

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 745 567**

21 Número de solicitud: 201830859

51 Int. Cl.:

**B01F 13/00** (2006.01)

**B01F 5/04** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

**31.08.2018**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**02.03.2020**

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (100.0%)**

**Avenida Cervantes, Nº2**

**29071 Málaga ES**

72 Inventor/es:

**ORTEGA CASANOVA, Joaquín;**

**SÁNCHEZ CLAROS, María y**

**SANMIGUEL ROJAS, Enrique**

54 Título: **Dispositivo micrométrico para mezclar fluidos en régimen laminar**

57 Resumen:

Dispositivo micrométrico para mezclar fluidos en régimen de flujo laminar. La presente invención se refiere a un dispositivo micrométrico para mezclar fluidos en régimen de flujo laminar que comprende (i) al menos un canal configurado para acomodar un primer fluido que circula en una dirección a lo largo de cada canal, y (ii) al menos un inyector alojado en el al menos un canal configurado para introducir un segundo fluido en el canal; donde el primer fluido es un fluido incompresible que circula a través del al menos un canal con un flujo que asegura un régimen laminar, y el segundo fluido es también un fluido incompresible. La presente invención proporciona un dispositivo micrométrico para mezclar fluidos en régimen de flujo laminar que se puede usar para hacer la mezcla de dos o más fluidos, con o sin reacción química entre ellos.

ES 2 745 567 A1

**DESCRIPCIÓN**

**DISPOSITIVO MICROMÉTRICO PARA MEZCLAR FLUIDOS EN RÉGIMEN**

**LAMINAR**

**5 CAMPO TÉCNICO**

La presente invención se refiere a un dispositivo micrométrico para mezclar fluidos, con o sin reacción química entre ellos, bajo régimen laminar. Este dispositivo robusto y simple de construir mejora las condiciones de la mezcla de otros mezcladores estáticos  
10 conocidos en el estado de la técnica. El objeto de la invención es adecuado para su uso en el sector del desarrollo de nuevas herramientas a escala micrométrica para investigación en Ingeniería, Medicina, Química, Biología y Farmacología.

**ANTECEDENTES**

15

Cuando se deben mezclar dos fluidos en la microescala donde, normalmente, debido a las dimensiones del dispositivo, el número de Reynolds es bastante bajo y la difusión laminar gobierna el proceso de mezcla (consulte Capretto et al., 2011, o Lee et al., 2011, un par de artículos de revisión sobre micromezclas), es importante realizar cualquier tipo  
20 de acción para mejorar la eficiencia de la mezcla en la salida del microdispositivo. De lo contrario, tanto la eficiencia como el rendimiento del microdispositivo serán muy pobres. La mayoría de las acciones implementadas para mejorar la mezcla en microdispositivos se clasifican como activas o pasivas, dependiendo de si se aplica o no algún tipo de energía externa, respectivamente. Por un lado, los micromezcladores activos se basan  
25 en la aplicación de algún tipo de energía externa adicional para promover la interacción de fluidos y, por lo tanto, aumentar la eficiencia de la mezcla.

Por otro lado, los micromezcladores pasivos se basan en promover la mezcla mediante un diseño específico de la geometría que busca aumentar la superficie de contacto entre  
30 los fluidos para ayudar así a la mezcla. Es posible encontrar en la literatura muchos trabajos enfocados en el diseño de la geometría del micromezclador. En ese sentido, tanto Jain et al. (2013) como Hossain et al. (2011), utilizaron un micromezclador estriado con fines de mezclado optimizado mediante simulaciones numéricas. En el trabajo de Kim et al. (2011), se usó un particular microcanal con determinados elementos internos  
35 y buscaron el ángulo, la altura, el ancho y el espaciado de dichos elementos, así como la longitud del canal para tener la mayor eficiencia de mezcla en la salida del

microdispositivo. Además, Tseng et al. (2011) estudiaron cómo la eficiencia de la mezcla se ve afectada por la forma, la longitud, el ancho y la ubicación de unos obstáculos con forma de diamante distribuidos a lo largo del micromezclador, mientras que Hsiao et al. (2014) usaron pares de aletas rectangulares montadas en la parte inferior de un canal principal en forma de T y encontraron los valores de los parámetros geométricos óptimos para obtener la mayor eficiencia de mezcla posible. Finalmente, para concluir estos ejemplos de micromezcladores pasivos, Parsa y Hormozi (2014), mediante técnicas numéricas y experimentales, pudieron encontrar el cambio de fase óptimo entre las paredes laterales sinusoidales de un micromezclador. Los mezcladores pasivos son simples y operan sin partes móviles y, por lo tanto, son preferibles cuando se trabaja con técnicas de fabricación basadas en litografía suave, pero su eficiencia de mezcla a la salida del micromezclador es fuertemente dependiente del caudal y la geometría (Ober et al., 2015).

Dentro del campo relacionado con esta invención, nos centramos en estos dos últimos parámetros: la tasa de flujo (relación de intensidad), promovida por la técnica de soplado; y la geometría (ángulo del chorro), que promoverá la formación de vórtices aguas abajo.

En cuanto a la mezcla de fluidos por medio del mecanismo de desprendimiento de vórtices y/o la técnica de soplado, se han encontrado en la literatura pocos trabajos, según el conocimiento de los autores. Por un lado, en el trabajo de Ortega-Casanova (2017) se lleva a cabo un estudio numérico para caracterizar el inicio de la formación de vórtices desde un pilar cuadrado confinado para una relación de bloqueo de canal dada en función de la relación de aspecto del pilar y el número de Reynolds. Además, se muestra cómo el desprendimiento de vórtices puede ayudar a aumentar la eficiencia de la mezcla para un número de Reynolds dado y diferentes relaciones de aspecto del pilar. Por otro lado, en los trabajos de Rafferty y Kaminski (2014) y Nahum y Seifert (2006), se estudian chorros paralelos idénticos que se inyectan en un dominio confinado y se caracterizan las transiciones del flujo a diferentes regímenes. También evaluaron la eficiencia de mezcla para diferentes configuraciones de la geometría y números de Reynolds.

El documento KR20170133599A propone un micromezclador para mezclar un fluido con un reactivo, donde el fluido y el reactivo se someten a un campo electromagnético que mejora la mezcla de ambos. Además, el documento WO2018006166A1 describe un

instrumento inteligente para mezclar usando un chip microfluídico con el que se pueden preparar formulaciones. Este chip microfluídico mencionado está formado por microcanales y un dispositivo programable. El sistema logra formulaciones óptimas para ARN, péptidos y moléculas pequeñas.

5

Los documentos ES2113184T3 y ES2146009T3 describen micromezcladores estáticos compuestos de dos partes diferenciadas con microcanales por las que circulan dos fluidos diferentes. Los canales están entrecruzados, permitiendo la mezcla de ambos líquidos. Otro tipo de micromezclador estático para mezclar fluidos con reacciones químicas se describe en el documento ES2336112T3, donde los fluidos se conducen por separado a una microcámara donde se mezclan mediante una reacción química que produce calor.

10

Por otro lado, el documento US2002057627A1 propone un micromezclador estático que consta de algunos canales de entrada para cada fluido, pero formando un ángulo para minimizar las pérdidas de presión, de modo que estos canales descargan en una cámara donde se realiza la mezcla mencionada anteriormente.

15

El solicitante no conoce ningún documento que describa un dispositivo equivalente al propuesto en la presente invención para mezclar fluidos en forma estática a escala micrométrica. Los micromezcladores conformes a la presente invención, basados en el soplado de uno de los fluidos desde un inyector interno, junto con el vórtice que se desprende aguas abajo, son una buena opción para desarrollar dispositivos de micromezclado geoméricamente simples y con eficiencias de mezcla relativamente altas.

20

25

## **RESUMEN DE LA INVENCION**

La presente invención busca proporcionar un dispositivo micrométrico para mezclar fluidos en régimen de flujo laminar, que se puede usar para hacer la mezcla de dos fluidos tanto sin reacción química entre ellos como para llevar a cabo una reacción química entre los fluidos, ya que, simplificando, una reacción química es una mezcla entre especies químicas.

30

El dispositivo micrométrico según la invención comprende (i) al menos un canal configurado para acomodar un primer fluido que circula en una dirección a lo largo de

35

5 cada canal, (ii) al menos un inyector alojado en el al menos un canal configurado para introducir un segundo fluido en el canal, donde el primer fluido circula a través del canal bajo un régimen de flujo laminar y donde la unión de canales e inyectores es impermeable. Aunque se puede promover el desprendimiento de vórtice independientemente de la dirección en la que se introduce el segundo fluido, es probable que se logre una mezcla eficiente y homogénea cuando el segundo fluido se inyecta en una dirección *normalmente opuesta* a la dirección de circulación del primer fluido. En este documento, la expresión “normalmente opuesta” se refiere a una dirección de flujo esencialmente opuesta, pero no necesariamente completamente opuesta, es decir, sin descartar la posibilidad de existir algún otro ángulo entre ambas direcciones de flujo. En este contexto, en el presente documento se entiende que, cuando los fluidos a mezclar fluyen exactamente en la misma dirección, entre estas direcciones se forma un ángulo de  $180^\circ$ , mientras que cuando los fluidos a mezclar fluyen exactamente en la dirección opuesta, se forma un ángulo de  $0^\circ$  entre estas direcciones opuestas. En una realización preferida, el segundo fluido se inyecta en la dirección opuesta a la dirección de circulación del primer fluido. En otra realización interesante, el segundo fluido se inyecta en una dirección que permite la posibilidad de formar un ángulo  $>0^\circ$  y  $<180^\circ$  entre esta dirección y la dirección de circulación del primer fluido. En otra realización preferida, el segundo fluido se inyecta en la misma dirección que la dirección de circulación del primer fluido.

El dispositivo micrométrico de acuerdo con esta invención puede comprender más de un inyector en el mismo canal, con los inyectores separados entre sí una cierta distancia a lo largo de la longitud del canal, y la distancia es dependiente de (si el objetivo es obtener una mezcla de los fluidos de manera eficiente), entre otros parámetros, las dimensiones del canal, la geometría y la posición de los inyectores, y los parámetros de flujo de los fluidos que se mezclarán. En una realización preferida destinada a reducir la longitud del canal, el dispositivo de acuerdo con la invención comprende un solo inyector.

Del mismo modo, al menos un inyector puede ubicarse centrado con respecto al ancho del canal o excéntrico (desplazado) respecto de este. En una realización preferida, al menos un inyector está situado centrado con respecto al ancho del canal.

El al menos un inyector de un dispositivo micrométrico según la invención puede estar construido con cualquier forma geométrica como, por ejemplo, un prisma o una

estructura que comprenda secciones curvas. En una realización preferida, el inyector es un poliedro, preferiblemente un prisma rectangular o cuadrado. Del mismo modo, la altura del al menos un inyector puede ser igual o menor que la altura del canal donde se aloja el inyector. Las dimensiones o la forma de la sección del al menos un inyector determinan, entre otras cosas, los flujos del primer y segundo fluido en los que se observará el desprendimiento de vórtice aguas abajo del al menos un inyector.

El al menos un inyector de un dispositivo micrométrico de acuerdo con la invención presente incluye al menos un punto o ranura por el cual se introduce un segundo o subsiguiente fluido en el canal, permitiendo que ese punto o ranura permita inyectar un flujo dependiente del tiempo, pudiendo estar ubicado ese punto o ranura en cualquiera de las caras o superficies del inyector expuestas al contacto con el primer fluido (o con una mezcla que contenga ese primer fluido y que se haya formado utilizando un inyector anterior), y determinando la orientación de ese punto o ranura el ángulo de inyección del segundo o subsiguiente fluido. En una realización preferida, el inyector comprende al menos dos puntos o ranuras con una ubicación diferente y, por lo tanto, permite la introducción del segundo o subsiguiente fluido en diferentes direcciones (pudiendo formar diferentes ángulos con respecto a la dirección del flujo del primer fluido -o una mezcla que contiene el primer fluido y que se forma utilizando un inyector anterior-) desde cada uno de los puntos o ranuras. Si bien se puede promover el desprendimiento de vórtices independientemente de la ubicación de los puntos o ranuras de inyección, es probable que se logre una mezcla eficiente y homogénea cuando dichos puntos o ranuras estén ubicados en la cara (o caras), o en la superficie del inyector *normalmente confrontada* a la dirección del flujo del primer fluido (o una mezcla que contenga ese primer fluido y se forme utilizando un inyector anterior). En este documento, la expresión "normalmente confrontada" se refiere a una ubicación esencialmente opuesta o confrontada, aunque no necesariamente totalmente opuesta o confrontada, es decir, sin descartar la posibilidad de medir cualquier otro ángulo entre la dirección del flujo del primer fluido (o una mezcla del mismo que contiene el primer fluido y se forma utilizando un inyector anterior) y una línea imaginaria perpendicular al punto de ubicación en la cara o superficie del inyector. En una realización preferida, los puntos de inyección o las ranuras están ubicados en la cara (o caras) o en la superficie del inyector enfrentada a la dirección del flujo del primer fluido (o una mezcla que contiene ese primer fluido y se forma utilizando un inyector anterior). En otra realización preferida, los puntos o ranuras de inyección están ubicados en la cara (o caras) o en la superficie del inyector opuesta a la cara (o caras) o en la superficie enfrentada a la dirección del flujo del primer fluido

(o una mezcla que contiene ese primer fluido y formada utilizando un inyector anterior). En otra realización preferida, los puntos de inyección o las ranuras están ubicados en una cara (o caras) o en la superficie del inyector (i) ni opuestas a la cara (o caras) o en la superficie enfrentada a la dirección del flujo del primer fluido (o una mezcla que  
 5 contiene ese primer fluido y se forma utilizando un inyector anterior); (2) ni enfrentadas a la dirección del flujo del primer fluido (o una mezcla que contiene ese primer fluido y se forma utilizando un inyector anterior). Con respecto al número de puntos o ranuras de inyección, en una realización preferida, el inyector comprende dos puntos o ranuras para hacer la introducción del segundo o subsiguiente fluido.

10

En un dispositivo micrométrico para mezclar fluidos bajo un régimen de flujo laminar de acuerdo con esta invención, cada canal tiene una anchura y una altura inferior o igual a 1000  $\mu\text{m}$ , entendiéndose que una mayor anchura o altura estaría dentro de la escala milimétrica y no dentro de la micrométrica.

15

### **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DISEÑOS**

Figura 1: Geometría parametrizada del sistema en análisis.

Figura 2: Ampliación de la geometría del sistema en análisis.

20

Figura 3: Vista tridimensional del sistema en análisis

Figura 3: Líneas de corriente para  $Re_i = 30$  y  $\alpha = 0^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ .

Figura 4: Líneas de corriente para  $Re_i = 30$  y  $\alpha = 45^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ .

25

Figura 5: Isocontornos de fracción másica para  $Re_i = 30$  y  $\alpha = 0^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ . En (e) se muestra la barra de colores para la fracción másica.

Figura 6: Isocontornos de fracción másica para  $Re_i = 30$  y  $\alpha = 45^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; and (d)  $I = 1/1.5$ . Para la barra de colores ver Fig. 6(e).

30

Figura 7: Eficiencia de la mezcla a la salida del canal vs. la relación de intensidades para  $Re_i = 30$  y los ángulos de inyección indicados.

Figura 8: Potencia de entrada vs. la relación de intensidades para  $Re_i = 30$  y los ángulos de inyección indicados..

Figura 9: Líneas de corriente para  $Re_i = 70$  y  $\alpha = 0^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ .

35

Figura 10: Líneas de corriente para  $Re_i = 70$  y  $\alpha = 45^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ .

Figura 11: Isocontornos de fracción másica para  $Re_i = 70$  y  $\alpha = 0^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ . Para la barra de colores ver Fig. 6(e).

5 Figura 12: : Isocontornos de fracción másica para  $Re_i = 70$  y  $\alpha = 45^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ . Para la barra de colores ver Fig. 6(e).

Figura 13: Eficiencia de la mezcla a la salida del canal vs. la relación de intensidades para  $Re_i = 70$  y los ángulos de inyección indicados.

Figura 14: Potencia de entrada vs. la relación de intensidades para  $Re_i = 70$  y los  
10 ángulos de inyección indicados.

Figura 15: Líneas de corriente para  $Re_i = 100$  y  $\alpha = 0^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ .

Figura 16: Líneas de corriente para  $Re_i = 100$  y  $\alpha = 45^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ .

15 Figura 17: Isocontornos de fracción másica para  $Re_i = 100$  y  $\alpha = 0^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ . Para la barra de colores ver Fig. 6(e).

Figura 18: Isocontornos de fracción másica para  $Re_i = 100$  y  $\alpha = 45^\circ$ : (a)  $I = 1/10$ ; (b)  $I = 1/5$ ; (c)  $I = 1/2.5$ ; y (d)  $I = 1/1.5$ . Para la barra de colores ver Fig. 6(e).

Figure 19: Eficiencia de la mezcla a la salida del canal vs. la relación de intensidades  
20 para  $Re_i = 100$  y los ángulos de inyección indicados.

Figure 20: Potencia de entrada versus la relación de intensidades para  $Re_i = 100$  y los ángulos de inyección indicados.

Figure 21: Comparación de la eficiencia de la mezcla versus la relación de intensidades para todas las configuraciones estudiadas.

25 Figure 22: Comparación de la potencia de entrada versus la relación de intensidades para todas las configuraciones estudiadas.

**Nomenclatura usada en las ecuaciones, figuras y tablas:**

	$C_0$	Concentración molar de soluto a la entrada del canal [mol/m <sup>3</sup> ].
30	$C_D$	Coefficiente de arrastre [-]
	$C_L$	Coefficiente de sustentación [-]
	$D$	Coefficiente de difusión másica [m <sup>2</sup> /s].
	$F_x$	Fuerza longitudinal, horizontal [N/m]
	$F_y$	Fuerza transversal, vertical [N/m]
35	$H$	Ancho del canal [m].

	$I$	Relación de intensidades del chorro [-].
	$L$	Longitud del canal [m].
	$n$	Número de nodos en la salida del canal.
	$p$	Presión [-].
5	$P$	Potencia de entrada [-].
	$Pe$	Número de Péclet [-].
	$\bar{P}_i$	Presión estática media en la entrada del canal [-].
	$\bar{P}_j$	Presión estática media en los chorros inyectados [-].
	$q_i$	Flujo másico en la entrada del canal [-].
10	$q_j$	Flujo másico de los chorros inyectados [-].
	$Re_i$	Número de Reynolds a la entrada del canal.
	$Re_j$	Número de Reynolds de los chorros inyectados.
	$Sc$	Número de Schmidt.
	$St$	Número de Strouhal.
15	$t$	Tiempo [-].
	$U_i$	Velocidad media en la entrada del canal [m/s].
	$U_j$	Velocidad media en los chorros de inyección [m/s].
	$\vec{v}$	Vector de velocidad [-].
	$W$	Lado del inyector interior de base cuadrada [m].
20	$W_j$	Ancho del chorro de inyección [m].
	$Y$	Fracción másica de un fluido [-].
	$Y_k$	Fracción de masa en la k-ésima celda de la malla [-].
	$\bar{Y}$	Fracción de masa media en la salida [-].
	$\eta$	Eficiencia de mezclado [%].
25	$\rho$	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ].
	$\sigma$	Desviación estándar de la fracción de masa de uno de los fluidos [-].
	$\sigma_{\max}$	Desviación estándar máxima en el sistema [-].
	$\nu$	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s].

### 30 DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL INVENTO

En esta sección, se describe un estudio numérico que evalúa la eficiencia de mezcla de un micromezclador pasivo de acuerdo con la invención, basado en los mecanismos de soplado y emisión de vórtices, que se utilizan para producir un flujo irregular aguas abajo. El sistema en estudio consiste en un microcanal recto con un inyector con base

cuadrada centrado a través del canal, aunque se puede observar desprendimiento de vórtices con cuerpos descentrados (Martin y Velázquez, 2011). Primero, el fluido principal fluye a través del microcanal desde la entrada principal hasta la salida, mientras que el segundo fluido se inyecta a través del inyector a través de dos ranuras ubicadas en la cara del inyector enfrentada a la dirección del flujo principal, formando dos pequeños chorros en las esquinas aguas arriba. El flujo a lo largo del microdispositivo se ha considerado no estacionario y laminar, además la mezcla tiene lugar a números altos de Péclet y Schmidt, en 2D, aunque es válida para escenarios 3D. En particular, según Reyes et al. 2013, nuestro escenario 2D es similar a los 3D con profundidades del canal  $\geq 10$  veces el ancho del inyector. Para diferentes valores del número de Reynolds, ratio de intensidad entre chorros/flujo principal y ángulo de inyección del chorro, se han realizado varias simulaciones numéricas utilizando el software ANSYS-Fluent para modelar diferentes combinaciones de los parámetros de control para caracterizar tanto la eficiencia de mezcla como la entrada más baja para hacer que los fluidos fluyan; en concreto, se han estudiado tres números de Reynolds diferentes ( $Re_i = 30, 70$  and  $100$ ), cinco diferentes ratios de intensidad de chorro ( $I = 0, 1/10, 1/5, 1/2.5$  and  $1/1.5$ ) y dos ángulos de inyección diferentes ( $\alpha = 0^\circ$  and  $45^\circ$ ).

El objetivo principal era determinar los valores de los parámetros de control que proporcionan la mayor eficiencia de mezcla a la salida del canal y la potencia de entrada requerida para hacer que ambos fluidos fluyan y se mezclen. La configuración óptima se ha encontrado para los valores más altos del número de Reynolds, las relaciones de intensidad más bajas y los ángulos de inyección más altos tenidos en cuenta. Gracias al desprendimiento de vórtices y las correspondientes oscilaciones aguas abajo, se puede alcanzar una eficiencia de mezcla de alrededor del 90%.

De todos modos, lo que se describe en este documento para el dispositivo micrométrico objeto de la invención también es aplicable a dispositivos de mayor escala, aunque estos dispositivos no micrométricos requerirán su propia optimización en términos de geometrías, dimensiones y flujos, como también lo serán las diferentes aplicaciones requeridas por el mismo dispositivo, micrométrico o no, o según las prioridades que se establezcan (número de Reynolds, eficiencia, geometría, dimensiones, intensidad de flujo, ...). Por ejemplo, la dispersión de vórtices para diferentes valores numéricos de Reynolds puede depender de la relación altura / profundidad de los canales (Martin y Velázquez, 2011). Las realizaciones descritas aquí evidencian que las opciones propuestas aquí son solo una muestra de las muchas opciones posibles.

## Geometría y ecuaciones de gobierno

Este estudio numérico se centra en el análisis de la eficiencia de un dispositivo micromezclador pasivo bidimensional, destinado a provocar la mezcla más alta entre dos fluidos interactuantes. Brevemente, el dispositivo consiste en un canal recto, de ancho  $H$  metros y  $L$  metros de largo, con un inyector interno fijo de base cuadrada de lado  $W$  ubicado a una distancia fija de la entrada. Uno de los fluidos (denominado como fluido 1 en lo que sigue) a mezclarse entra al dispositivo a través de la sección de entrada principal (con velocidad media  $U_i$ ) mientras que el otro (llamado en lo sucesivo fluido 2) se inyecta en dirección aguas arriba mediante dos chorros pequeños (de altura  $W_j$  y velocidad media  $U_j$ ) desde ambas esquinas de la cara del inyector situada a contracorriente del flujo principal y con un cierto ángulo conocido. Como mostraremos, para ciertos valores de los parámetros de gobierno, aparece una dispersión de vórtices desde el cilindro y se supone que la estela oscilatoria corriente abajo aumenta la interacción y el contacto entre los fluidos y, por lo tanto, aumenta la eficiencia de la mezcla.

El problema que se abordará en este estudio se rige, por una parte, por las ecuaciones de continuidad y Navier-Stokes, que contemplan los principios físicos que describen el movimiento de un fluido incompresible newtoniano y, por otra parte, por la ecuación de convección-difusión de la conservación de la fracción másica. La ecuación de conservación de energía no se tiene en cuenta, ya que se supone que todo el dominio está a la misma temperatura, por lo que no hay contribuciones de calor y la fricción no disipa energía. Estas tres ecuaciones gobernantes, en su forma adimensional, se pueden escribir como

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla p + \frac{1}{Re_i} \nabla^2 \vec{v}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla Y = \frac{1}{Pe} \nabla^2 Y, \quad (3)$$

donde  $\vec{v}$  es el vector de velocidad,  $t$  es el tiempo,  $p$  la presión,  $Y$  la fracción másica de soluto,  $Re_i = U_i W / \nu$  es el número de Reynolds,  $Pe = U_i W / D$  es el número de Péclet, con  $\nu$  y  $D$  la viscosidad cinemática y el coeficiente de difusión de masa del fluido, respectivamente ( $\rho$  sería la densidad del fluido). El flujo tendrá lugar a números bajos de Reynolds y altos de Péclet, lo que implica que el dispositivo debe ser muy largo para

una buena mezcla basada en la difusión. Esta es una limitación práctica en los chips de microfluidos, que pueden resolverse mediante la producción del desprendimiento de vórtices. Además, el número de Péclet se puede escribir como  $Pe = Re_i Sc$ , donde  $Sc$  es el número de Schmidt definido como  $Sc = \nu/D$ . Mientras los números  $Pe$  y  $Re_i$  dependen

5 tanto de las propiedades del fluido como de las dimensiones de la geometría,  $Sc$  es solo dependiente de la relación entre dos mecanismos de difusión molecular: de cantidad de movimiento y de masa. Si las propiedades del fluido son constantes,  $Sc$  también será constante incluso si cambian las condiciones de contorno o las dimensiones de la geometría, mientras  $Re_i$  y  $Pe$  cambiarán. Por esa razón, los parámetros de control que

10 hemos utilizado son los números de Reynolds y Schmidt, y no el número de Péclet. Para obtener la forma adimensional de las ecuaciones gobernantes (1)-(3), se ha utilizado  $U_i$ ,  $W$ ,  $U_i/W$ ,  $\rho U_i^2$  como velocidad, longitud, tiempo y presión características, respectivamente, y  $C_0$  concentración molar del soluto.

15 En la Fig. 1 se muestra un esquema de la geometría en estudio, mientras que en la Fig. 2 se incluye una vista detallada de la región en sentido ascendente, y en la Fig. 3 se representa una perspectiva tridimensional. En términos de la longitud característica  $W$ , consiste en un canal de longitud  $L = 19W$  y altura  $H = 2W$ , que representa una relación de bloqueo del canal de  $W/H = 0.5$ , es decir, del 50%, con el inyector de base cuadrada

20 situado a  $5W$  aguas abajo de la entrada. En la entrada del canal, uno de los fluidos ingresa con un perfil de velocidad parabólica completamente desarrollado (con velocidad media  $U_i$ ) mientras que el fluido inyectado desde el inyector tiene un perfil de velocidad uniforme (con velocidad media  $U_j$ ), siendo  $W_j = W/10$  el ancho de los chorros inyectados. De esta manera, ambos fluidos se mezclarán corriente abajo del canal: bien

25 con una estela estacionaria y simétrica corriente abajo del inyector, lo que implica que la mezcla será muy pobre; mientras que, si la estela es oscilatoria, gracias a los vórtices que se desprenden del inyector, el mezclado aumentará de forma notable, como se mostrará más adelante.

30 En este estudio, ambos fluidos son el mismo líquido, específicamente agua líquida y, por lo tanto, tienen propiedades idénticas de densidad ( $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ), viscosidad dinámica ( $\mu = 10^{-3} \text{ kg/m-s}$ ), viscosidad cinemática ( $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) y coeficiente de difusión de masa ( $D = 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ), pero teniendo diferente concentración molar de soluto en las entradas correspondientes. Estos valores dan un número de Schmidt

35 constante de  $Sc = 10^4$ , mientras que el número de Reynolds dependerá de la velocidad

promedio de entrada utilizada  $U_i$ . En particular, se han utilizado tres valores diferentes del número de Reynolds:  $Re_i = 30, 70$  y  $100$ . Por otro lado, la velocidad media de los dos chorros se ha seleccionado al dar valores a la relación de intensidad  $I$  definida como

$$5 \quad I = \frac{Re_j}{Re_i},$$

donde  $Re_j$  es el número de Reynolds del jets  $j$ -ésimo, definido como  $Re_j = U_j W_j / \nu$ .

Se han utilizado cinco relaciones de intensidad diferentes:  $I = 0, 1/10, 1/5, 1/2.5$  y  $1/1.5$ .

10 Otro parámetro relacionado con los chorros de inyección es el ángulo de inyección  $\alpha$ . Es el ángulo que establece la dirección en la que se inyectan los chorros. Su valor se mide desde la horizontal hacia las paredes del canal. También ha sido variada y se han estudiado dos valores diferentes.:  $\alpha = 0^\circ$  and  $45^\circ$ .

15 Existen diferentes magnitudes que nos permiten evaluar la calidad de la mezcla en la salida del microdispositivo. El principal es la desviación estándar de la fracción de masa de uno de los fluidos. ( $\sigma$ ) a la salida del dispositivo. Es una medida de la bondad de la mezcla y se define como

$$20 \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y})^2}{n}}, \quad (7)$$

donde  $k$  es el contador de celdas de discretización a lo largo del ancho en la salida del dispositivo, donde hay  $n$  de ellas.

25 De esta manera, la desviación estándar en la salida del canal puede tomar valores entre cero y la mitad, es decir,  $0 \leq \sigma \leq 0.5$ , con la mezcla perfecta correspondiente a  $\sigma = 0$  y no se produce ninguna mezcla en absoluto cuando  $\sigma = 0.5$ .

30 Una vez que se mide el valor de desviación estándar en la salida, puede ayudar a calcular la eficiencia de mezcla de acuerdo con (Sarkar et al., 2014)

$$\eta = \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}\right) \cdot 100, \quad (8)$$

Donde  $\sigma_{\max}$  es la desviación máxima de la fracción de masa medida en las tres entradas de geometría. Además, la eficiencia de mezcla definida en (8) puede alcanzar valores entre 0%, si la mezcla es inexistente, y 100%, si la mezcla es plena y totalmente homogénea, es decir,  $0\% \leq \eta \leq 100\%$ .

5

Además de la desviación estándar y la eficiencia de mezcla en la salida del dispositivo, es interesante conocer la potencia de entrada ( $P$ ) consumida por el sistema para lograr la mezcla correspondiente. En ese sentido, se desean altas eficiencias de mezcla con bajas potencias de entrada. Para evaluar la potencia de entrada total, hay que tener en

10 cuenta no solo la potencia para generar la corriente principal, sino también la potencia de entrada para inyectar los dos chorros pequeños desde el cuadrado interior. Esta potencia de entrada se puede calcular de acuerdo con la expresión

$$P = \bar{P}_i \cdot q_i + 2 \cdot \bar{P}_j \cdot q_j, \quad (9)$$

15

donde  $\bar{P}$  y  $q$  son la presión promediada en el tiempo adimensional y el caudal másico, respectivamente, en la entrada del canal (subíndice  $i$ ) y cada entrada de chorro de inyección (subíndice  $j$ ).

20 Tanto  $\eta$  como  $P$  nos ayudarán a encontrar la mejor configuración del dispositivo para obtener la mayor eficiencia o la menor potencia de entrada.

Además de estos parámetros de mezcla, también se calcularán y mostrarán dos conceptos aerodinámicos al analizar los resultados. Son el coeficiente de arrastre  $C_D$  y

25 de sustentación  $C_L$  del inyector de base cuadrada. También nos ayudarán a validar la metodología seguida comparando los resultados obtenidos con los resultados publicados en la literatura. Ambos coeficientes se definen como

$$C_D = \frac{F_x}{\rho U_i^2 W} \text{ y } C_L = \frac{F_y}{\rho U_i^2 W}, \quad (10)$$

30

donde  $F_x$  y  $F_y$  Son las fuerzas horizontales y verticales, respectivamente.

### Métodos numéricos

El conjunto de ecuaciones adimensionales (1) - (3) con las condiciones de contorno correspondientes (ver a continuación) se resolvieron numéricamente utilizando el software comercial ANSYS-Fluent © por medio de la formulación basada en presión con el acoplamiento presión-velocidad mediante el método 'Acoplado', que resuelve las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento simultáneamente. Con respecto a la discretización espacial, la ecuación de presión se resolvió mediante el método 'Second Order', mientras que las ecuaciones del momento y de la fracción másica se resolvieron mediante el método 'Second Order Upwind'.

## 10 **Condiciones de contorno**

Se han impuesto las siguientes condiciones de contorno:

- Las paredes del canal y la pared exterior del inyector se han considerado como paredes estacionarias sin deslizamiento;
- 15 • En la entrada del canal, se ha impuesto un perfil de velocidad parabólico completamente desarrollado con velocidad promedio  $U_i$ ;
- Los chorros desde el inyector se han impuesto con un perfil de velocidad constante  $U_j$  descomponiéndolo en sus componentes horizontal y vertical en función del ángulo de inyección.
- 20 • En la salida del canal se ha impuesto una presión manométrica cero.

## **Validación**

La metodología seguida para obtener los resultados actuales se ha validado previamente mediante la reproducción de resultados anteriores de diferentes autores (Sharma y Eswaran, 2004; Suzuki et al, 1993; Ortega-Casanova, 2017).

## **Resultados**

### 30 Resultados para $Re_i = 30$

En la Tabla 1 se resumen las diferentes combinaciones de parámetros de entrada y los valores alcanzados por las magnitudes de salida principales para todos los casos en los que el número de Reynolds del flujo en la entrada del canal es  $Re_i = 30$ .

35

Configuración	Respuesta temporal	$C_D$	$C_L$	$\eta$ [%]	$P[-]$
$I = 0$	Estacionario	15.537	0	-	15.8160
$I = 1/10, \alpha = 0^\circ$	Estacionario	17.628	0	51.7142	20.1528
$I = 1/10, \alpha = 45^\circ$	Estacionario	16.906	0	61.4386	19.2913
$I = 1/5, \alpha = 0^\circ$	Estacionario	19.929	0	31.0003	25.4042
$I = 1/5, \alpha = 45^\circ$	Estacionario	18.313	0	42.0019	23.4950
$I = 1/2.5, \alpha = 0^\circ$	Estacionario	25.492	0	10.1805	38.4509
$I = 1/2.5, \alpha = 45^\circ$	Estacionario	21.300	0	21.2647	33.8834
$I = 1/1.5, \alpha = 0^\circ$	Estacionario	35.985	0	1.9983	62.0134
$I = 1/1.5, \alpha = 45^\circ$	Estacionario	26.393	0	7.7809	53.4216

Tabla 1: Resumen de los resultados para  $Re_i = 30$ .

Como puede verse, en este número más bajo de Reynolds, para todas las configuraciones analizadas, se alcanza un régimen de estado estable. En particular, cuando  $I = 0$  y el fluido 2 no se está inyectando, los resultados están de acuerdo con Sharma y Eswaran (2004), donde también se encontró un estado estacionario para un número de Reynolds por debajo de  $\sim 60$  con una geometría similar. Por lo tanto, siempre que  $Re_i = 30$ , la respuesta del flujo a la salida del canal también es estacionaria en el tiempo, independientemente de la relación de intensidad, siendo simétrico el patrón de la estela en la geometría, como se puede ver en Fig. 4 and Fig. 5, donde se representan las líneas de corriente para ángulos de inyección de 0 and  $45^\circ$ , respectivamente, y todas las relaciones de intensidad. Debido a la simetría del flujo, el coeficiente de sustentación es nulo y no se observa la formación de vórtices desde el inyector: a una corta distancia corriente abajo del inyector, las líneas de flujo son paralelas y horizontales. Para un ángulo de inyección constante, el coeficiente de arrastre aumenta cuando  $I$  aumenta porque el gasto por encima y por debajo del inyector también aumenta, lo que hace que la fricción aumente y del mismo modo lo haga el coeficiente de arrastre. Además, para una relación de intensidad constante, el coeficiente de arrastre disminuye cuando el ángulo de inyección aumenta de 0 to  $45^\circ$  porque en el ángulo de inyección más alto, el fluido es forzado a fluir más lejos de la superficie del inyector en comparación con un ángulo nulo, lo que reduce la fricción y, por lo tanto, el coeficiente de arrastre. Respecto al proceso de mezcla en este número más bajo de Reynolds, la Fig. 6 y Fig. 7 representan los isocontornos de fracción másica para ángulos de inyección de 0 y  $45^\circ$ , respectivamente. Como puede verse nuevamente, el patrón de fracción másica aguas abajo es estable con una baja interacción entre el fluido 1 y el fluido 2 a medida que

fluyen a lo largo del dispositivo. Esto es consecuencia de la falta de desprendimiento de vórtices desde el cuadrado interno, lo que muestra claramente que la eficiencia de mezcla es relativamente baja en este número más bajo de Reynolds. Además, Fig. 8 muestra la evolución de la eficiencia de mezcla a medida que cambia la relación de intensidad. Conforme disminuye la relación de intensidad, la eficiencia aumenta, independientemente del ángulo de inyección, debido al hecho de que hay menos cantidad de fluido 2 siendo inyectado. También se puede ver en la Fig. 8 que la eficiencia alcanza mejores resultados para configuraciones con ángulos de inyección de  $45^\circ$ . A pesar de eso, la mayor eficiencia de mezcla es del 62%, que es relativamente baja y se obtiene cuando  $I = 1/10$  y  $\alpha = 45^\circ$ .

A partir de las líneas de corriente mostradas en la Fig. 3 y la Fig. 4, independientemente del ángulo de inyección, se puede observar otra característica interesante del flujo en este número de Reynolds: la longitud de la estela justo aguas abajo del dispositivo aumenta cuando lo hace la relación de intensidad. Esto se debe al hecho de que las velocidades locales superiores e inferiores al final del cuadrado aumentan cuando  $I$  aumenta. Como consecuencia, la inercia del fluido que sale del cuadrado aumenta y también lo hace la longitud de la estela. Sharma y Eswaran (2004) observaron un comportamiento similar, con el aumento de la burbuja de recirculación, para una relación de bloqueo similar cuando el número de Reynolds aumenta de 100 a 150.

Para concluir, la Fig. 9 muestra cómo  $P$  evoluciona en función de  $I$  para ambos ángulos de inyección. Como se puede ver, cuando  $I$  aumenta, la potencia de entrada también aumenta debido a la combinación de dos efectos: por un lado, se inyecta más fluido a través de los chorros, lo cual necesita más potencia; y, por otro lado, para mantener constante el flujo de masa de la entrada para el número de Reynolds correspondiente, se necesita más potencia para superar los chorros del cuadrado central, que aumenta con  $I$ . Con respecto al ángulo de inyección, la potencia de entrada cuando  $\alpha = 0^\circ$  es mayor debido a que el fluido 2 se está inyectando perpendicularmente a la dirección del fluido 1, lo que requiere mayor potencia para arrastrarlo aguas abajo que en el caso de  $\alpha = 45^\circ$ , en el que el ángulo de inyección del fluido 2 facilita el hecho de ser arrastrado aguas abajo por el fluido 1, es decir, con menos potencia de entrada.

#### Resultados para $Re_i = 70$

35

En la Tabla 2 se resumen las principales magnitudes de salida alcanzadas para los casos con  $Re_i = 70$ . De acuerdo con Sharma y Eswaran (2004), para la relación de bloqueo estudiada y el número de Reynolds, el flujo cuando  $I = 0$ , es decir, sin inyectar el fluido 2, debe ser oscilatorio con vórtices que se desprenden desde el cuadrado interior y con propiedades del fluido variables en el tiempo. En efecto, como puede verse en la Tabla 2, cuando  $I = 0$  todas las propiedades son oscilatorias, con valores de parámetros máximos y mínimos indicados entre paréntesis y en negrita su valor promediado en el tiempo. Además, el coeficiente de arrastre obtenido numéricamente cuando  $I = 0$  y  $Re_i = 70$ ,  $C_D \cong 9.5$ , se encuentra entre los valores dados por Sharma y Eswaran (2004) para  $Re_i = 150$ , con  $C_D \cong 8$ , y  $Re_i = 100$ , con  $C_D \cong 13.3$ .

En este número de Reynolds, todas las configuraciones han logrado respuestas oscilatorias en el tiempo, excepto el caso con  $I = 1/1.5$  y  $\alpha = 0^\circ$  que se explicará más adelante. Este comportamiento oscilatorio se debe al desprendimiento de vórtices que promueve una estela oscilatoria aguas abajo del cuadrado interno, como muestran las líneas de corriente representadas en la Fig. 10 y la Fig. 11 para  $\alpha = 0^\circ$  y  $45^\circ$ , respectivamente (cuando el flujo es oscilatorio los contornos mostrados de aquí en adelante corresponderán a un instante de tiempo una vez que la estela haya alcanzado un comportamiento periódico y repetitivo). Sin embargo, cuando  $\alpha = 0^\circ$  y la relación de intensidad aumenta, hay un valor crítico de  $I$  por encima del cual el flujo eventualmente se hace estacionario, como los valores constantes del coeficiente y las líneas de flujo, Fig. 10 (d), revelan, con una estela asimétrica aguas abajo del cuadrado. Rafferty y Kaminsky (2014) también observaron previamente esta transición, desde soluciones oscilatorias hasta soluciones estables, en una configuración bastante similar a la que aquí se estudia, cuando aumenta el número de Reynolds. Por otro lado, la transición a una solución estable no se observa cuando  $\alpha = 45^\circ$ , lo que significa que la relación de intensidad crítica es mayor que cuando  $\alpha = 0^\circ$  y, por lo tanto, depende del ángulo de inyección. Con respecto a los coeficientes aerodinámicos  $C_D$  y  $C_L$ , ambos muestran un comportamiento oscilatorio, excepto en el caso estacionario, aumentando  $C_D$  con el incremento de la relación de intensidad, como ocurría cuando  $Re_i = 30$ , y siendo el coeficiente de arrastre menor cuando  $\alpha = 45^\circ$  que cuando  $\alpha = 0^\circ$ , como también sucedía cuando  $Re_i = 30$ , mientras que, como se puede ver, el valor promedio en el tiempo de  $C_L$  siempre está cerca de cero, excepto en el caso constante, para el cual es positivo, como se podría esperar del patrón de línea de corriente asimétrica, ver Fig. 10 (d).

Cuando tiene lugar el desprendimiento de vórtice, se puede aumentar la eficiencia de la mezcla gracias a las oscilaciones de la estela aguas abajo del cuadrado. Como consecuencia de esta agitación, el contacto de la superficie entre el fluido 1 y el fluido 2 aumenta y, en consecuencia, se supone que también aumenta la eficiencia de la mezcla.

- 5 Los isocontornos de las fracciones másicas del fluido se pueden ver para todas las relaciones de intensidad en la Fig. 12, para  $\alpha = 0^\circ$ , y en la Fig. 13, para  $\alpha = 45^\circ$ . Excepto en el caso estacionario, Fig. 12 (d), todos los demás contornos muestran claramente como el desprendimiento de vórtices ayuda a aumentar la interacción entre los fluidos a mezclar.

10

Configuración	Respuesta	$C_D$	$C_L$	$\eta$ [%]	$P$ [-]
$I = 0$	Oscilatoria	[9.4846, 9.4848] <b>9.4847</b>	[-0.0426, 0.0418] <b>0.0</b>	-	8.6044
$I = 1/10, \alpha = 0^\circ$	Oscilatoria	[11.1922, 11.1944] <b>11.1933</b>	[-0.2317, 0.2317] <b>0.0</b>	78.5130	11.3608
$I = 1/10, \alpha = 45^\circ$	Oscilatoria	[10.5982, 10.6000] <b>10.5991</b>	[-0.2021, 0.2021] <b>0.0</b>	83.4833	10.7600
$I = 1/5, \alpha = 0^\circ$	Oscilatoria	[13.3997, 13.4034] <b>13.4015</b>	[-0.3352, 0.3352] <b>0.0</b>	60.7028	14.9376
$I = 1/5, \alpha = 45^\circ$	Oscilatoria	[11.8751, 11.8780] <b>11.8766</b>	[-0.2836, 0.2836] <b>0.0</b>	70.5645	13.4281
$I = 1/2.5, \alpha = 0^\circ$	Oscilatoria	[19.7453, 19.7504] <b>19.7478</b>	[-0.4863, 0.4863] <b>0.0122</b>	47.8896	25.2599
$I = 1/2.5, \alpha = 45^\circ$	Oscilatoria	[15.1965, 15.1988] <b>15.1972</b>	[-0.4058, 0.4058] <b>0.0</b>	52.2680	21.0351

$I = 1/1.5, \alpha = 0^\circ$	Estacionaria	<b>37.2807</b>	<b>0.1629</b>	3.2660	50.8525
$I = 1/1.5, \alpha = 45^\circ$	Oscilatoria	[24.2617, 24.2628] <b>24.2622</b>	[-0.2348, 0.2348] <b>0.0</b>	11.0126	39.5701

Tabla 2: Resumen de los resultados cuando  $Re_i = 70$ . Entre corchetes el mínimo y el máximo valor de la evolución temporal de la correspondiente propiedad y en negrita el valor medio en el tiempo.

5 El efecto de desprendimiento de vórtices en la eficiencia de mezcla se puede ver en la Fig. 14 donde se representa en función de la relación de intensidad para los diferentes ángulos de inyección. Como se puede ver, la eficiencia es un poco mayor cuando  $\alpha = 45^\circ$  y disminuye cuando la relación de intensidad aumenta, correspondiendo la eficiencia más baja a la configuración estacionaria con  $\alpha = 0^\circ$  e  $I = 1/1.5$ . Como se  
10 comentó anteriormente, el aumento de la relación de intensidad tiende a suprimir las oscilaciones del flujo aguas abajo, volviéndose independiente del tiempo por encima de una relación de intensidad crítica. Como consecuencia, el aumento de la relación de intensidad da como resultado una disminución de la eficiencia de la mezcla, ya que el desprendimiento de vórtices también disminuye hasta que desaparece para la  
15 configuración estacionaria. Debido a este comportamiento, la eficiencia más alta corresponde a la relación de intensidad más baja, ya que apenas afecta al desprendimiento de vórtices. Esto, junto con la pequeña cantidad de fluido 2 que se inyecta, hace que esas configuraciones, independientemente del ángulo de inyección, sean las mejores desde el punto de vista de la mezcla, con eficiencias de alrededor del  
20 80%, ver Fig. 12 (a) y Fig. 13 (a).

Respecto a la potencia de entrada, la Fig. 15 muestra la cantidad de potencia de entrada que necesita cada configuración. Como puede verse, aumenta a medida que incrementa la relación de intensidad, independientemente del ángulo de inyección, siendo siempre,  
25 y por las mismas razones que cuando  $Re_i = 30$ , mayor la potencia necesaria cuando  $\alpha = 0^\circ$ .

#### Resultados para $Re_i = 100$

30 En este número más alto de Reynolds, se ha observado un comportamiento similar al anterior más bajo. Un resumen de todos los parámetros de salida se puede ver en la Tabla 3, donde se puede observar que las relaciones de intensidad más altas están por

encima de un valor crítico y se alcanzan soluciones estacionarias, sin desprendimiento de vórtices, no solo para  $\alpha = 0^\circ$ , como cuando  $Re_i = 70$ , sino también para  $\alpha = 45^\circ$ . Brevemente, con respecto a los coeficientes aerodinámicos, el coeficiente de resistencia incrementa con el aumento de la relación de intensidad y siempre es mayor con  $\alpha = 0^\circ$  que con  $\alpha = 45^\circ$  debido a las razones explicadas anteriormente, mientras que el coeficiente de sustentación siempre tiene una media nula, excepto en aquellas configuraciones en las que se alcanza el estado estacionario para las cuales el valor medio puede ser nulo, si la estela es simétrica, o distinto de cero, si la estela es asimétrica.

10

Como se mencionó anteriormente, para relaciones de intensidad superiores a un valor crítico, el cual es diferente dependiendo del ángulo de inyección, el flujo es estacionario, como se puede ver en los valores aerodinámicos de la Tabla 3 y también en la Fig. 16, para  $\alpha = 0^\circ$ , y en la Fig.17, para  $\alpha = 45^\circ$ , donde se representan las líneas de corriente para todas las configuraciones. Como se puede ver, para  $\alpha = 0^\circ$  e  $I < 1/2.5$ , el flujo es oscilatorio, con desprendimiento de vórtices desde el cuadrado interior y, por lo tanto, la estela también es oscilatoria. Sin embargo, para  $I = 1/2.5$ , la estela es estacionaria y simétrica, mientras que para  $I = 1/1.5$  también es estable pero asimétrica. Esto significa que hay una nueva transición desde la estela simétrica a la asimétrica aguas abajo, dependiendo del valor de la relación de intensidad cuando  $I \geq 1/2.5$ . Por otro lado, para  $\alpha = 45^\circ$  e  $I < 1/1.5$ , el flujo es inestable y oscilatorio debido al desprendimiento de vórtices, mientras que para  $I = 1/1.5$  el flujo es estable y asimétrico. En este caso, la solución simétrica no se ha observado y se supone que ocurre para relaciones de intensidad entre  $1/2.5$  y  $1/1.5$ . Rafferty y Kaminsky (2014) observaron un comportamiento similar, también detectaron la transición de soluciones simétricas a asimétricas según el número de Reynolds del flujo.

15

25

Configuración	Respuesta	$C_D$ [-]:	$C_L$ [-]:	$\eta$ [%]	$P$ [-]
$I = 0$	Oscilatoria	[9.149, -9.155] <b>9.152</b>	[+0.3464, -0.3464] <b>0.002</b>	-	6.8643
$I = 1/10, \alpha = 0^\circ$	Oscilatoria	[9.9237, 9.9181] <b>9.9210</b>	[+0.3299, -0.3299] <b>0.0021</b>	84.1055	9.3782

$I = 1/10, \alpha = 45^\circ$	Oscilatoria	[9.2894, 9.2843] <b>9.2868</b>	[+0.3287, -0.3287] <b>-0.0079</b>	88.0739	8.7518
$I = 1/5, \alpha = 0^\circ$	Oscilatoria	[12.3386, 12.3333] <b>12.3359</b>	[+0.3295, -0.3295] <b>-0.0001</b>	71.2939	12.9950
$I = 1/5, \alpha = 45^\circ$	Oscilatoria	[10.6819, 10.6776] <b>10.6797</b>	[+0.3267, -0.3267] <b>-0.0021</b>	78.6613	11.3827
$I = 1/2.5, \alpha = 0^\circ$	Estacionaria	<b>20.6842</b>	<b>0.0009</b>	14.3847	24.3096
$I = 1/2.5, \alpha = 45^\circ$	Oscilatoria	[15.1016, 15.1003] <b>15.1010</b>	[+0.1929, -0.1929] <b>-0.0011</b>	57.8043	19.5093
$I = 1/1.5, \alpha = 0^\circ$	Estacionaria	<b>44.9811</b>	<b>0.3432</b>	17.1689	63.3281
$I = 1/1.5, \alpha = 45^\circ$	Estacionaria	<b>23.4357</b>	<b>-2.7848</b>	25.7768	37.8780

Tabla 3: Resumen de los resultados cuando  $Re_i = 100$ . Entre corchetes el mínimo y el máximo valor de la evolución temporal de la correspondiente propiedad y en negrita el valor medio en el tiempo.

5 Con respecto a la eficiencia de mezcla, la Fig. 18 y la Fig. 19 muestran, para  $\alpha = 0^\circ$  y  $45^\circ$ , respectivamente, los isocontornos de fracción másica para todas las relaciones de intensidad. Como se puede ver, en aquellas configuraciones con desprendimiento de vórtices, la alta interacción de fluidos da como resultado altos valores de eficiencia de mezcla, vea la Fig. 20, mientras que para aquellas configuraciones estacionarias se obtienen valores de eficiencia bajos de alrededor del 20%. Es notable que la peor eficiencia de mezcla de alrededor del 12% corresponde al caso con estela simétrica, vea la Fig. 18 (c), que también corresponde al caso con el menor tiempo de residencia, siendo mayor en aquellas configuraciones con estela asimétrica, en las que, gracias a la curvatura de la estela, el tiempo de residencia de los fluidos es un poco mayor.

15

Con respecto a la potencia de entrada para mezclar los fluidos, la Fig. 21 muestra su evolución en función de la relación de intensidad para ambos ángulos de inyección. El mismo comportamiento, y debido a las mismas razones que cuando  $Re_i = 30$ , se aplica

ahora: la potencia de entrada aumenta cuando la relación de intensidad incrementa, y es mayor cuando los chorros del fluido 2 se inyectan normalmente al fluido entrante, es decir cuando  $\alpha = 0^\circ$ , en vez de  $45^\circ$ .

## 5 Comparación de resultados

Una vez que se han analizado todos los casos, es posible comparar la eficiencia de mezcla, en la Fig. 22, y la potencia de entrada, en la Fig. 23, en función de la relación de intensidad. La tendencia de ambos parámetros es, en general, repetitiva, independientemente del número de Reynolds y el ángulo de inyección: la eficiencia de mezcla disminuye y la potencia de entrada aumenta cuando incrementa la relación de intensidad. Además, como regla general, independientemente de la relación de intensidad, los mejores resultados se obtienen para  $Re_i = 100$  y ángulos de inyección de  $\alpha = 45^\circ$ . En efecto, para cualquier valor de  $I$ , la eficiencia es siempre la más alta y la potencia de entrada la más baja cuando los dos parámetros de control son  $[Re_i = 100, \alpha = 45^\circ$ . Además, vale la pena decir que para valores dados de  $Re_i$  e  $I$ , la configuración con  $\alpha = 45^\circ$  es siempre ligeramente mejor que cuando  $\alpha = 0^\circ$ , con los que se consigue mayores eficiencias de mezcla y menores necesidades de potencia de entrada. Por el contrario, la configuración con  $Re_i = 30$  y  $\alpha = 0^\circ$  es, en general, la más desfavorable en términos de eficiencia de mezcla y potencia de entrada.

## **Conclusiones**

Respecto a la eficiencia de mezcla, se obtiene el valor más alto para el número de Reynolds más alto estudiado,  $Re_i = 100$ , la relación de intensidad más baja,  $I = 1/10$ , y un ángulo de inyección de  $\alpha = 45^\circ$ , para el cual se obtiene una eficiencia de mezcla de  $\sim 90\%$ , con una potencia de entrada adimensional necesaria de  $\sim 9$  unidades, mientras que la peor configuración ( $Re_i = 30, \alpha = 0^\circ$  e  $I = 1/1.5$ ) proporciona una eficiencia de solo  $\sim 2\%$ , con  $\sim 60$  unidades de potencia de entrada necesaria. Aparte de esto, los resultados han revelado información adicional interesante relacionada con la mezcla, que se discutirá a continuación.

Por un lado, se ha verificado que la eficiencia de mezcla aumenta cuando el número de Reynolds es mayor y disminuye cuando la relación de intensidad de los fluidos a mezclar incrementa. El último efecto tiende a hacer que el flujo sea estacionario y eliminar el desprendimiento de vórtices, lo que reduce la eficiencia de la mezcla. En general,

podríamos decir que cuanto mayor sea el número de Reynolds, mayor será la eficiencia de la mezcla, ya que los valores altos del número de Reynolds promueven el desprendimiento de vórtices, lo cual mejora la mezcla de ambos fluidos. Vale la pena señalar que, para los mismos números de Reynolds, pero en un canal completamente horizontal sin el cuadrado central, obtendríamos lo contrario: una mezcla muy pobre en los números de Reynolds altos porque el tiempo de residencia de los fluidos en el canal sería pequeño y, por lo tanto, el tiempo que tienen para mezclarse.

Por otro lado, también hemos demostrado que se alcanzan mayores eficiencias de mezcla cuando el recorrido seguido por los fluidos aguas abajo del dispositivo es más largo y, por lo tanto, hay más tiempo para que se produzca la difusión y la interacción del fluido. Esta es la razón por la que, al obtener soluciones estacionarias, es mejor obtener patrones de flujo asimétricos que simétricos. En el futuro, determinaremos las relaciones de intensidad crítica que proporcionan respuestas estacionarias u oscilatorias.

Con respecto a la potencia de entrada necesaria para lograr la mezcla correspondiente, se ha demostrado que la potencia aumenta con la relación de intensidad, consecuencia de la mayor presión necesaria tanto para inyectar una mayor relación de flujo másico del fluido 2 como para ser arrastrado por el fluido 1. Además, la potencia de entrada disminuye en aquellos casos en que el ángulo de inyección es  $\alpha = 45^\circ$ . Esto se debe al costo adicional de la corriente principal para redirigir los chorros desde el cuadrado central cuando  $\alpha = 0^\circ$ , ya que se inyectan normalmente al fluido entrante.

## 25 Bibliografía

- Capretto, L., Cheng, W., Hill, M., & Zhang, X. (2011). Micromixing within Microfluidic Devices. *Microfluidics*, 304, 27-68.
- Hossain, S., Husain, A., & Kim, K. Y. (2011). Optimization of micromixer with staggered herringbone grooves on top and bottom walls. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(4), 506-516.
- Hsiao, K. Y., Wu, C. Y., & Huang, Y. T. (2014). Fluid mixing in a microchannel with longitudinal vortex generators. *Chemical Engineering Journal*, 235, 27-36.
- Jain, M., Rao, A., & Nandakumar, K. (2013). Numerical study on shape optimization of groove micromixers. *Microfluidics and nanofluidics*, 15(5), 689-699.

- Kim, B. S., Kwak, B. S., Shin, S., Lee, S., Kim, K. M., Jung, H. I., & Cho, H. H. (2011). Optimization of microscale vortex generators in a microchannel using advanced response surface method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1), 118-125.
- 5 • Lee, C. Y., Chang, C. L., Wang, Y. N., & Fu, L. M. (2011) Microfluidic mixing: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(5), 3263-3287.
- Martin, E., & Velazquez, A. (2011). Effect of span length and temperature on the 3-D confined flow around a vortex promoter. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(6), 1173-1185.
- 10 • Nahum, A., & Seifert, A. (2006). On the application of confined twin-jet instability to micro-mixing enhancement. *Physics of Fluids*, 18(6), 064107.
- Ober, T.J., Foresti, D., & Lewis, J. A. (2015). Active mixing of complex fluids at the microscale. *PNAS*, 112, 40, 12293–12298
- Ortega-Casanova, J. (2017). On the onset of vortex shedding from 2D confined rectangular cylinders having different aspect ratios: Application to promote mixing fluids. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 120, 81-92.
- 15 • Parsa, M. K., & Hormozi, F. (2014). Experimental and CFD modeling of fluid mixing in sinusoidal microchannels with different phase shift between side walls. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24(6), 065018.
- 20 • Rafferty, I., & Kaminski, D. (2014). Non-dimensionalization and mixing quantification of laminar twin semi-confined jets. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 48, 15-23.
- Reyes, M., Velazquez, A., Martin, E., & Arias, J. R. (2013). Experimental study on the confined 3D laminar flow past a square prism with a high blockage ratio. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 44, 444-457.
- 25 • Sarkar, S., Singh, K. K., Shankar, V., & Shenoy, K. T. (2014). Numerical simulation of mixing at 1–1 and 1–2 microfluidic junctions. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 85, 227-240.
- Sharma A. & Eswaran, V. (2004). Heat and fluid flow across a square cylinder in the two-dimensional laminar flow regime, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 47, 79-107.
- 30 • Suzuki, H., Inoue, Y., Nishimura, T., Fukutani, K., & Suzuki, K. (1993). Unsteady flow in a channel obstructed by a square rod (crisscross motion of vortex). *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 14(1), 2-9.

- Tseng, L. Y., Yang, A. S., Lee, C. Y., & Hsieh, C. Y. (2011). CFD-based optimization of a diamond-obstacles inserted micromixer with boundary protrusions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(2), 210-222.

**REIVINDICACIONES**

1. Dispositivo micrométrico para mezclar fluidos en régimen de flujo laminar que comprende:

- 5        - al menos un canal configurado para acomodar un primer fluido que circula en una dirección a lo largo de cada canal,  
          - al menos un inyector alojado en el al menos un canal configurado para introducir un segundo fluido en el canal,

10       donde el primer fluido es un fluido incompresible que circula a través del al menos un canal con un flujo que asegura un régimen laminar, y el segundo fluido es también un fluido incompresible.

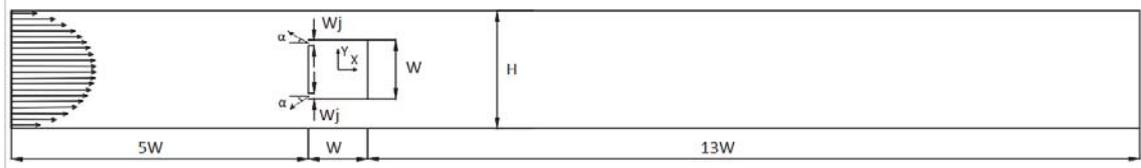


Figura 1

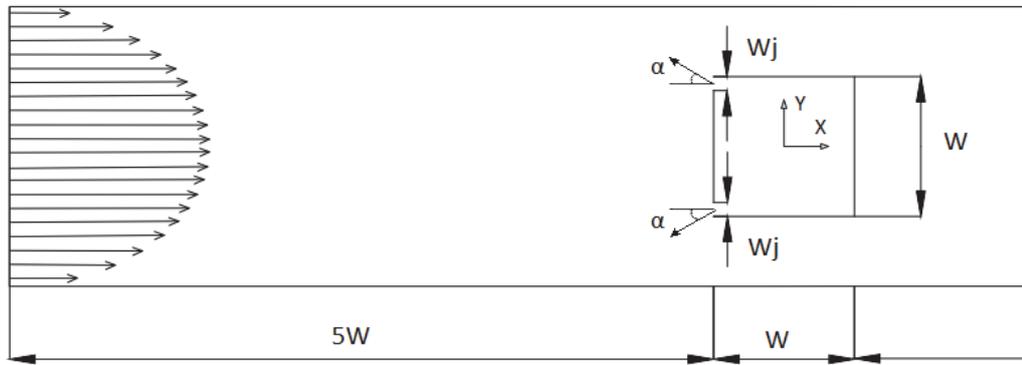


Figura 2

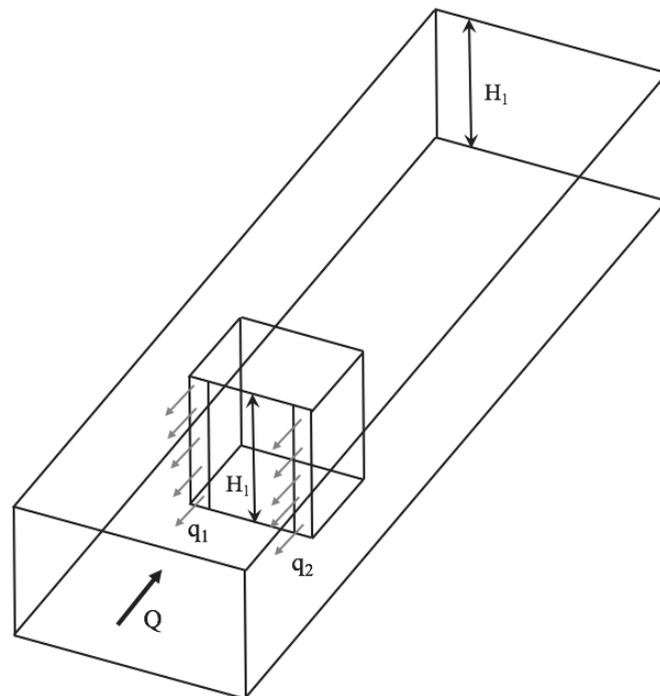


Figura 3

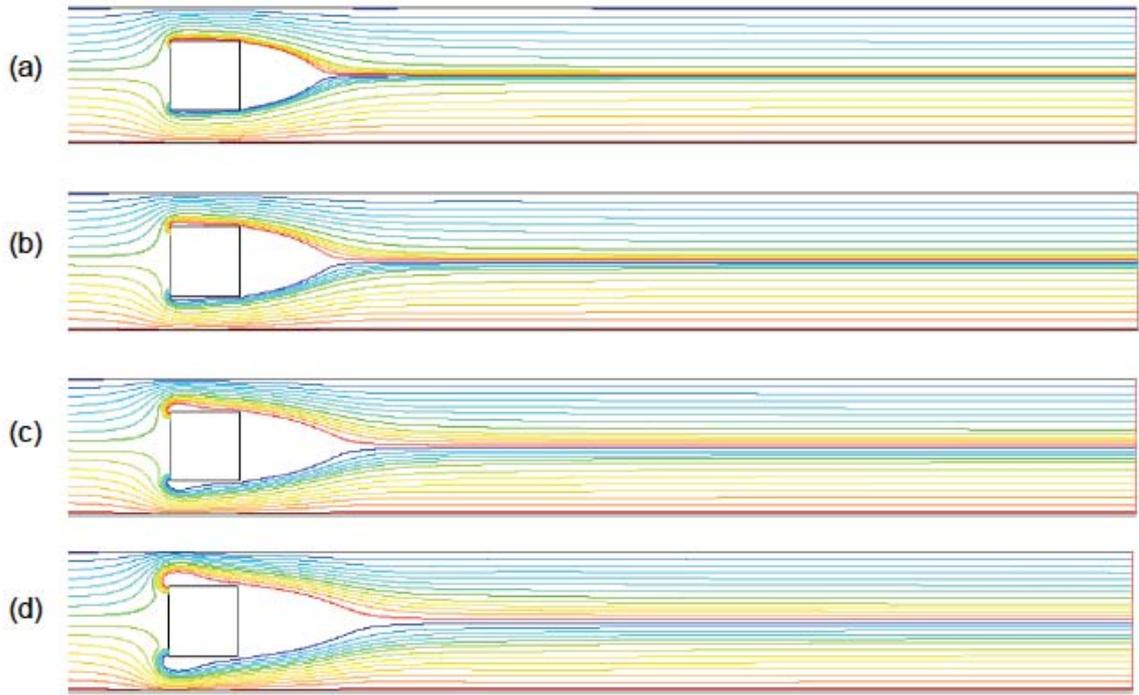


Figura 4

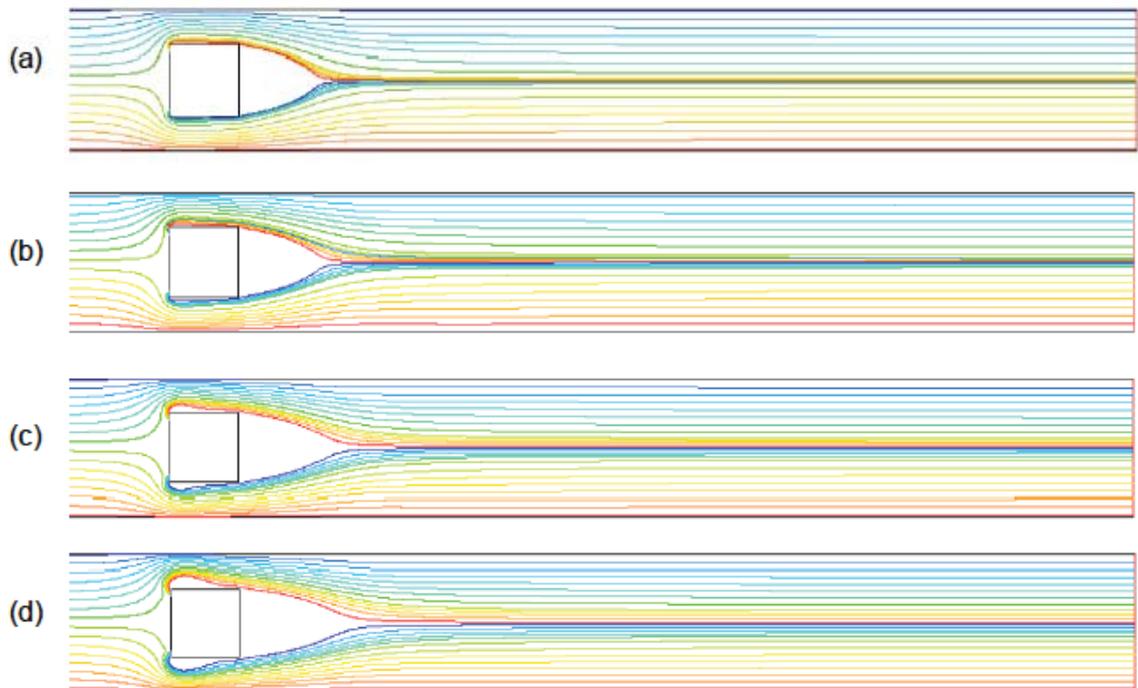


Figura 5

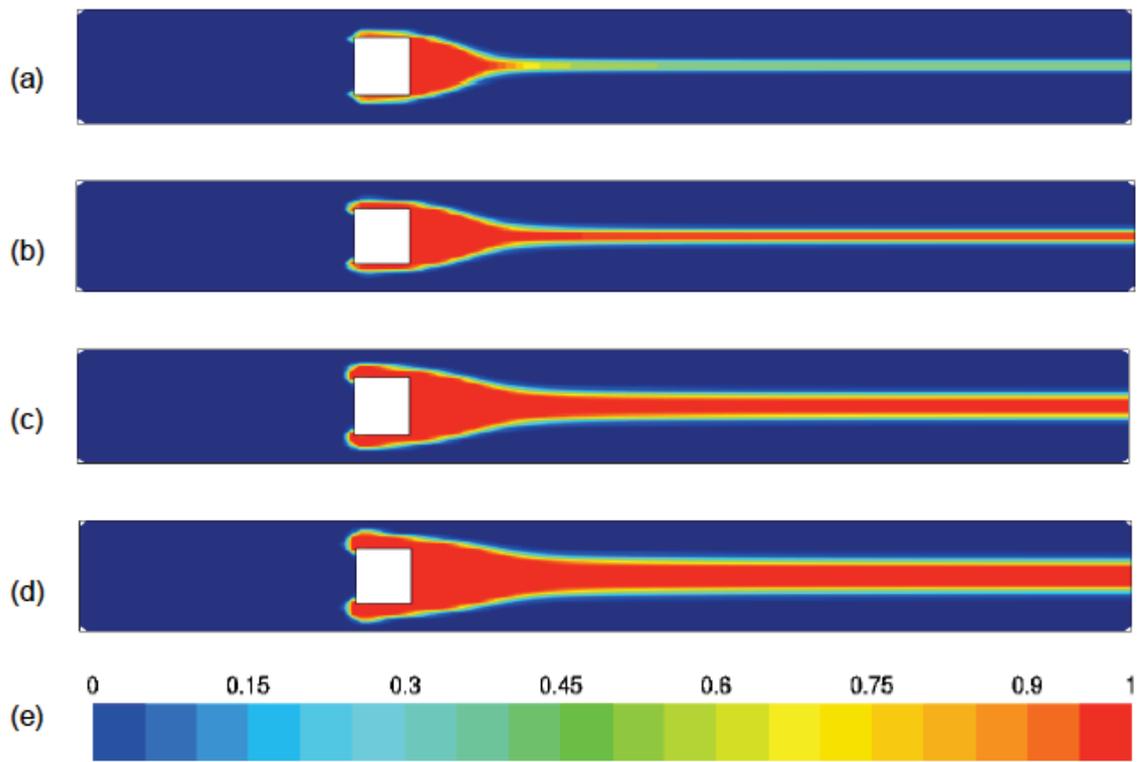


Figura 6

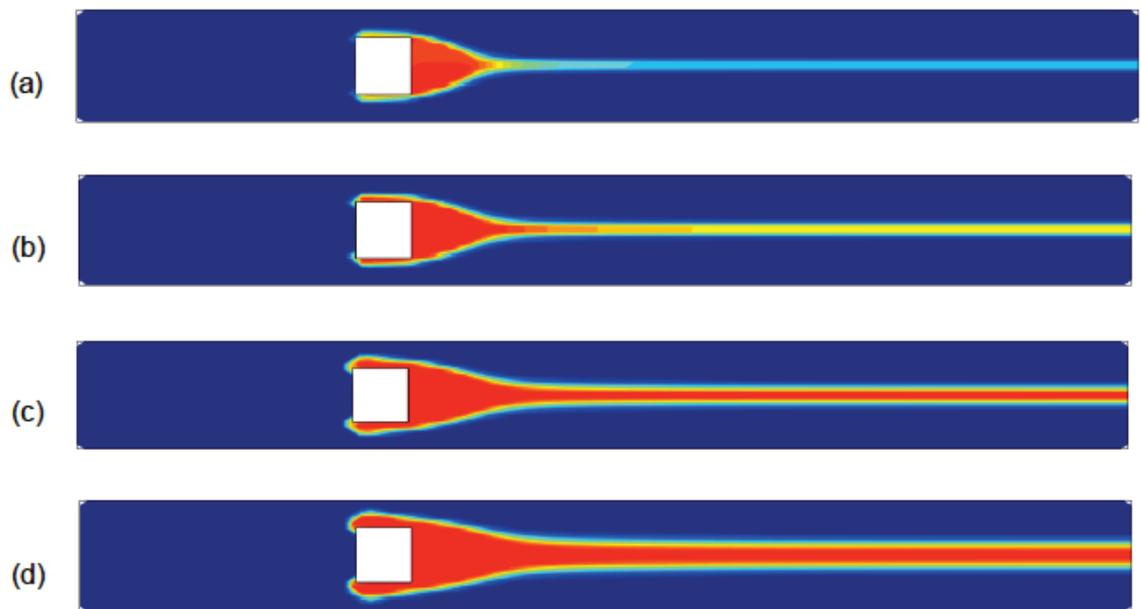


Figura 7

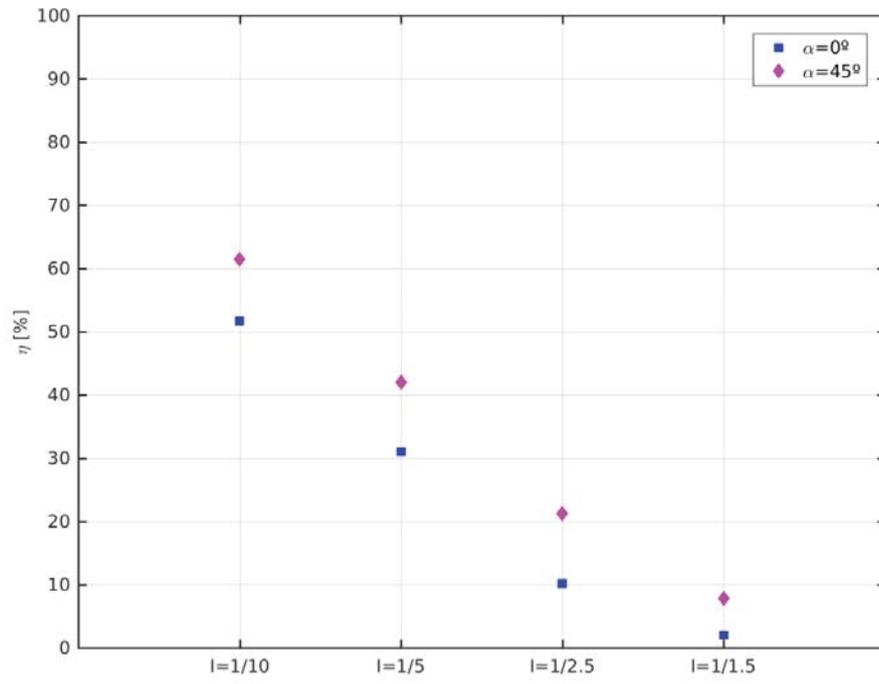


Figura 8

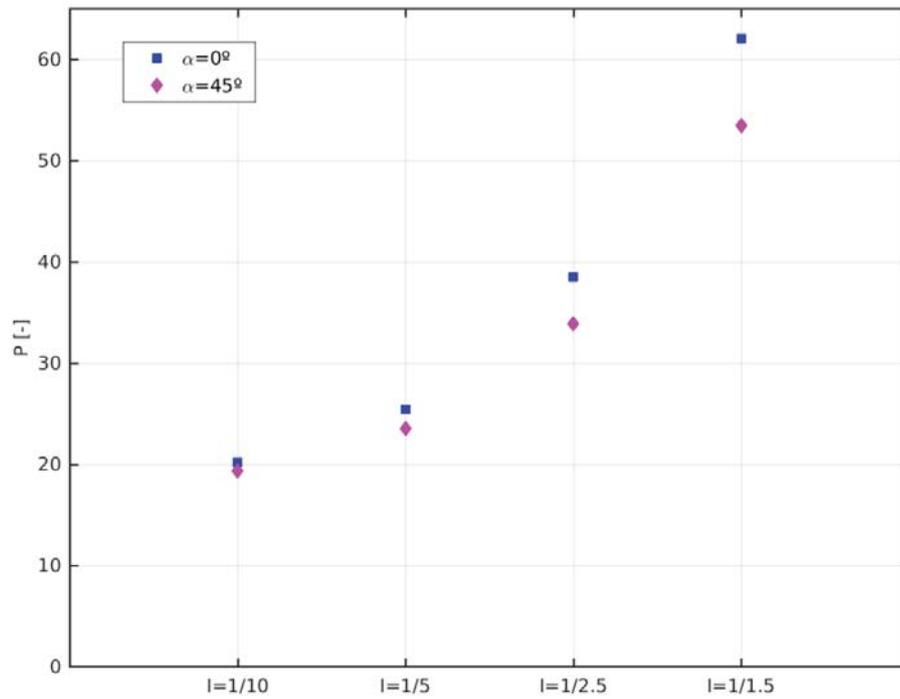


Figura 9

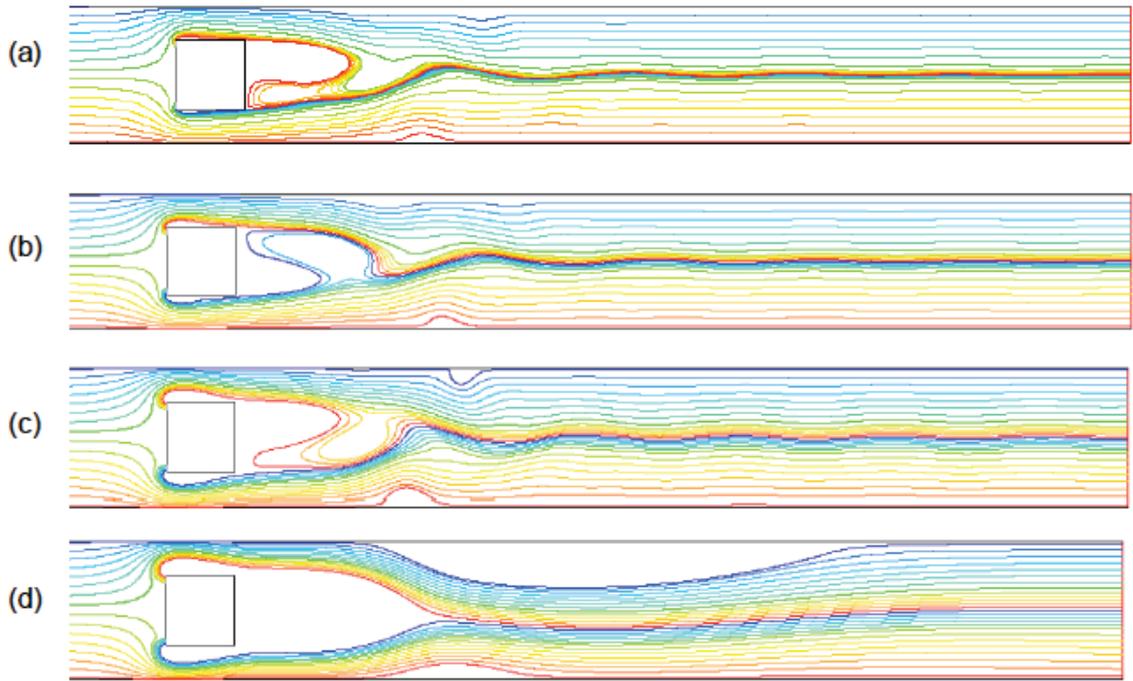


Figura 10

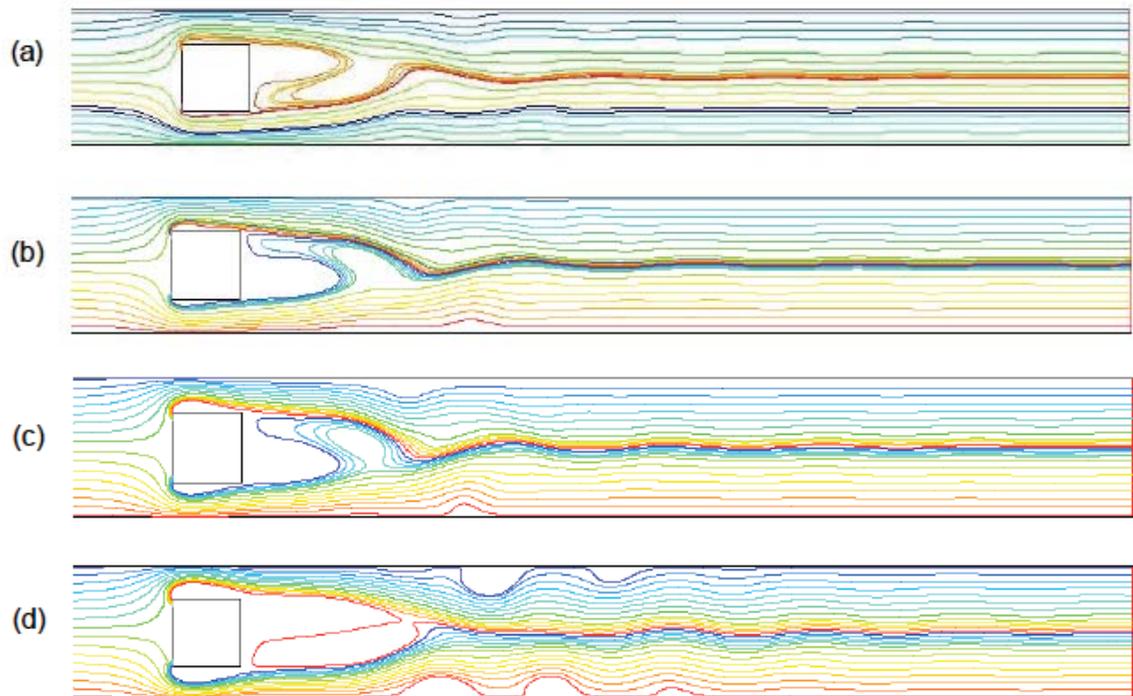


Figura 11

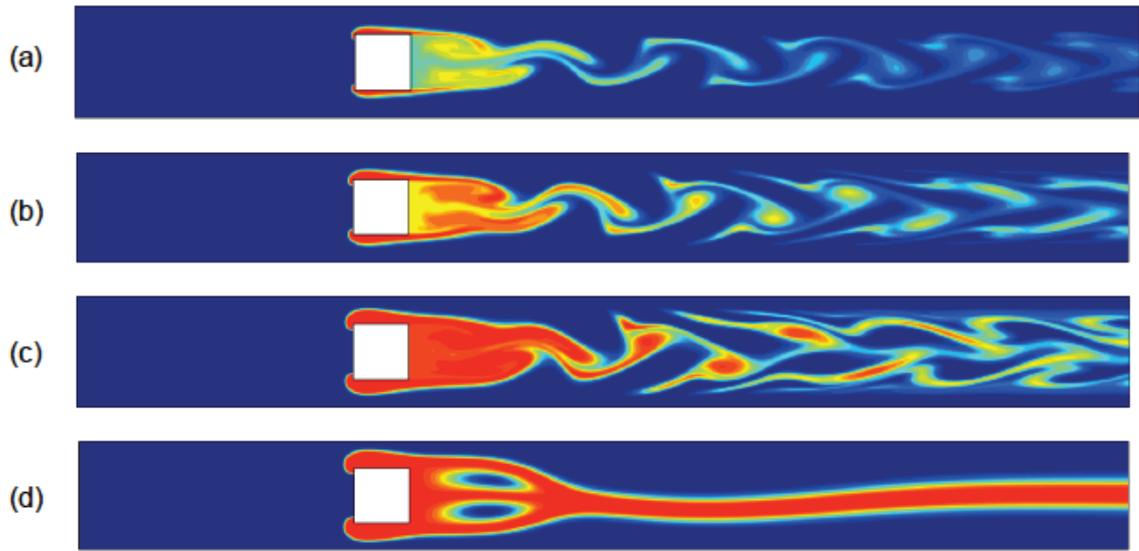


Figura 12

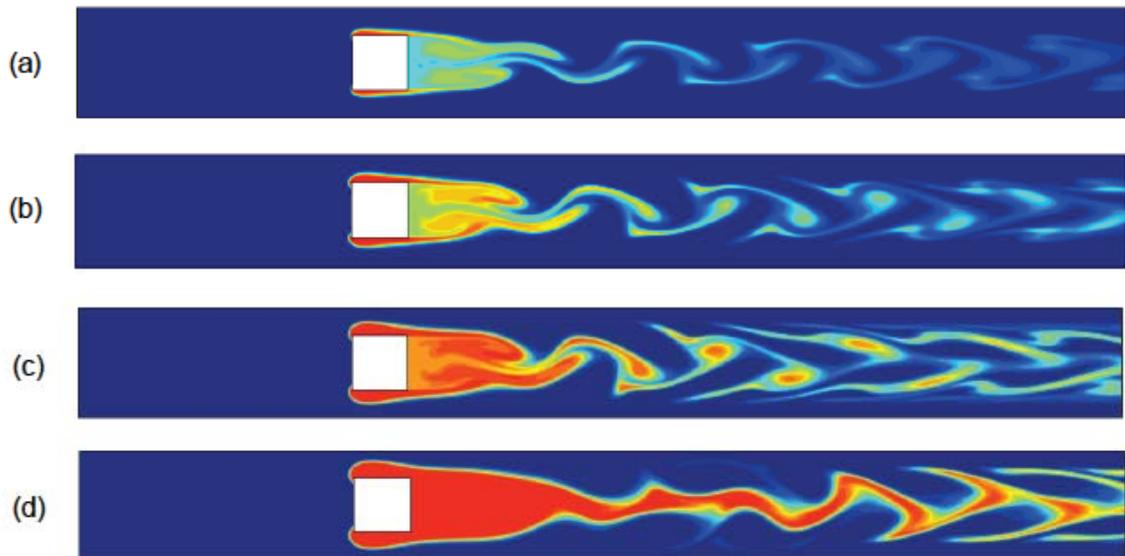


Figura 13

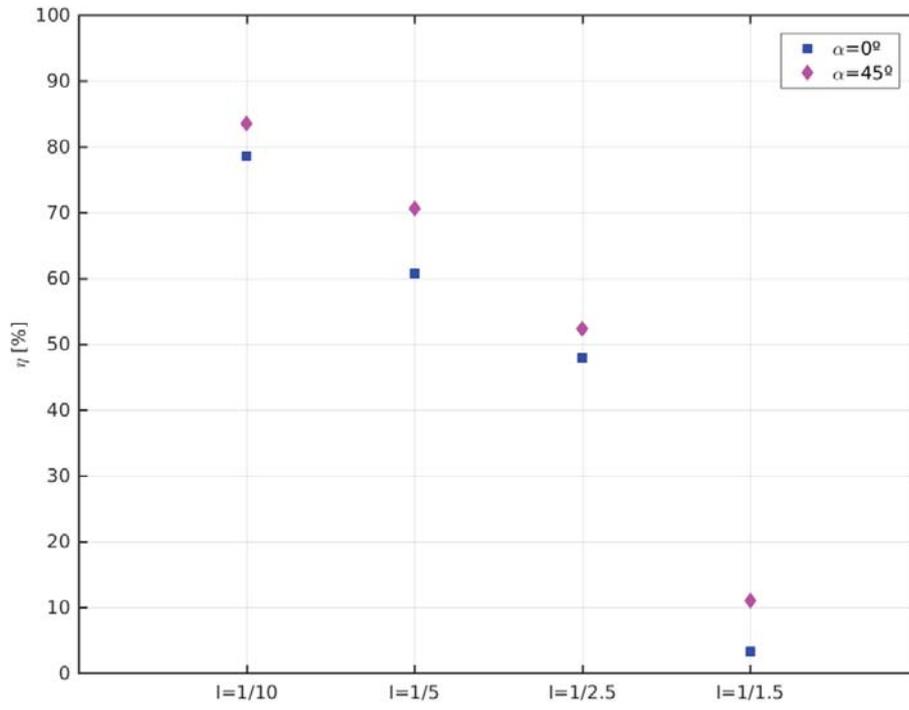


Figura 14

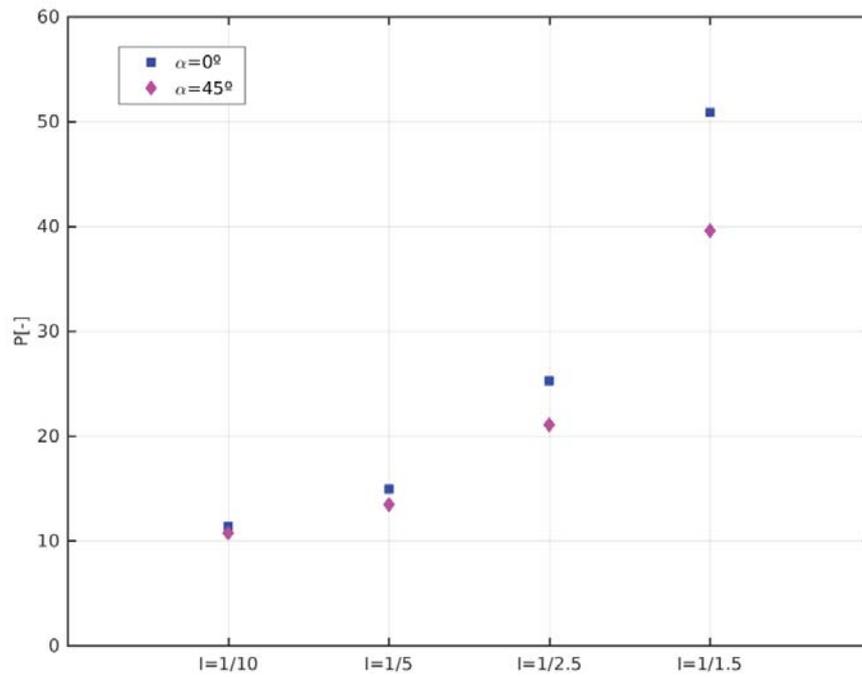


Figura 15

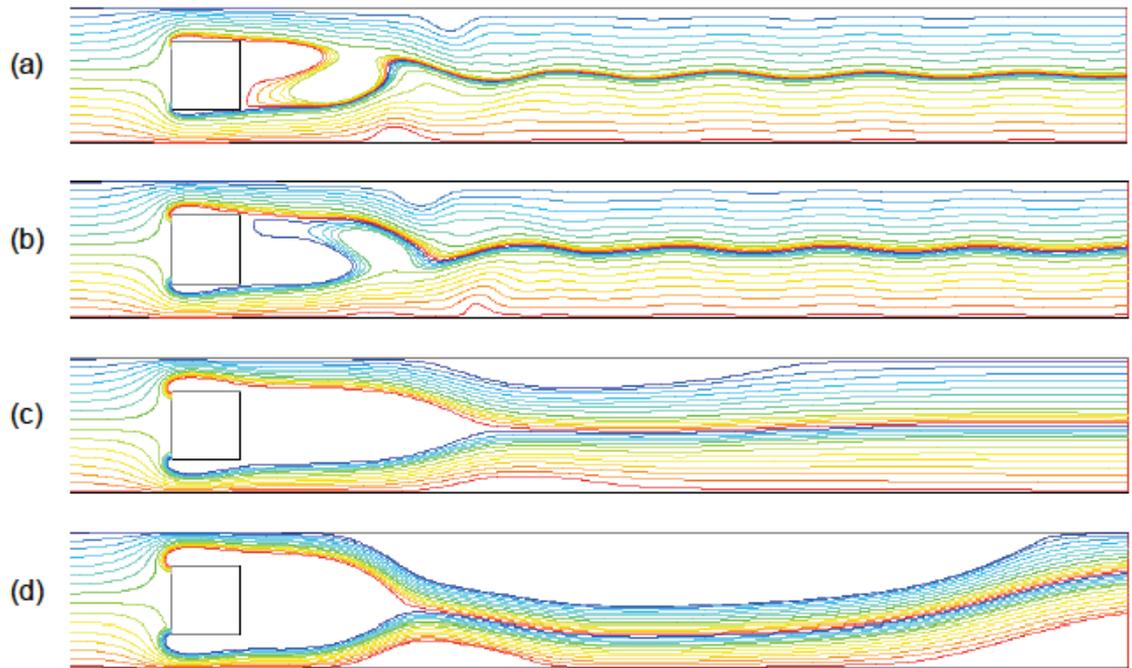


Figura 16

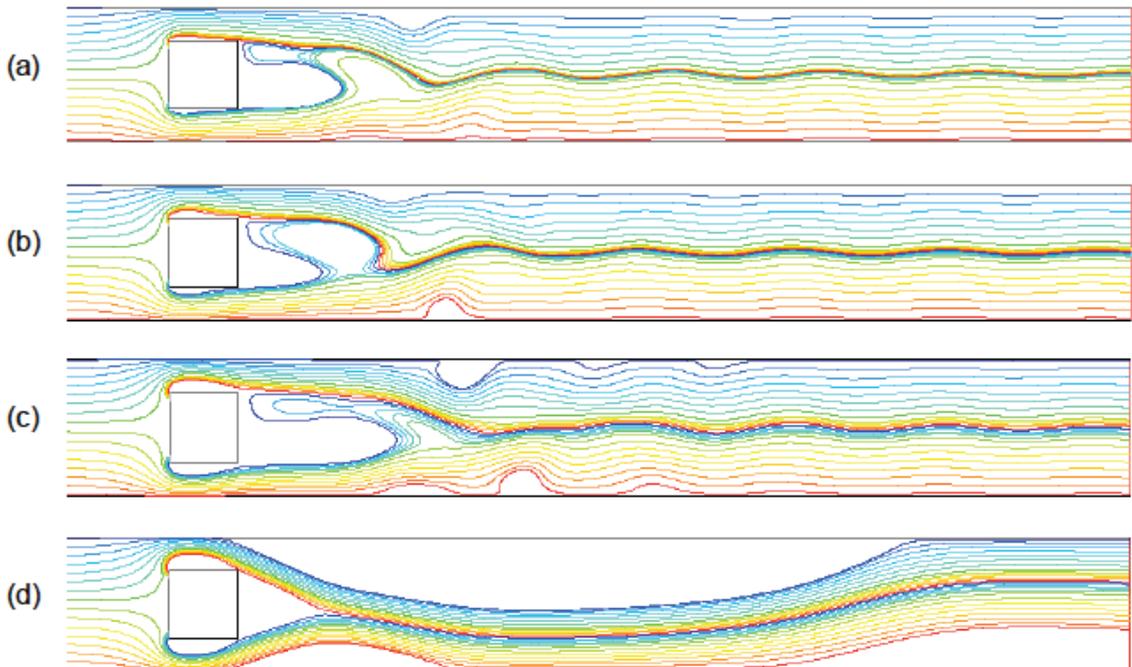


Figura 17

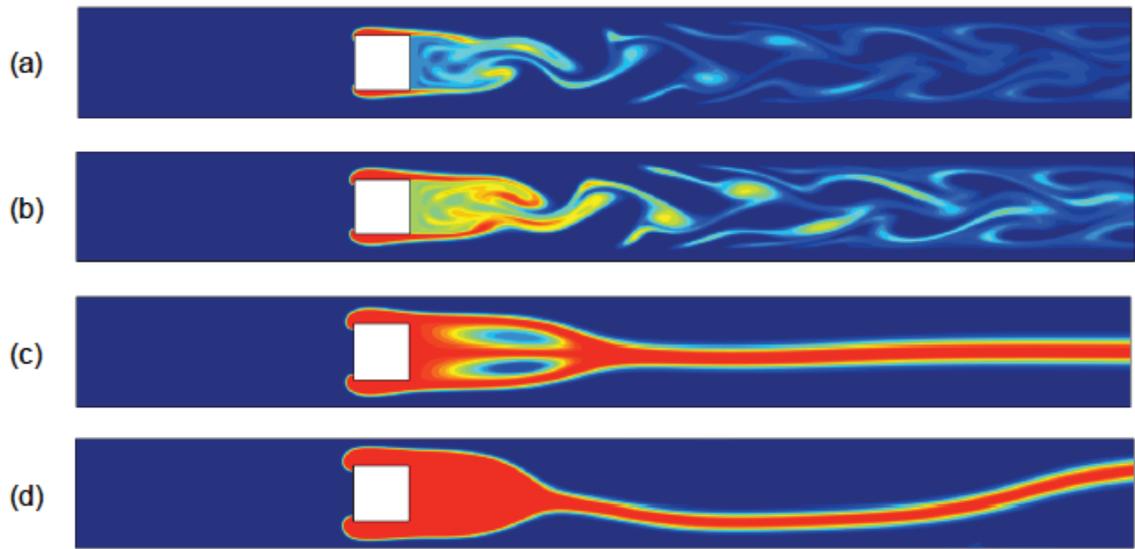


Figura 18

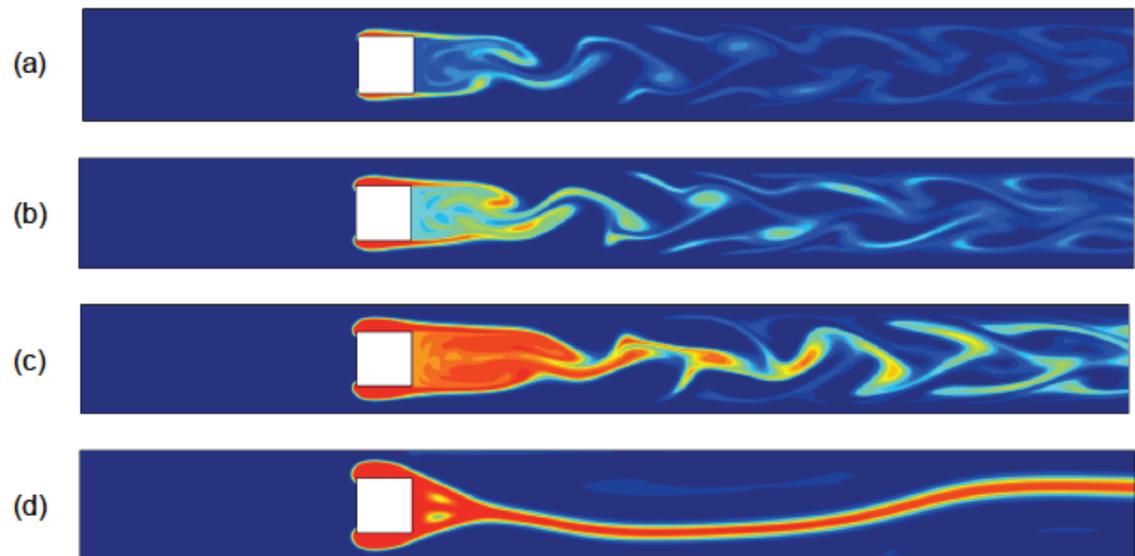


Figura 19

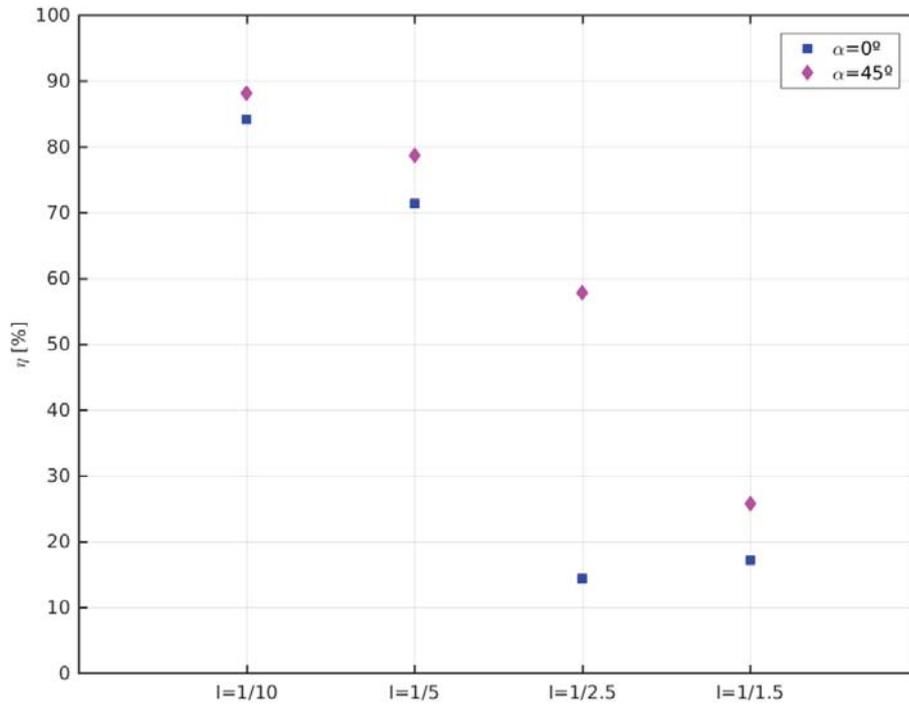


Figura 20

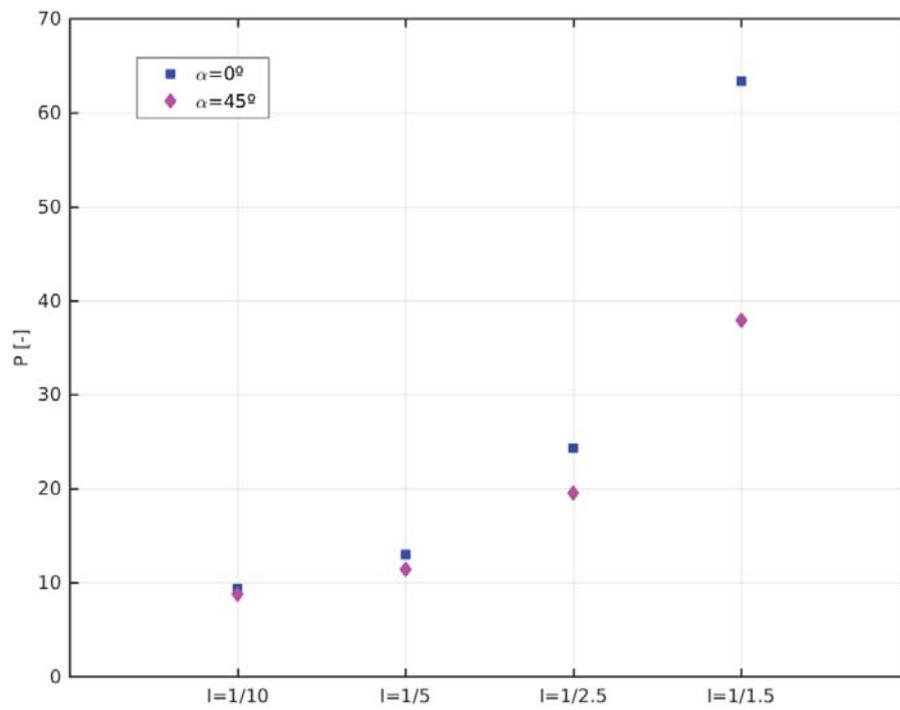


Figura 21

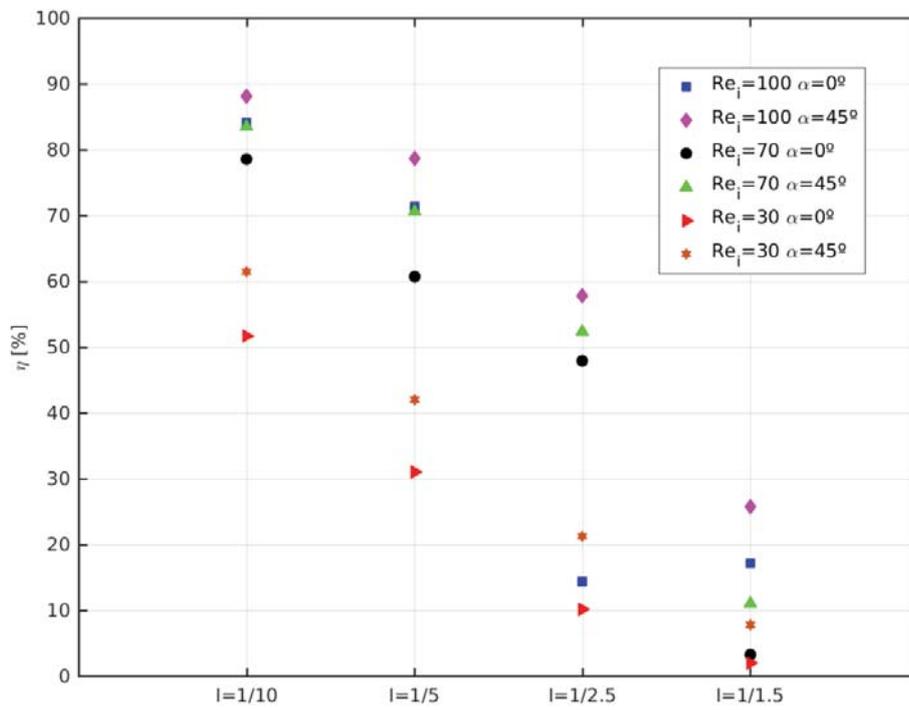


Figura 22

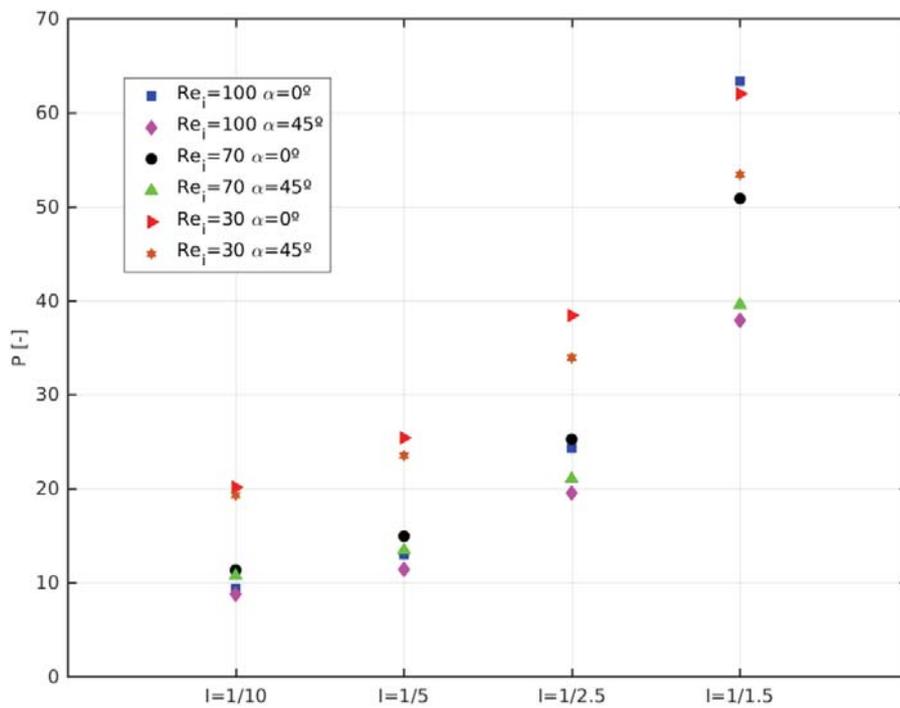


Figura 23



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 201830859

②② Fecha de presentación de la solicitud: 31.08.2018

③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **B01F13/00** (2006.01)  
**B01F5/04** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	US 2002023841 A1 (AHN CHONG H et al.) 28/02/2002, párrafos [0009 - 0011]; [0049];[0021-0028]; [0084-0091]; figura 1	1
X	CN 101108322 A (UNIV SHANGHAI JIAOTONG) 23/01/2008, párrafos [0009 - 0057];	1
A	US 2012218857 A1 (OCOLA LEONIDAS E et al.) 30/08/2012, párrafo [0008]; párrafos [0032 - 0047];	1
A	WO 2018006166 A1 (PREC NANOSYSTEMS INC) 11/01/2018, páginas 8 - 13; figuras	1

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

**El presente informe ha sido realizado**

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
29.01.2020

Examinador  
C. Galdeano Villegas

Página  
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

B01F

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC