

## Tema A4a. Termofluidos

### “Análisis de la producción de entropía en un oscilador de fluido”

**Héctor Sánchez Morales<sup>a\*</sup>, José Omar Davalos Ramírez<sup>a</sup>, Alfredo Villanueva Montellano<sup>a</sup>, Shehret Tilvaldyev<sup>a</sup>.**

<sup>a</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Plutarco Elías Calles #1210 Fovissste Chamizal Ciudad Juárez, Chih., Méx. C.P. 32310.

\*Héctor Sánchez Morales. al186530@alumnos.uacj.mx

---

## RESUMEN

*En este trabajo se emplea dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar la generación de entropía local dentro de un oscilador de fluido angulado. Se realizaron simulaciones transitorias empleando el modelo de turbulencia  $k - \omega$  SST. Los cálculos numéricos bajo condiciones de turbulencia con número de Reynolds de 30000. Los resultados se validaron con datos experimentales encontrados en la literatura mostrando una buena aproximación. Al comparar los contornos de velocidad con los contornos de entropía, se encontró que esta última se genera en las zonas donde los gradientes de velocidad son más altos y que presenta una mayor intensidad en la cámara de mezcla del oscilador.*

---

*Palabras Clave: Oscilador de fluido, Generación de Entropía, CFD, Gradientes de velocidad*

## ABSTRACT

*In this work, computational fluid dynamics is employed to evaluate the generation of local entropy within an angled fluid oscillator. Transient simulations were conducted using the  $k-\omega$  SST turbulence model. The numerical calculations were performed under turbulent conditions with a Reynolds number of 30000. The results were validated with experimental data found in the literature, showing a good approximation. When comparing velocity contours with entropy contours, it was found that the latter is generated in areas where velocity gradients are higher and exhibits a higher intensity in the mixing chamber of the oscillator.*

---

*Keywords: Fluidic oscillator, Entropy generation, CFD, Velocity gradients.*

---

## 1. Introducción

Los osciladores de fluido son elementos en los cuales, debido a la forma interna de su diseño, la descarga de flujo se vuelve oscilante gracias al efecto Coanda. Estos sistemas tienen la capacidad de generar oscilaciones periódicas en el flujo de fluido, lo que puede ser útil para medir sus propiedades físicas, o incluso para controlar la forma en que fluye. Tienen aplicación en el control de la separación de la capa límite sobre superficies ya que no utilizan partes móviles lo cual representa una ventaja contra otros tipos de controladores. Las zonas principales del oscilador son el canal de retroalimentación y la cámara de mezclado. El canal de retroalimentación sirve de retorno al flujo que sigue la trayectoria de acuerdo con la forma del oscilador gracias al efecto Coanda; mientras que, en la cámara de mezclado, el flujo que abandona el canal en ambos lados del oscilador se unifica. El comportamiento del flujo dentro del oscilador es tridimensional y variable dependiendo de la forma geométrica de su diseño. De acuerdo con la literatura consultada se identificó que existen investigaciones realizadas para conocer las características del flujo en osciladores con diferentes configuraciones. Bobush et al. [1] realizaron un estudio experimental en donde analizaron las estructuras internas de flujo dentro de un oscilador. Emplearon las técnicas de velocimetría de imágenes de partículas y de descomposición ortogonal propia. Encontraron que las dimensiones de la sección de entrada y salida de la cámara de mezcla determinan las características de la oscilación del flujo y el ángulo de deflexión de la descarga. Serrar et al. identificaron que la frecuencia de las oscilaciones incrementa de acuerdo al incremento de la presión a la entrada del oscilador [2]. Pandey y Kim estudiaron de manera numérica el flujo interno en un oscilador de fluido. Enfocaron su análisis en dos parámetros específicos: el ancho de la entrada de la cámara de mezcla,  $w$ , y el ancho de la garganta de salida,  $d_t$ , con relación al diámetro hidráulico,  $d_h$ . Encontraron que el flujo reversible es significativo a la entrada del canal de retroalimentación cuando la relación  $w/d_h$  aumenta y que disminuye considerablemente cuando dicha relación es mayor a 1.18 [3]. Wozsidlo et al. [4] investigaron la evolución temporal de las oscilaciones de flujo emitidas por un oscilador. Encontraron que a la

salida del canal de retroalimentación se forma una burbuja que empuja el flujo hacia el lado opuesto provocando el cambio de dirección. Kim y Kim realizaron un estudio experimental para evaluar el flujo tridimensional en un oscilador curvado [5]. Encontraron que al momento de la transición del flujo hacia cada lado de la descarga del oscilador se presenta la aparición de vórtices de contra rotación los cuales se vuelven aleatorios a medida que se alejan del sistema.

Los resultados presentados comprueban que dentro del oscilador el flujo se comporta de manera diferente, por consiguiente, su energía varía considerablemente incrementando las fluctuaciones de velocidad. Una manera de evaluar las fluctuaciones de velocidad relacionándolas con la pérdida de energía es calculando la generación de entropía local [6], [7] la cual puede producirse debido al movimiento promedio del flujo y a fluctuaciones de velocidad. Este trabajo aplica el criterio de generación de entropía local generada por fluctuaciones de velocidad para evaluar las pérdidas de energía dentro de un oscilador de fluido usando CFD bajo condiciones de número de Reynolds de 30000. Las simulaciones se realizaron bajo condiciones transitorias.

---

## 2. Metodología

El criterio de entropía local debido a fluctuaciones de velocidad proporciona información acerca de la disipación de la energía del fluido. Requiere de cálculos obtenidos mediante CFD para su análisis. Se calcula mediante la siguiente expresión [7]:

$$\dot{S}_D''' = \frac{2\mu_{eff}}{T} \left[ \left( \frac{\partial u'_1}{\partial x'_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u'_2}{\partial x'_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial u'_3}{\partial x'_3} \right)^2 \right] \quad (1)$$
$$+ \frac{\mu_{eff}}{T} \left[ \left( \frac{\partial u'_2}{\partial x'_1} + \frac{\partial u'_1}{\partial x'_2} \right)^2 \right. \\ \left. + \left( \frac{\partial u'_3}{\partial x'_1} + \frac{\partial u'_1}{\partial x'_3} \right)^2 \right. \\ \left. + \left( \frac{\partial u'_2}{\partial x'_3} + \frac{\partial u'_3}{\partial x'_2} \right)^2 \right]$$

donde  $T$  es temperatura,  $\mu_{eff}$  es la viscosidad dinámica efectiva resultante de la suma de la viscosidad laminar y turbulenta,  $u'$  es la velocidad de fluctuación turbulenta e  $i = 1,2,3$  indica las 3 direcciones en coordenadas cartesianas. Las velocidades  $u'_1, u'_2$  y  $u'_3$  no pueden obtenerse

numéricamente de manera directa, sin embargo, de acuerdo con Kock [8],  $\dot{S}_{D'}'''$  puede calcularse considerando la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación específica empleando el modelo de turbulencia  $k - \omega$  de la siguiente manera:

$$\dot{S}_{D'}''' = \beta \frac{\rho k \omega}{T} \quad (2)$$

donde  $\beta=0.09$  representa una constante del modelo de turbulencia  $k - \omega SST$  y  $\rho=$  densidad. Los valores de  $k$  y  $\omega$  fueron calculados durante los pasos temporales e ingresados en la Ecuación 2 para generar una nueva variable de campo dentro del software correspondiente a la generación de entropía.

El oscilador de fluido utilizado proviene del estudio de Ostermann [9], es de tipo angular con un diámetro hidráulico de 0.025 m, una longitud del canal de retroalimentación de 0.190 m. Los ángulos del canal de retroalimentación son de  $270^\circ$ .

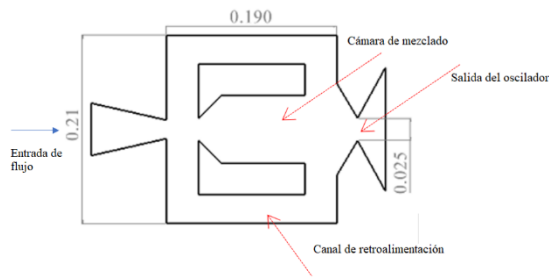


Figura 1. Geometría del oscilador de fluido.

Las condiciones de frontera utilizadas para el análisis se presentan en la Figura 2. Se aplicó una condición de flujo másico a la entrada del oscilador, denominada como  $\dot{m}$ , calculada empleando el número de Reynolds,  $Re$ , en función del  $d_h$ , y la ecuación de continuidad. Se consideró  $Re=30000$  para poder validar los datos simulados con los presentados en [9]. La velocidad a la salida del oscilador,  $u_{out}$  y  $\dot{m}$  se calcularon mediante las ecuaciones 3 y 4 respectivamente:

$$u_{out} = \frac{Re\mu}{\rho d_h} \quad (3)$$

$$\dot{m} = u_{out}\rho A_{out} \quad (4)$$

La condición de salida fue presión y el resto de las fronteras fueron designadas como paredes. A la salida del oscilador se modeló un dominio para la salida del flujo oscilante hacia el exterior. Ese dominio tiene las siguientes dimensiones.

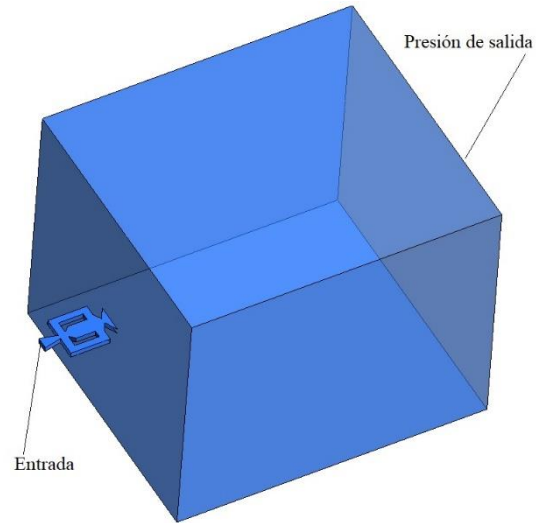


Figura 2. Dominio y condiciones de frontera.

El modelo fue discretizado mediante la técnica de multibloques con elementos hexaédricos para formar una malla estructurada. El tamaño de la malla fue de 2.6 millones y se muestra en la Figura 3.

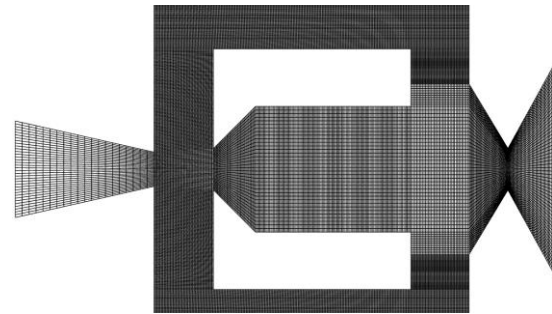


Figura 3. Oscilador de fluido discretizado.

El estudio fue de tipo transitorio con un paso temporal de 0.0006 s y 1500 pasos temporales. La duración del paso temporal se ajustó para tener los mismos parámetros del estudio de referencia. Debido a que en el cálculo de la entropía se requiere el valor de  $\beta = 0.09$ , se utilizó el modelo de turbulencia  $k - \omega SST$ .

Para presentar los resultados se definió un plano a media altura del oscilador que corresponde a 0.025m. Sobre este plano se presentaron los resultados obtenidos correspondientes a contornos de velocidad y entropía producida por fluctuaciones de velocidad (Figura 4).

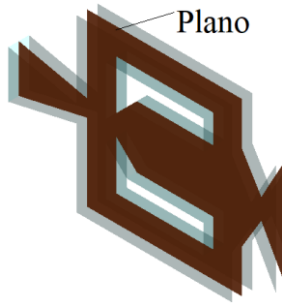


Figura 4. Plano de medición

Adicionalmente, para efectos de validación, se agregó un punto monitor a la salida del oscilador para medir la velocidad en cada paso temporal en dicha posición. Mediante la transformada de Fourier se obtuvo la frecuencia de oscilación del fluido. La frecuencia obtenida se comparó con resultados encontrados en la literatura. Solamente se validó un valor de Reynolds que corresponde al número de Reynolds usado en este estudio.

### 3. Resultados

Se calculó la frecuencia de las oscilaciones de flujo encontrando una frecuencia de 11.54 Hz tal como se muestra en la Figura 5. Este resultado se comparó con los obtenidos en [9] para validar las simulaciones numéricas encontrándose una buena aproximación tal como se observa en la Figura 6. Debido a que las condiciones del flujo en este estudio corresponden a  $Re=30000$ , únicamente se valida en esas condiciones.

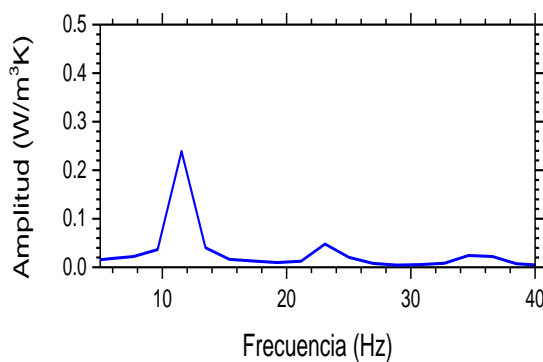


Figura 5. Frecuencia de oscilaciones.

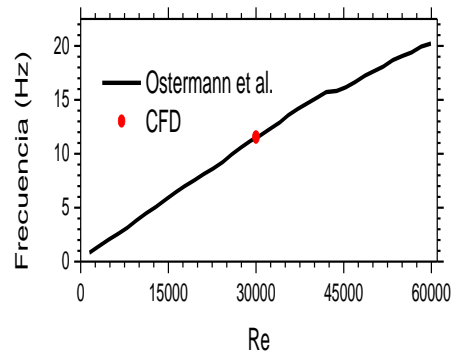


Figura 6. Comparación de datos experimentales con simulados.

En la Figura 7 se presentan los resultados de velocidad a diferentes tiempos,  $0.25T$ ,  $0.5T$ ,  $0.75T$  y  $T$  donde  $T$  es el tiempo de oscilación del flujo. Se observa que la mayor velocidad se concentra en el centro de la cámara de mezcla del oscilador e incrementa en la garganta de

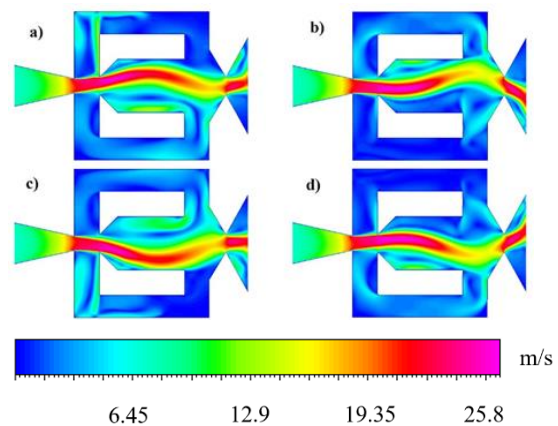


Figura 7. Comparación de contornos de velocidad. a)  $0.25T$ , b)  $0.5T$ , c)  $0.75T$  y d)  $T$ .

salida debido a la reducción de  $d_h$ . En el canal de retroalimentación la velocidad es baja e incrementa antes de entrar al canal de mezcla en donde debido al impulso que adquiere debido a la adición de flujo de la entrada principal. Dentro de la cámara y antes de llegar a la garganta de salida el flujo pierde velocidad. A pesar de las oscilaciones que se

observan tanto en la cámara como en la salida la velocidad se mantiene con variaciones mínimas. Lo anterior muestra que el efecto del oscilador se mantiene por lo que cualitativamente se comprueba la reproducción del fenómeno en la simulación. Con respecto a las variaciones en función del tiempo de oscilación, el canal de retroalimentación muestra que la velocidad varía en los canales de

retroalimentación lo que sugiere una menor cantidad de flujo másico dependiendo de las oscilaciones.

Con respecto a la entropía mostrada en la Figura 8, también ocurren cambios en las zonas donde esta se presenta con mayor intensidad de acuerdo con la oscilación del fluido. La mayor magnitud de entropía se presenta en la cámara de mezcla y a la salida al exterior del oscilador. El mayor incremento de entropía se presenta a la salida del oscilador debido a la expulsión del flujo hacia el exterior. Es coincidente que en la zona donde se presenta la mayor velocidad la entropía disminuye mientras que alrededor de esta región donde la velocidad decrece la entropía incrementa considerablemente. Lo anterior no representa que en zonas de baja velocidad la entropía aumenta su magnitud, ya que en el canal de retroalimentación donde la velocidad es mínima no se encuentran puntos con alta entropía. Se determina que en zonas donde ocurre una aceleración, la entropía aparece en el flujo que presenta una menor velocidad alrededor de aquel que tiene mayor velocidad. Esto se comprueba en la sección que se reduce a la entrada del oscilador, como se puede observar, la forma convergente de la entrada genera dentro del oscilador dos secciones donde hay generación de entropía, este fenómeno se repite en todos los tiempos. Se puede asumir que la entropía ocurre debido a los gradientes de velocidad.

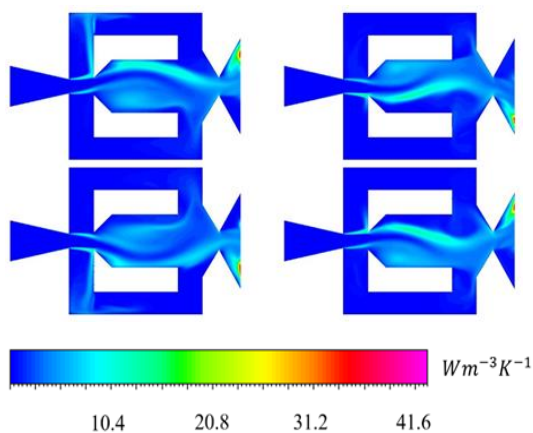


Figura 8. Comparación de contornos de entropía. a) 0.25T, b) 0.5T, c) 0.75T y d) T

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se realizó una evaluación de la generación y entropía local debido a las fluctuaciones de velocidad que ocurren en un

oscilador de fluido empleando simulaciones numéricas de CFD. Los resultados numéricos fueron validados con trabajos experimentales encontrados en la literatura. Se encontró una buena aproximación con los datos experimentales lo cual garantiza la certeza de los resultados presentados. Se concluye que el flujo presenta aceleraciones justo a su entrada a la cámara de mezcla y se mantiene a lo largo de todo el tiempo de oscilación cambiando únicamente la dirección del flujo. La entropía no se presentará en zonas donde la velocidad es la más baja del sistema, sino que se presentará en los gradientes de velocidad alrededor de donde el flujo presenta una mayor aceleración.

#### 5. Bibliografía

- [1] B. C. Bobusch, R. Wozidlo, J. M. Bergada, C. N. Nayeri, and C. O. Paschereit, "Experimental study of the internal flow structures inside a fluidic oscillator," *Exp. Fluids*, vol. 54, no. 6, 2013, doi: 10.1007/s00348-013-1559-6.
- [2] A. Serrar, M. El Khlifi, and A. Kourta, "Characterisation and comparison of unsteady actuators: a fluidic oscillator and a sweeping jet," *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, vol. 32, no. 4, pp. 1237–1254, Jan. 2022, doi: 10.1108/HFF-07-2021-0474.
- [3] R. J. Pandey and K. Y. Kim, "Numerical modeling of internal flow in a fluidic oscillator," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 3, pp. 1041–1048, 2018, doi: 10.1007/s12206-018-0205-x.
- [4] R. Wozidlo, F. Ostermann, and H. J. Schmidt, "Fundamental properties of fluidic oscillators for flow control applications," *AIAA J.*, vol. 57, no. 3, pp. 978–992, 2019, doi: 10.2514/1.J056775.
- [5] S. H. Kim and H. D. Kim, "Quantitative visualization of the three-dimensional flow structures of a sweeping jet," *J. Vis.*, vol. 22, no. 3, pp. 437–447, 2019, doi: 10.1007/s12650-018-00546-1.
- [6] Z. F. Yu, W. Q. Wang, Y. Yan, and X. S. Liu, "Energy loss evaluation in a Francis turbine under overall operating conditions using entropy production method," *Renew. Energy*, vol. 169, pp. 982–999, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.01.054.

- [7] R. Gong, H. Wang, L. Chen, D. Li, H. Zhang, and X. Wei, "Application of entropy production theory to hydro-turbine hydraulic analysis," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 56, no. 7, pp. 1636–1643, 2013, doi: 10.1007/s11431-013-5229-y.
- [8] F. Kock and H. Herwig, "Local entropy production in turbulent shear flows: a high-Reynolds number model with wall functions," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 10, pp. 2205–2215, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.025>.
- [9] F. Ostermann, "Experimental Comparison between the Flow Field of Two Common Fluidic Oscillator Designs," no. January, pp. 1–14, 2015, doi: 10.2514/6.2015-0781.