

FLUJOS EN JUNTURAS MILIMÉTRICAS CON SECCIONES TRANSVERSALES CIRCULARES Y CUADRADAS

FLOWS IN MILLIMETER JUNCTIONS WITH CIRCULAR AND SQUARE CROSS-SECTIONS

P.G. Correa^{1, 2}, R.A. Mansilla^{1, 2}, J.R. Mac Intyre³, C.A. Perazzo^{4, 5}, and J.M. Gomba^{*1,2}

¹Instituto de Física Arroyo Seco - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

²Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Pcia. de Buenos Aires (CIFICEN), UNCPBA - CONICET, Tandil, Argentina

³University of Oulu, Faculty of Biochemistry and Molecular Medicine, P.O. Box 5400, 90014 Oulu, Finland

⁴IMEtTyB, Universidad Favaloro - CONICET, Buenos Aires

⁵Departamento de Matemática, Física y Química, FICEN, Universidad Favaloro, Buenos Aires

Recibido: 25/03/2024; Aceptado: 13/04/2024

El presente trabajo se enfoca en el estudio numérico del flujo dentro de una junta formada por la intersección de dos canales milimétricos. En particular, se caracteriza la dinámica de dos fluidos idénticos inyectados desde entradas opuestas tanto en la región de contacto como en los conductos de salida. Se analiza el efecto de la forma de la sección transversal sobre dos aspectos del flujo. Primero, en la proporción de cada uno de los líquidos en los canales de salida. Segundo, en la morfología de las superficies de corriente.

Palabras Clave: juntas X, mezcladores.

The present work focuses on the numerical study of the flow within a junction formed by the intersection of two millimeter channels. In particular, we study the dynamics of two identical fluids injected from opposite inlets at the contact region and at the exit channels. We analyse the effect of the cross-section on two aspects of the flow dynamics. First, its influence on the liquid fraction at the outlet channels. Second, its effect on the morphology of the stream surfaces.

Keywords: X junction, mixers.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2024.35.3.78>



ISSN - 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

La Microfluídica se centra en el estudio del flujo de pequeñas cantidades de líquidos en conductos cerrados o sobre superficies abiertas. Su aplicación más difundida es la dinámica de fluidos en dispositivos empleados en campos diversos como la química, la biología y la medicina. Estos dispositivos consisten en microsistemas integrados que pueden realizar diversas funciones en un mismo chip. Los denominados *Lab-On-Chip* (LOC) encuentran su utilidad, por ejemplo, para síntesis de sustancias o detección de agentes contaminantes [1], polimerización [2], análisis de ADN [3], administración de fármacos [4], entre otros. Una de las ventajas más destacables de estas tecnologías es que reducen sustancialmente los volúmenes de muestras y reactivos.

Uno de los dispositivos microfluídicos que aparecen en muchas de las aplicaciones mencionadas son los micromezcladores [5]. Los más simples consisten en un par de conductos de entrada que se encuentran en un canal de mezclado. Si los conductos son opuestos son denominados mezcladores T, y si confluyen formando un ángulo son denominados mezcladores Y (las letras hacen referencia a la geometría del canal). Aquí analizaremos juntas X que posee uno o, como los que analizaremos aquí, dos conductos de

salida (ver Fig. 1). En particular, el mezclador T es muy empleado como *benchmark* o banco de pruebas para comparar el rendimiento de diferentes procesos, debido a que es un dispositivo ampliamente caracterizado.

La influencia de la geometría de los canales a escala microscópica sobre las propiedades del flujo ha sido estudiado desde diversos puntos de vista, tanto desde las geometrías simples como son los canales T, hasta sistemas de canales más complejos como los micromezcladores rómbicos [6]. Si nos enfocamos en el análisis de juntas X, distintas configuraciones de microcanales han sido estudiadas por *Ismagilov et al.* (2001) [7], quienes describen experimentalmente el patrón de flujo laminar para dos canales de sección rectangular que se intersecan a 90°. En ese trabajo analizan situaciones en que los planos horizontales en que se hayan ambos canales no coinciden, es decir que un canal se encuentra inmediatamente encima del otro, y se detalla la influencia de la relación entre las dimensiones transversales de los canales en el pasaje de uno de los fluidos hacia el otro canal. *Lee et al.* (2008) [8] extiende el análisis, incorporando como uno de los parámetros al ángulo de cruce. En dicho trabajo se indica experimental y numéricamente la incidencia del ángulo en la curvatura del flujo. A diferencia de nuestra geometría, los canales se encuentran uno encima del otro, como en *Ismagilov et al.* (2001) [7], y las entradas

* jgomba@exa.unicen.edu.ar

de los fluidos son contiguas (no opuestas).

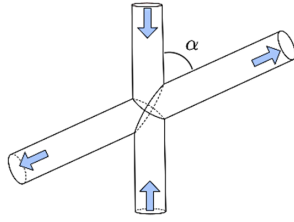


Figura 1: Esquema del flujo en una junta X. El dispositivo consta de entradas y salidas enfrentadas. Se define el ángulo α entre los ejes de entrada y salida. El diámetro de la sección circular es de 4mm (área $12,6\text{mm}^2$).

El campo de velocidades es bastante simple para caudales pequeños y se complejiza al aumentar el flujo, dado que emerge una estructura de vórtices en la intersección (su número e intensidad depende fuertemente de la relación de aspecto de la sección de los canales) [9]. Para un fluido newtoniano de viscosidad cinemática constante ν , el inicio de los diferentes regímenes está determinado por el número de Reynolds $Re = \tilde{U} \tilde{W} / \nu$, donde \tilde{U} es una velocidad característica y \tilde{W} es el ancho dimensional de los canales. Para una intersección en X con canales que se cruzan en un ángulo $\alpha = 90^\circ$, el flujo a lo largo de los canales de salida a bajos Re es simétrico (ver Fig. 2(a)): los dos fluidos inyectados permanecen segregados. A mayores Re , aparece un vórtice axial en la intersección de los canales y se extiende hacia cada salida. En canales con una sección transversal cuadrada [10-12], la transición entre los dos regímenes ocurre para $Re_c \sim 40$, mientras que para canales circulares [13] es ligeramente mayor con $Re_c \sim 48$.

El trabajo de Cachile *et al.* (2012) [14] es un análisis detallado de la influencia del ángulo de intersección sobre la dinámica del flujo laminar para canales en forma de X de tamaño milimétrico, donde los canales de sección cuadrada están en un mismo plano y las entradas están enfrentadas. La curvatura en las líneas de corriente de dos fluidos idénticos que se inyectan de forma enfrentada depende del ángulo de intersección, y se encuentra que a medida que el ángulo que forman los canales decrece, el líquido tiende a dirigirse mayormente hacia el canal de salida que implica una mayor curvatura del flujo. En dicho trabajo los autores encuentran un ángulo crítico por debajo del cual el fluido de cada canal de entrada deja de dividirse en dos hacia cada canal de salida. Además, mediante simulaciones numéricas bidimensionales se estudia la presencia de zonas de recirculación en el cruce de los canales.

A pesar de la gran cantidad de artículos que proponen novedosas y complejas geometrías que hacen posible mejorar el mezclado en distancias cada vez más reducidas, no existen muchos estudios que exploren, en forma sistemática, consideraciones geométricas como la influencia de la forma de la sección transversal en el ángulo crítico de cruce o en la estructura del flujo. Estos aspectos, y el deseo de difundir a una audiencia general esta área de la Ciencia, han motivado este trabajo.

II. MARCO TEÓRICO y METODOLOGÍA

Consideraremos el flujo de dos líquidos idénticos dentro de una junta X de entradas enfrentadas, ver Fig. 1. El líquido es Newtoniano y por lo tanto su dinámica es descrita por la ecuación de Navier-Stokes

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

donde \vec{u} es el campo de velocidades, ρ la densidad, η la viscosidad dinámica y p la presión. Consideramos que el fluido es incompresible, y por lo tanto

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0. \quad (2)$$

Describiremos la morfología del flujo a partir de líneas y superficies de corriente. Las líneas de corriente se definen como las curvas que en todos sus puntos tienen como tangente a los vectores \vec{u} en un tiempo dado. El conjunto de todas las líneas en un momento dado constituye el patrón de flujo para dicho momento, que será estacionario si la velocidad en cada punto no depende del tiempo, como son los casos que aquí se analizan. Asimismo, las superficies de corriente se construyen a partir de líneas de corriente que tienen origen sobre un segmento definido en el seno del volumen analizado.

Los ductos poseen un diámetro de 4 mm y una longitud de 7 cm. El líquido considerado es agua, con $\rho = 10^3 \text{kg/m}^3$ y $\eta = 10^{-3} \text{Pa s}$. La condición de contorno en las paredes es de no deslizamiento, en las entradas se impone un perfil desarrollado de Poiseuille con una velocidad media igual a $2.5 \times 10^{-3} \text{m/s}$, y en las salidas presión atmosférica. A fin de obtener una solución más precisa sin tener un aumento considerable del tiempo de cómputo, la región donde se intersecan los canales posee una malla más densa que el resto del dominio: los casos con ángulos más grandes requirieron típicamente el empleo de unos 150.000 elementos en total, mientras que los ángulos más pequeños requirieron hasta 750.000.

Como en los experimentos reportados en Cachile *et al.* [14] para canales de sección cuadrada rectangular, se optó por considerar flujos con $Re = 10$. Dado que el estado final es estacionario, se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes estacionarias empleando una herramienta propia basada en el método de elementos finitos. Se empleó un método iterativo, *Generalized Minimal RESiduals* (GMRES), preconditionado con un algoritmo multigrilla estándar. Un criterio de convergencia de 10^{-3} fue adoptado para el error relativo en dos pasos sucesivos (ver más detalles en Correa y col. [9, 13]).

III. RESULTADOS

En primera instancia evaluaremos la incidencia del ángulo α en la proporción q (≤ 0.5) de uno de los líquidos en la salida donde menos cantidad de ese líquido sale. La medida de q para cada ángulo se ha realizado sobre una imagen con los canales dispuestos de manera de generar una vista superior análoga a las imágenes experimentales. Para determinar la zona del fluido que proviene de una determinada entrada se graficó un mínimo de 3.000 líneas de corriente

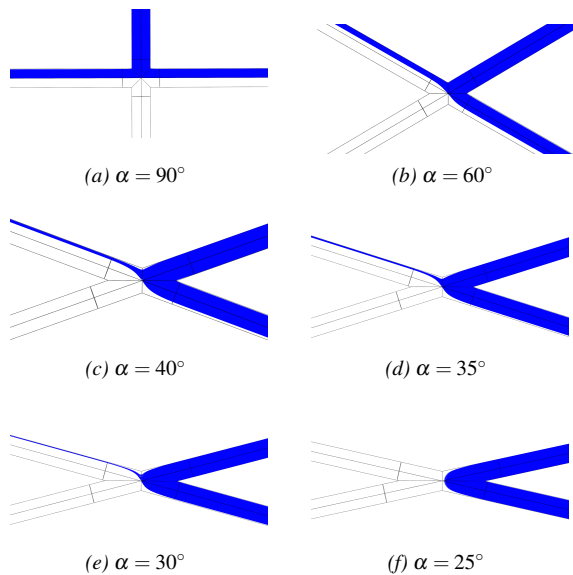


Figura 2: Vista superior de canales de sección circular. Se grafican en azul, para diferentes ángulos de cruce, las líneas de corriente provenientes de uno de los canales de entrada.

con origen uniformemente distribuido en esa entrada.

La Fig. 2 muestran las líneas de corrientes que permiten determinar la posición de la interfase entre los líquidos, de manera análoga a los experimentos, para canales de sección circular con ángulos entre 25° y 90° . La Fig. 3 compara el valor de q versus el ángulo α de nuestras simulaciones con datos experimentales propios en canales circulares, obtenidos de forma similar a los reportados Cachile *et al.* [14] para canales de sección cuadrada. Observamos que la proporción q en ángulos de 60° y 90° es similar a obtenidos experimentalmente.

Sin embargo, para los ángulos de 35° y 40° el q que resulta de las simulaciones es un tanto menor. Esto puede deberse a que en las simulaciones no se ha considerado el efecto de difusión transversal del colorante empleado en los experimentos. Este efecto tiene mayor influencia a velocidades bajas, lo que ocurre cerca de los bordes laterales de los canales por la condición de contorno de no deslizamiento.

Para hallar el ángulo crítico se implementó un estudio numérico paramétrico para α entre 25° y 30° , con un $\Delta\alpha = 1^\circ$. Por último, una vez detectado un intervalo más pequeño para el α_c , se llevó a cabo un nuevo barrido numérico, con $\Delta\alpha = 0.2^\circ$. Como resultado de este proceso, se ha determinado para los canales de sección circular un ángulo crítico de $26.4^\circ \pm 0.1^\circ$. Este ángulo crítico es sensiblemente diferente al reportado para canales de sección cuadrada en Cachile *et al.* [14], donde $\alpha = 33.8^\circ$.

Se construyó otro modelo numérico de conductos de sección cuadrada (de $3,55 \text{ mm} \times 3,55 \text{ mm}$, área de la sección transversal $12,6 \text{ mm}^2$). El estudio se implementó con las mismas condiciones que para canales de sección circular. En la Fig. 3 se representan los resultados de q en función de α . Allí se aprecia la diferencia entre los ángulos críticos y un comportamiento casi lineal de los resultados de ambas simulaciones.

Por otra parte, analizamos la morfología de las interfaces, mediante el uso de las líneas y superficie de corriente.

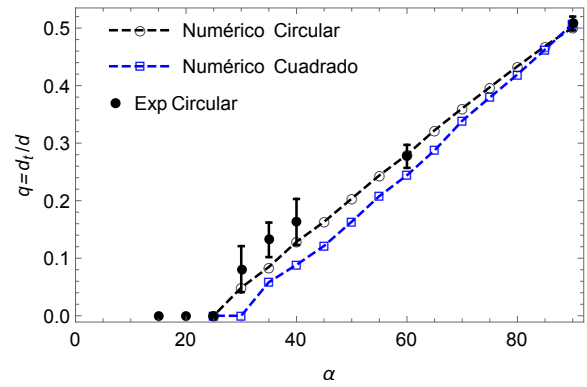


Figura 3: Valores medidos de q en función de α para simulaciones en geometrías cuadradas y circulares. Para el caso circular, se comparan con los valores experimentales propios.

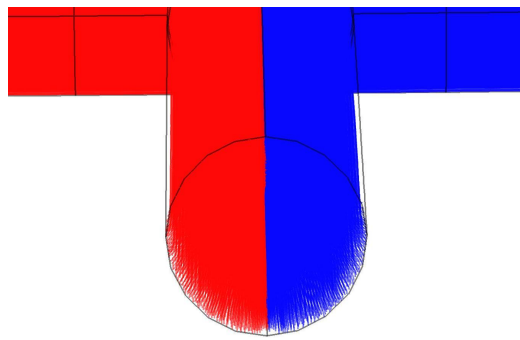
Se han tomado imágenes de los perfiles de los canales de salida, indicando las líneas de corriente de ambas entradas (en azul y en rojo). En la Fig. 4 se observa que la interfase es aproximadamente perpendicular al plano de los canales. La pregunta natural que surge es desde qué región de la entrada provienen las líneas de corriente que terminan mostrando esa configuración particular.

Las simulaciones muestran diferencias notables entre ambas geometrías (circular y cuadrada), si bien la interfase se observa plana en ambos casos. Se graficaron superficie de corrientes que tienen su origen en un canal de entrada. En general, las líneas de corriente provenientes de planos verticales emergen curvadas en los canales de salida. La Fig. 5 muestra algunos planos para canales circulares y $\alpha = 40^\circ$. A medida que se consideran planos de entrada ubicados de manera consecutiva (en la figura, la secuencia de colores azul-amarillo-verde-magenta), los planos adoptan una curvatura mayor. Además, mientras que las líneas azul y amarilla (cuyos planos están más próximos al lateral 'interno' que mide el ángulo α) salen todas por el mismo canal, las líneas de los planos verde y magenta se dividen en tres partes. Efectivamente, una parte, que corresponde a la región media del plano de entrada, se dirige hacia el canal de salida visualizado (Fig. 5b), mientras que las dos partes restantes lo hacen hacia el otro conducto de salida. La Fig. 5b muestra, además, que las líneas verde y magenta no hacen contacto con las paredes del canal de salida.

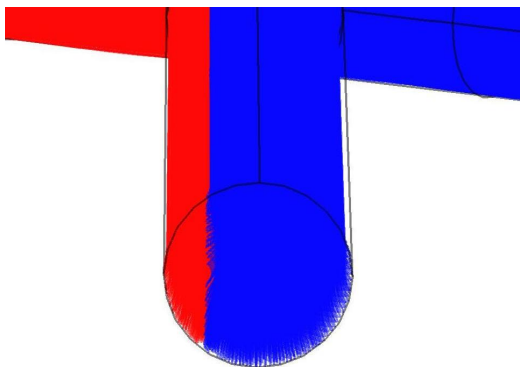
Los planos de corrientes verticales en la entrada también presentan una curvatura para la geometría de canales cuadrados. Sin embargo, la forma de las curvas es distinta al caso circular, pues existe un cambio de la concavidad. La Fig. 6 muestra esos planos.

Otra diferencia se percibe en la forma en que el plano color magenta (lado externo al lado donde se mide el ángulo) se divide. Se separa en tres partes, al igual que en canales de secciones circulares, pero la dirección que toman estas partes se invierte. Los dos conjuntos de líneas de los extremos salen por el canal que se visualiza en la Fig. 6b y hacia el otro canal se dirige la porción central de líneas.

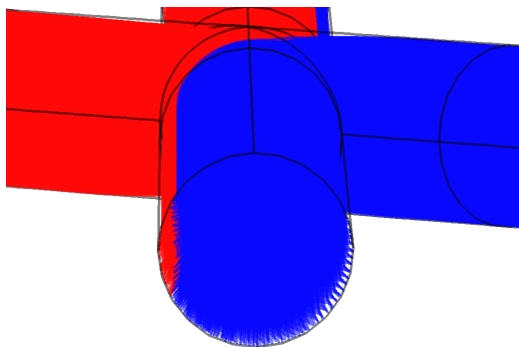
Si se analiza el caso de líneas en planos horizontales de entrada también se observan diferencias, que se muestran en las Figs. 7a y 7b. Los planos que ingresan desplazados del centro cambian de orientación luego de pasar la zona de la



(a) $\alpha = 90^\circ$



(b) $\alpha = 60^\circ$



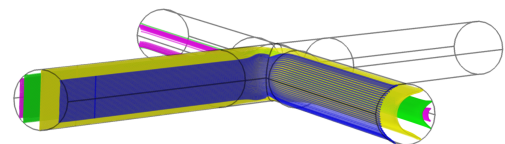
(c) $\alpha = 40^\circ$

Figura 4: Forma plana de la interfase que separa a los líquidos en uno de los canales de salida. Se grafican en azul y rojo 3000 líneas de corriente provenientes de cada una de las entradas.

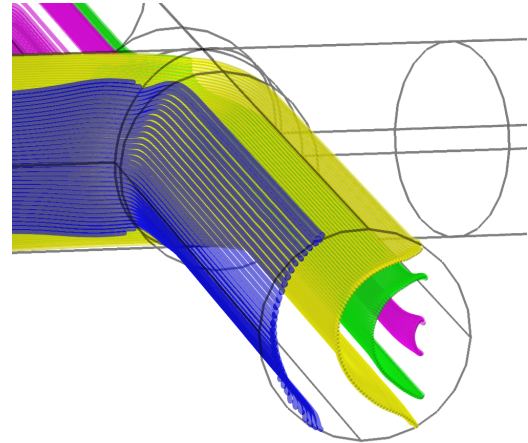
intersección de canales. El cambio de inclinación respecto a la horizontal depende de la geometría circular o cuadrada de las secciones de los conductos. Para canales cuadrados la curvatura de los planos es mayor y su inclinación es opuesta al caso circular.

IV. CONCLUSIONES

La influencia del ángulo de cruce de los canales, α , sobre la proporción de fluido coloreado, q , en un canal de salida fue estudiada numéricamente y los resultados fueron

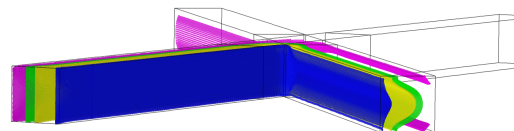


(a) Vista de un canal de entrada y uno de salida.

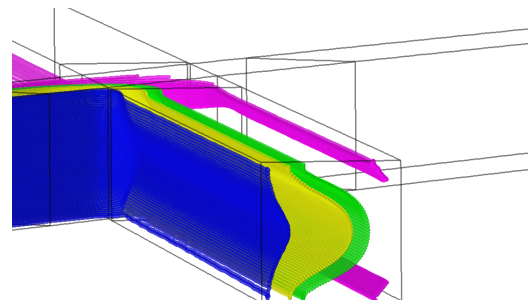


(b) Canal de salida.

Figura 5: Canales circulares con $\alpha = 40^\circ$. Las superficies de corriente, inicialmente planas y verticales a la entrada, salen curvados. La concavidad de estas superficies a la salida poseen el mismo signo.



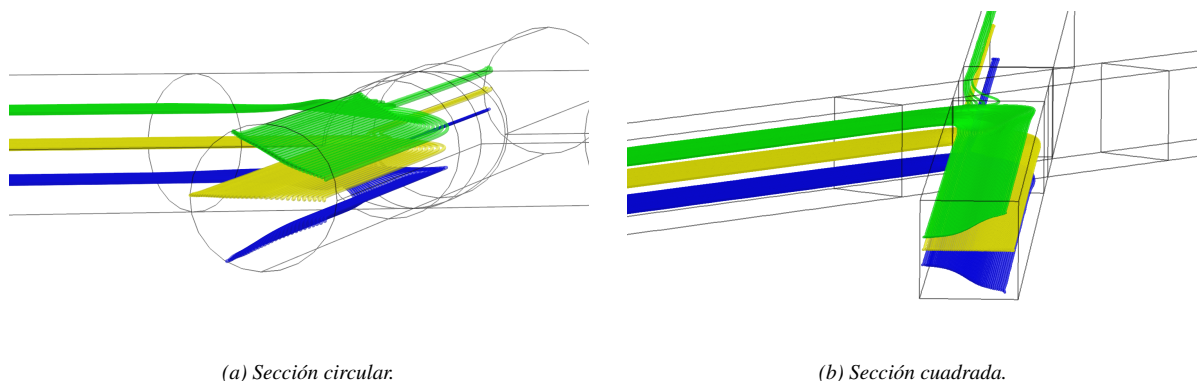
(a) Vista de un canal de entrada y uno de salida.



(b) Zoom sobre el canal de salida.

Figura 6: Canales cuadrados con $\alpha = 40^\circ$. Las superficies de corriente, verticales y planas en la entrada, salen curvados pero con una concavidad de signo contrario a la de los canales circulares.

satisfactoriamente comparados con experimentos propios. El análisis se realizó para $Re = 10$, donde la interfase entre los líquidos que ingresan por cada entrada es estacionaria.



(a) Sección circular.

(b) Sección cuadrada.

Figura 7: Canales con $\alpha = 40^\circ$. Superficies de corriente planas y horizontales a la entrada se curvan de diferente forma en canales de secciones circulares y cuadrados.

Se observa, como ocurre en el caso de canales de sección cuadrada, que existe un ángulo crítico por debajo del cual las líneas de corriente que parten de una entrada dada siguen una trayectoria de máxima curvatura y salen por una única salida. Mediante simulaciones numéricas se determinó el ángulo crítico en $\alpha_c = 26.4^\circ$. Este valor es menor al reportado para canales de sección cuadrada (33.8°). La relación encontrada entre el ángulo de cruce y la fracción de caudal tiene relevancia pues permite implementar un mecanismo para el control de las proporciones de los líquidos a mezclar.

Las simulaciones numéricas permiten analizar la estructura interna del flujo trazando líneas y superficies de corriente. Se han hallado diferencias significativas para el flujo en canales circulares y cuadrangulares. Se observa que el comportamiento de las líneas de corriente que parten desde una de las entradas y están contenidas en un plano perpendicular al plano de los canales, se curvan hacia el canal adyacente más cercano con una concavidad positiva (negativa) para el caso de canal de sección circular (rectangular). El análisis de las líneas de corriente que parten de un canal de entrada pero que están contenidas en planos paralelos al de la junta muestran también diferencias en el signo de la concavidad, excepto en el plano medio donde las líneas de corriente conservan la posición vertical original. Esto puede tener interés en el diseño para el direccionamiento del flujo dentro de los canales, que puede controlarse en función del ángulo y del tipo de sección transversal.

AGRADECIMIENTOS

P.G.C. agradece la Mención otorgada en el marco del Premio Giambiagi 2023 y la invitación a realizar el presente artículo. J.M.G., en su carácter de director de la Tesis doctoral, y los demás autores expresan su gratitud al Jurado del premio. Este trabajo fue financiado por Conicet (PIP 2021-3172) y la Agencia I+D+i (PICT 2019-2674).

REFERENCIAS

- [1] R. Tiggelaar, T. Veenstra, R. Sanders, E. Berenschot y H. Gardeniers. Analysis systems for detection on ammonia based on micromachined components modular hybrid versus monolithic integrated approach. *Sensors and Actuators, B: Chemical* **92**, 25-36 (2003). ISSN: 0925-4005.
- [2] T. Iwasaki y J. Yoshida. Free radical polymerization in microreactors. Significant improvement in molecular weight distribution control. *Macromolecules* **38** (2005). <https://doi.org/10.1021/ma048369m>.
- [3] V. Ugaz, R. Elms, R. Lo, F. Shaikh y M. Burns. Microfabricated electrophoresis systems for DNA sequencing and genotyping applications: current technology and future directions. *Royal Society* **362**, 1105-1129 (2004). ISSN: 1471-2962 (online).
- [4] Z. Razzacki, P. Thawar, M. Yang, V. Ugaz y M. Burns. Integrated microsystems for controlled drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews* **56**, 185-198 (2004).
- [5] C. Y. Lee, W. T. Wang, C. C. Liu y L. M. Fu. Passive mixers in microfluidic systems: A review. *Chem. Eng. J.* **288**, 146-160 (2016). ISSN: 1385-8947.
- [6] C. K. Chung y T. R. Shih. Effect of geometry on fluid mixing of the rhombic micromixers. *Microfluidics and Nanofluidics* **4**, 419-425 (2008). ISSN: 16134982.
- [7] R. F. Ismagilov *et al.* Pressure-driven laminar flow in tangential microchannels: An elastomeric microfluidic switch. *Analytical Chemistry* **73**, 4682-4687 (2001). ISSN: 1520-6882 (online).
- [8] D. Lee, Y. Chen y T. Bai. A study of flows in tangentially crossing micro-channels. *Microfluidics and Nanofluidics* **7**, 169-179 (2008). ISSN: 1613-4982.
- [9] P. G. Correa *et al.* Influence of aspect ratio on vortex formation in X-junctions: Direct numerical simulations and eigenmode decomposition. *Physics of Fluids* **32**, 124105 (dic. de 2020). ISSN: 1070-6631.
- [10] S. J. Haward *et al.* Tricritical spiral vortex instability in cross-slot flow. *Phys. Rev. E* **93**, 031101 (2016). <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.93.031101>.
- [11] S. J. Haward. Microfluidic extensional rheometry using stagnation point flow. *Biomicrofluidics* **10** (2016). ISSN: 1932-1058 (online).

- [12] W. M. Abed, A. F. Domingues, R. J. Poole y D. J. Dennis. Heat transfer enhancement in a cross-slot micro-geometry. [Int. J. Therm. Sci. **121**, 249-265 \(2017\)](#). ISSN: 1290-0729.
- [13] P. G. Correa *et al.* Three-dimensional flow structures in X-shaped junctions: Effect of the Reynolds number and crossing angle. [Phys. Fluids **31**, 1-30 \(2019\)](#). ISSN: 1070-6631.
- [14] M. Cachile, L. Talon, J. M. Gomba, J. P. Hulin y H. Auradou. Stokes flow paths separation and recirculation cells in X-junctions of varying angle. [Physics of Fluids **24**, 021704 \(2012\)](#).