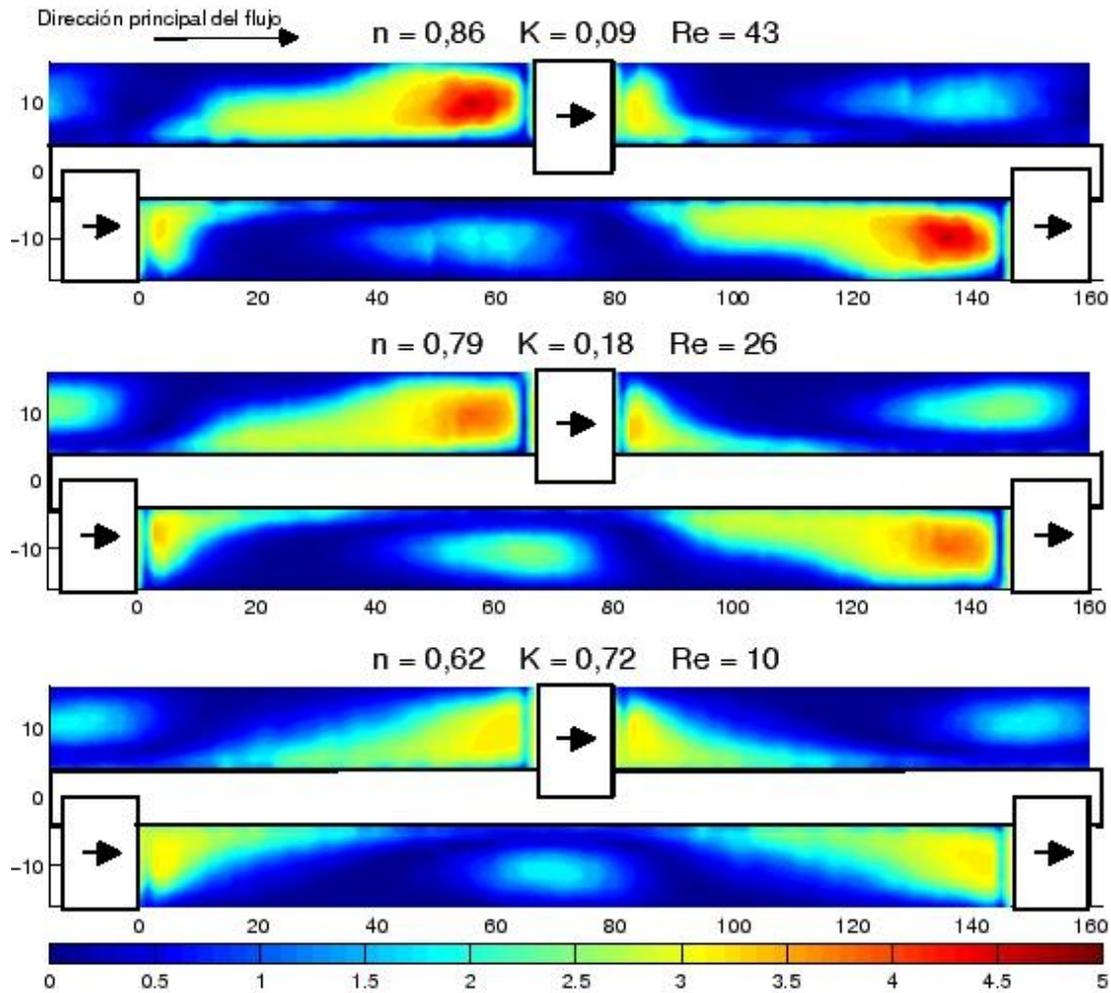


Figura 8. Resultados de visualización en ensayo dinámico en dirección equicorriente: $\omega = 3$ y $\beta = -2$. Bloqueo negativo.

Resultados en contracorriente

En los ensayos en los que el rascador se mueve en sentido contrario al flujo, el bloqueo siempre es positivo y es mayor a medida que aumenta la velocidad de rascado. Por lo tanto, las estructuras de flujo que aparecen son similares a las que aparecen en los ensayos estáticos o en los ensayos en equicorriente en los que el bloqueo también es positivo. Además el efecto del rascador, aumenta al hacerlo el factor de bloqueo.

En contracorriente se han realizado ensayos con $\omega = -0,5$; -1 ; -2 y -3 , cada uno a tres números de Reynolds diferentes en el rango entre 10 y 48. En la Figura 9, se muestra el resultado de los ensayos a $\omega = -3$. En ellos se aprecia una nueva zona de flujo inverso que no aparece en los ensayos estáticos o en equicorriente, aguas abajo del rascador y provocada por el movimiento de éste.

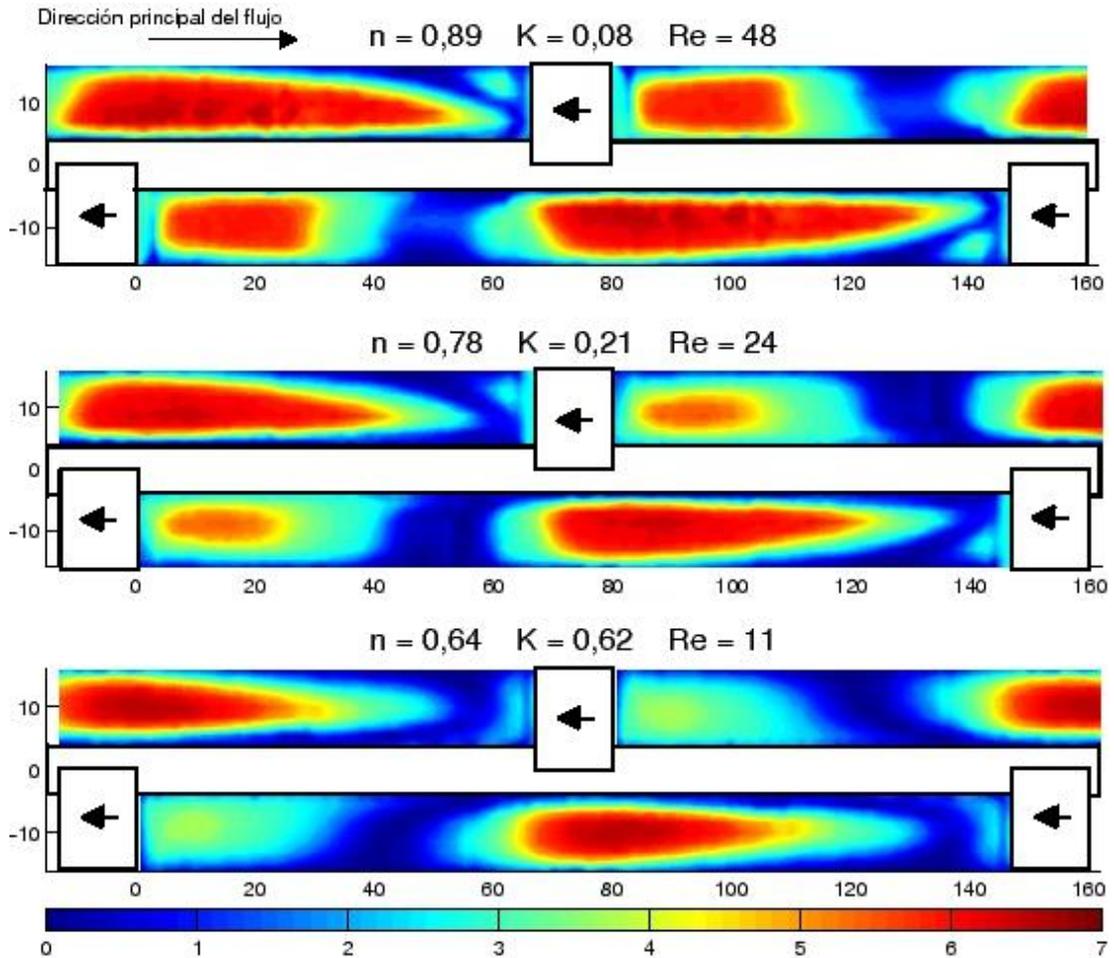


Figura 9. Resultados de visualización en ensayo dinámico en dirección contracorriente: $\omega = -3$ y $\beta = 4$. Bloqueo positivo.

4 Conclusiones

El trabajo presenta el campo de velocidades que se produce a causa de un dispositivo insertado en un tubo para mejorar la transferencia de calor y eliminar el ensuciamiento.

1. Se ha desarrollado una metodología de ensayo para fluidos no Newtonianos de comportamiento pseudoplástico en intercambiadores de calor de superficie raspada, mediante la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas.
2. Se ha obtenido el campo de velocidades en regímenes de raspado estático y dinámico, en direcciones equicorriente y contracorriente. Para cada caso de estudio se han realizado ensayos en un rango de números de Reynolds entre $Re_{MR} = 3$ y $Re_{MR} = 50$.
3. Se ha constatado la relación entre la estructura del flujo y el factor de bloqueo β .
4. Mediante el ensayo a diferentes números de Reynolds, se ha comprobado la influencia del mismo en las estructuras de flujo, más destacada en los ensayos dinámicos.

Referencias

- [1] C.S. Rao and R.W. Hartel, Scraped surface heat exchangers. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 46:207-219, 2006.
- [2] A.E. Bergles and S.D. Joshi, Augmentation Techniques for Low Reynolds Number in-tube Flow, Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers, Hemisphere, Washington DC, 1985.
- [3] M. Harrod, Scraped surface heat exchangers: a literature survey of flow patterns, mixing effects, residence time distribution, heat transfer, and power requirements. Journal of Food Process Engineering, 9:1-62, 1986.
- [4] A.M. Trommelen and W.J. Beek, Flow phenomena in a scraped surface heat exchanger (Votator-type). Chemical Engineering Science, 26:1933-1942, 1971.
- [5] A. García, J.P. Solano, P.G. Vicente and A. Viedma, Flow pattern assessment in tubes of reciprocating scraped surface heat exchangers. International Journal of Thermal Sciences, 50: 803-815, 2011.

- [6] R.P. Chaabra and R.J. Richardson Non Newtonian flow in the process industries. Fundamentals and engineering applications. Butterworth-Heinemann, 225 Wildwood Av., Woburn., 1999.
- [7] M. Raffel, C. Willer and J. Kompenhans, Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Springer, 2000.
- [8] Xiao Hong Yang and Wei Ling Zhu. Viscosity properties of sodium carboxymethylcellulose solutions. Cellulose, 2007.
- [9] K. A. Abdelrahim and H. S. Ramaswamy. High temperature/pressure rheology of carboxymethylcellulose (cmc). Food Research International, 28(3):285 – 290, 1995
- [10]M.A. Cancela, E. Alvarez, and R. Maceiras. Effects of temperature and concentration on carboxymethylcellulose with sucrose rheology. Journal of Food Engineering, 71:419–424, 2005.
- [11] Metzner, A. B. and Reed, J. C.. Flow of Non-Newtonian Fluids - Correlation of Laminar, Transition and Turbulent Flow Regimes. AIChEJ, 1: 434, 1955.