

## Tema A4a Termofluidos: Flujo incompresible

### “Efectos de la duración del pulso inicial en el desarrollo de anillos de vórtice”

U. Caldiño Herrera<sup>\*a</sup>, Shehret Tilvaldyev<sup>a</sup>, A. Villanueva<sup>a</sup>, Fatima Lara Cataño<sup>a</sup>

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

\*Autor de contacto: uzziel.caldino@uacj.mx

#### RESUMEN

La formación y desarrollo de anillos de vórtice (vortex ring) dependen de factores geométricos y dinámicos. En este trabajo se evalúa el tiempo de formación del anillo de vórtice a través de la duración del pulso inicial. Usando herramientas computacionales de código abierto como OpenFOAM y ParaView se analizan numéricamente 5 casos de estudio para identificar las condiciones que resultan en el mejor desempeño en el transporte de masa. Se estudian mapas de contorno de velocidad, presión y vorticidad, así como seguimiento lagrangiano de partículas y líneas de corriente para este propósito. Los resultados de este análisis apuntan a una relación entre el tiempo de desarrollo del flujo al interior del ducto de formación del vórtice y la duración del pulso inicial para la formación del vórtice. Resultando en un tiempo de pulso de 1 s para lograr el mayor transporte de masa sin desprender partículas mientras el anillo de vórtice se desplaza. Se observa que, la presión máxima alcanzada es de 0.0049 Pa y alcanza este valor para un tiempo de pulso de 1 s. Para diferentes duraciones de pulso esta presión resulta menor, por lo que es evidente la condición de mejor desempeño propulsivo en función de la duración del pulso.

Palabras Clave: Anillo de vórtice, transporte de masa, seguimiento lagrangiano, flujo incompresible, dinámica de fluidos computacional.

#### ABSTRACT

The formation and development of vortex rings (vortex ring) depends on geometric and dynamic factors. In this work, the formation time of the vortex ring is evaluated considering the duration of the initial pulse. Through open-source computational tools such as OpenFOAM and ParaView, 5 cases are numerically analyzed to identify the conditions that result in the best performance in mass transport. Contour maps of velocity, pressure and vorticity, as well as Lagrangian tracking of particles and streamlines are studied for this purpose. The results of this analysis point to a relationship between the flow development time inside the vortex formation duct and the duration of the initial pulse for vortex formation. Resulting in a pulse time of 1 s to achieve the highest mass transport without detaching particles while the vortex ring is moving. It is observed that the maximum pressure achieved during the formation of the vortex is 0.0049 Pa. This condition occurs for a pulse time of 1 s. For different pulse time durations, the pressure always reaches lower values. Thereby, it is concluded that a enhanced performance conditions for vortex ring propulsion depends on the duration of the pulse

Keywords: Vortex ring, mass transport, Lagrangian tracking, incompressible flow, computational fluid dynamics.

#### 1. Introducción

Los anillos de vórtice son estructuras de flujo que se caracterizan por la rotación de fluido alrededor de un núcleo con geometría toroidal. Su movimiento es principalmente en dirección perpendicular al plano del anillo. Una característica muy valorada de este flujo es su capacidad de desplazarse por distancias considerables sin disiparse [1-4].

Estas estructuras se observan en eventos inducidos por el ser humano como explosiones (formación de nubes en

forma de hongo) o bien en fenómenos meteorológicos como microburst o microrráfagas. Asimismo, el desplazamiento de algunos cefalópodos y celentéreos los producen al desplazarse en el agua como método de propulsión [5-7].

El estudio de la formación y desarrollo de anillos de vórtices desde la perspectiva de ciencia básica, ciencia aplicada o bien como desarrollo tecnológico, tiene su principal enfoque en el área de propulsión, meteorología, bombeo, entre otras áreas.

En lo relativo a propulsión, modelos bio-inspirados Krueger et al. [8] demostraron como la duración del pulso puede afectar a la formación del anillo de vórtice,

causando que el pulso sea expulsado como un chorro. Asimismo, observaron como la formación del anillo de vórtice incrementa el empuje producido debido a la aceleración del fluido en los alrededores, lo cual se magnifica en pulsos cortos sin remanentes.

En 2010, Ruiz et al. [9] realizaron un estudio experimental en donde se observó un incremento de hasta el 50% en la eficiencia propulsiva entre una propulsión de chorro continuo y una propulsión pulsada. Asimismo, se demostró que, a altas velocidades, la mejora en el rendimiento es suficiente para compensar el costo de energía suministrada para generar la inestabilidad en el flujo pulsado.

En este trabajo se evalúan los efectos que tiene la duración del pulso que genera un anillo de vórtice para la misma geometría y bajo las mismas condiciones de flujo. Este análisis se mantiene en lo numérico, utilizando la herramienta OpenFOAM. Las consideraciones hechas son flujo laminar e incompresible.

Se busca conocer los efectos en el flujo desplazado y transportado por el vórtice anular, así como la distancia recorrida por el mismo durante un lapso de 6 segundos.

## 2. Metodología

El estudio numérico de la formación y desarrollo de un anillo de vórtice se lleva a cabo para condiciones de flujo laminar e incompresible. Las ecuaciones de gobierno que rigen este régimen son la ecuación de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes, mostradas como Ec. (1) y Ec. (2) respectivamente

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (1)$$

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

La discretización de estas ecuaciones, para la solución numérica, se realiza a través de la implementación del método PISO, el cual acopla presión y velocidad considerando un acoplamiento no lineal en el término convectivo y un acoplamiento lineal en el término presión-velocidad. Asimismo, Requiere un número de Courant bajo (paso de tiempo pequeño) y se pueden emplear correctores de presión sin la necesidad de actualizar la discretización de la ecuación de momentum.

La elección de un modelo de flujo laminar es debido a la perspectiva del proyecto de investigación, el cual contempla una etapa experimental, en donde los parámetros de flujo deben mantenerse en valores bajos para que puedan ser medidos por los equipos disponibles.

Para el estudio numérico se define una geometría y una discretización del dominio con las mismas características y condiciones. Asimismo, los esquemas numéricos y modelos físicos se mantienen fijos para cada caso evaluado. En cuanto a las condiciones de frontera, únicamente se hace variar la condición de entrada y

únicamente en lo referente a la duración del pulso, esto es, que la magnitud de velocidad de entrada se conserva.

### 2.1. Geometría y mallado

El dominio geométrico para este caso de estudio tiene geometría cilíndrica, por lo que una condición de axisimetría permite simplificar el caso a únicamente analizar la superficie que corresponde al perfil de revolución. Esta superficie se muestra en la Fig 1.

El dominio consiste en un ducto de entrada con diámetro  $\Phi_p$ . Esta dimensión será la longitud característica del dominio geométrico, siendo que el resto de las dimensiones se expresan en términos de ésta. Para este caso de estudio, el valor de  $\Phi_p$  es de 0.0254 m.

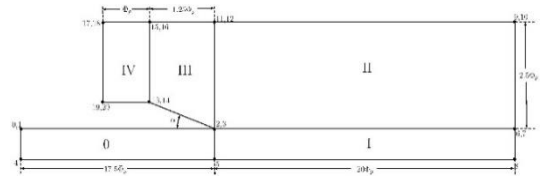


Figura 1. Condiciones del dominio geométrico axisimétrico

Para realizar la discretización del dominio se hace uso del mallado por bloques, para lograr esto, el dominio se subdivide en 5 bloques como se muestra en la Fig 1. La discretización del dominio se obtiene al fraccionar en dirección radial los bloques 0 y I en 300 divisiones y los bloques II, III y IV en 75 divisiones. Mientras que en dirección axial el bloque 0 se fracciona en 300 divisiones, los bloques I y II en 600 divisiones, el bloque III en 38 divisiones y el bloque IV en 30 divisiones. La malla resultante se muestra de manera parcial en la Fig. 2.

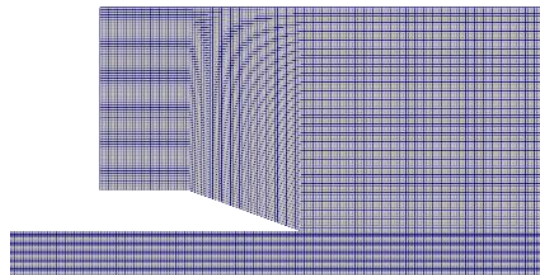


Figura 2. Condiciones del dominio geométrico axisimétrico

Esta malla se compone de 77100 elementos, 308573 caras, de las cuales 153127 son caras internas. Para generar esta malla en OpenFOAM, toda la información descrita anteriormente se incluye en el archivo *blockMeshDict* dentro de la carpeta *system* del caso de estudio.

## 2.2. Condiciones de frontera

Para lograr la generación del anillo de vórtice, además de la geometría del cambio de diámetro abrupto con un ángulo de salida agudo, se necesita que la velocidad de entrada por el ducto de diámetro menor sea un flujo pulsado. Esto es, en la región de entrada se indica una velocidad en dirección  $x$  y esta velocidad se mantiene únicamente por un intervalo de tiempo para posterior a éste mantener un valor de velocidad 0 durante el resto del tiempo evaluado. En cuanto al resto de las fronteras, la salida tiene una condición de presión fija, la pared superior una condición de plano de simetría y las paredes laterales una condición de periodicidad (debido a la axisimetría). En la Tabla 1 se muestran las condiciones de frontera de manera resumida y en términos del lenguaje utilizado en OpenFOAM.

**Tabla 1 – Condiciones de frontera.**

Región	Condición de velocidad	Condición de presión
Entrada	uniformFixedValue (Tabla para el pulso)	zeroGradient
Salida	zeroGradient	fixedValue
Pared superior	symmetry	symmetry
Paredes laterales	wedge	wedge
Paredes	noSlip	zeroGradient

Al ser la condición de entrada el parámetro a evaluar en este estudio, se considera un pulso de entrada con la misma velocidad de 0.127 m/s y con diferentes duraciones. Se evalúan 5 diferentes casos: 0.25 s, 0.5 s, 1.0 s, 1.5 s y 2 s. El análisis se lleva a cabo como estado transitorio por un lapso de 6 segundos, con incrementos de tiempo de 5E-04 s.

En cuanto a las propiedades físicas del fluido, se considera una viscosidad cinemática  $\nu=1\text{E-}06$  m<sup>2</sup>/s, para lograr un número de Reynolds  $Re=1612.9$ , lo cual para un flujo interno, representa un flujo laminar ( $Re \leq 2300$ ) [1].

## 2.3. Modelos y esquemas de solución

Para resolver la dinámica del fluido en la geometría descrita bajo las condiciones de frontera enunciadas se hace uso del solver *pimpleFoam* el cual resuelve flujo transitorio, incompresible y newtoniano, combinando los algoritmos PISO y SIMPLE. Al ser un flujo laminar, este esquema permite un correcto acoplamiento entre la velocidad y la presión siempre y cuando se mantenga un bajo número de Courant. Esta condición se asegura al lograr una discretización fina en las regiones de flujo con alta velocidad (como en la región de salida del vórtice) y un paso de tiempo corto.

## 2.4. Postprocesamiento

El análisis de los resultados obtenidos a través de CFD consiste en identificar la duración del pulso que resulte en un mejor desempeño del vórtice anular. Para esto se evalúa la variación de la presión con respecto al tiempo en el centro del ducto de salida en la posición axial donde ocurre el cambio de diámetro. Además, se calculan líneas de traza evaluadas para las mismas posiciones dentro del dominio para conocer la evolución del anillo de vórtice.

Para asegurar las mismas condiciones en la comparación, la línea de traza se genera con 10 puntos colocados a la salida del ducto de diámetro menor y únicamente se contemplan las partículas expulsadas en la duración del pulso. Se compara la distancia recorrida por el anillo de vórtice en distintos instantes de tiempo siendo  $t_p$  la duración del pulso, se evalúan líneas de traza para  $t=t_p$ ,  $t=1.5t_p$ ,  $t=2t_p$  y finalmente, para todos los casos, para  $t=5s$ .

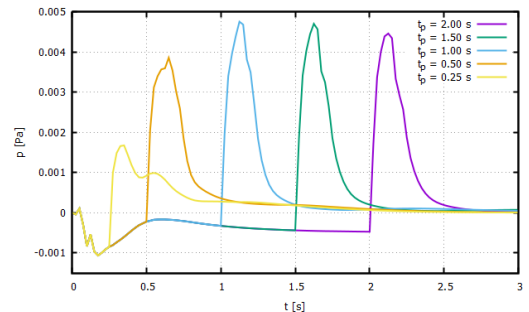
También se presentan los contornos de velocidad, contornos de presión, contornos de vorticidad y líneas de corriente para los tiempos mencionados anteriormente.

Asimismo, se evalúa el avance del vórtice anular y la masa de fluidos desprendido del mismo durante su avance.

## 3. Resultados y análisis

Para la geometría descrita sometida a las condiciones de frontera mencionadas en la sección anterior, se evalúa numéricamente la dinámica del flujo resultante. En la Fig. 3 se muestra la variación de la presión a la salida del ducto de diámetro menor para los 5 casos evaluados.

Se observa una variación de la presión durante la presencia del pulso que tiende a un valor estable. Sin embargo, al momento de existir el pulso, la presión se incrementa súbitamente para posteriormente descender hasta otro valor estable, superior al valor de tendencia durante el pulso.

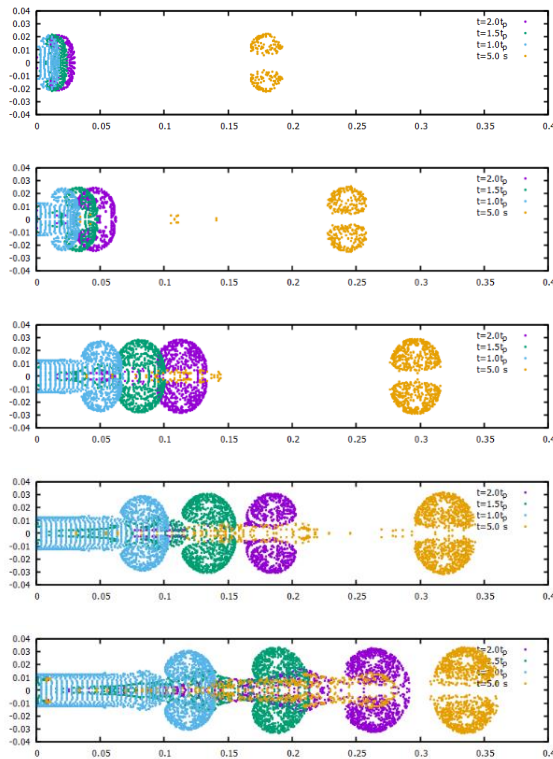


**Figura 3. Variación de la presión a la salida del ducto**

Para los pulsos de 2.0, 1.5 y 1.0 s se observa un comportamiento similar en la variación de la presión.

Esto es debido a que el pulso dio lugar a un flujo completamente desarrollado previo a su interrupción. Para el caso de  $t_p=0.50$  s, el pulso se interrumpe previo al desarrollo completo del flujo en el ducto de salida, muy cercano al valor de máxima presión, por lo que del desarrollo del anillo de vórtice resulta en una variación diferente en la presión. Finalmente, para el caso de  $t_p=0.25$  s, el pulso se interrumpe considerablemente antes del desarrollo completo del flujo en el ducto de descarga, por lo que un comportamiento con mayores variaciones se observa en la estela de presión que forma el anillo de vórtice. Resulta importante mencionar que existe una duración de pulso que logra la máxima presión en la región evaluada. Este valor es de 0.0049 Pa y se observa que para el pulso de 0.25 s, la presión lograda es el 36% de la presión máxima, para el pulso de 0.5 s la presión lograda es el 95% de la presión máxima. Para pulsos de mayor duración la presión lograda es del 99% y 97% de la presión máxima para pulsos de 1.5 s y 2 s

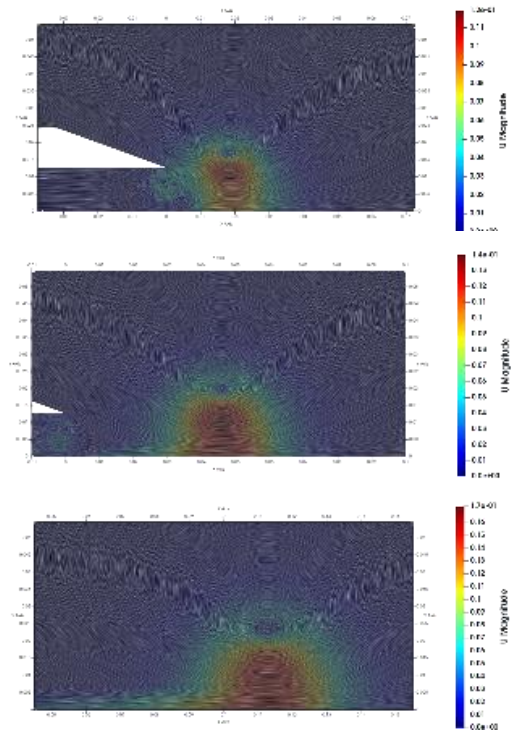
Durante el desarrollo del anillo de vórtice, estos efectos de la presión se manifiestan cuando se hace un seguimiento lagrangiano de las partículas expulsadas durante el pulso. En la Fig. 4 se muestran la posición de las partículas expulsadas durante el pulso para diferentes tiempos expresados en múltiplos de la duración del pulso, así como un tiempo fijo de 5 s (en color amarillo) para poder comparar condiciones en términos de un tiempo característico de cada caso, así como un tiempo global.



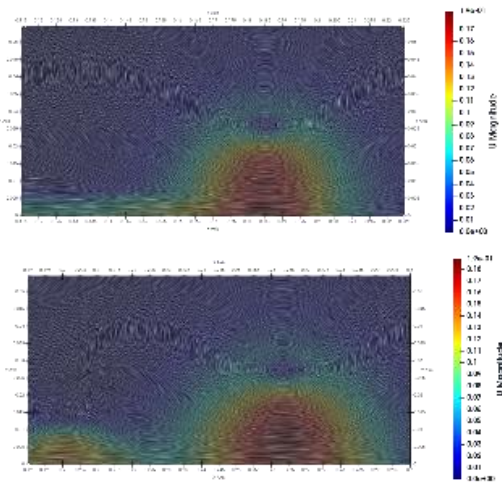
**Figura 4. Seguimiento lagrangiano de partículas expulsadas durante el pulso.**

Se observa que para los casos correspondientes a  $t_p$  de 0.25 s y 0.50 s, en los cuales el corte del pulso ocurre previo al desarrollo del flujo en el ducto de diámetro de descarga, prácticamente la totalidad de las partículas expulsadas durante el pulso se encuentran en el anillo de vórtice al tiempo de 5 s. Por otro lado, los casos correspondientes a  $t_p$  de 1.00 s, 1.50 s y 2.00 no conservan la totalidad de sus partículas una vez que el anillo de vórtice se desarrolla, dejando una estela de mayor intensidad conforme la duración del pulso incrementa. De igual manera, a medida que el pulso es mayor, el tamaño del vórtice, aun con la pérdida de partículas, se va incrementando, además de recorrer mayores distancias. Estos comportamientos muestran una tendencia a valores máximos, ya que el tamaño y el recorrido del vórtice para  $t_p$  de 1.5 s y 2.0 s son muy similares.

En la Fig. 5 se muestran los contornos de velocidad correspondientes al tiempo  $2.0 t_p$ . Además, se muestran las líneas de corriente correspondientes a dicho tiempo. La región mostrada en esta Figura corresponde al espacio en el cual se ubica el anillo de vórtice en ese instante de tiempo







**Figura 5. Contornos de velocidad y líneas de corriente para  $t=2t_p$ .**

La rotación del vórtice en el plano mostrado es en sentido antihorario. La velocidad de mayor magnitud se observa en la dirección radial más cercana al eje de simetría. Esto se debe a que se suma la velocidad causada por la rotación del flujo y la del desplazamiento lineal del anillo de vórtice.

#### 4. Conclusión

En este estudio se evalúa el efecto de la duración del pulso para la formación de un anillo de vórtice. Considerando las mismas condiciones geométricas y dinámicas se evaluaron diferentes duraciones de pulso para la formación del anillo de vórtice.

Se observa que existe una relación directa entre la duración del pulso y el desarrollo del flujo en el ducto de formación del vórtice. Si bien es cierto que, al alcanzar el desarrollo completo del flujo en esta región, el comportamiento de presión es muy similar, el fluido acumulado y desplazado por el vórtice tiende a un valor fijo. Por lo tanto, posterior a cierta duración del pulso, el transporte de fluido pierde efecto y se observan partículas rezagadas al evaluar un seguimiento lagrangiano de partículas.

Considerando la presión en la región de salida del vórtice, la presión máxima lograda ocurre para el pulso de 1 s de duración, con un valor de 0.0049 Pa. Este valor disminuye rápidamente conforme la duración del pulso se reduce siendo del 36% y 95% para pulsos de 0.25 s y 0.5 s. Mientras que para pulsos mayores este decremento ocurre con un ritmo notoriamente menor siendo de 99% y 97% para pulsos de 1.5 s y 2 s respectivamente. Sin embargo para los caso de mayor duración, la presencia de desprendimiento de masa de fluido del vórtice reduce la

eficiencia de propulsión, haciendo imperante no exceder la duración del pulso óptimo.

Para este caso particular, el desarrollo del flujo se logra en alrededor de 1.5 s, mientras que al tiempo cercano a 0.6 s el flujo alcanza su menor velocidad a la salida del ducto ( y por lo tanto su mayor presión). Es alrededor de este tiempo en el que se observa el mejor desempeño del anillo de vórtice si se evalúa el transporte de masa y la distancia recorrida por el anillo.

#### REFERENCIAS

- [1] ZHANG, Xiaosong; WANG, Jianhua; WAN, Decheng. CFD investigations of evolution and propulsion of low speed vortex ring. *Ocean Engineering*, 2020, vol. 195, p. 106687.
- [2] KHRAMTSOV, I. V., et al. Investigation of vortex ring formation with account of generator piston motion. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. p. 012045.
- [3] CHENG, M.; LOU, J.; LIM, T. T. Motion of a vortex ring in a simple shear flow. *Physics of Fluids*, 2009, vol. 21, no 8, p. 081701.
- [4] HUSSAIN, KT Ijas; JOTHI, T. J. S. Vortex ring propagation and interactions studies. *Sādhanā*, 2018, vol. 43, p. 1-11.
- [5] KRIEG, Michael; MOHSENI, Kamran. Thrust characterization of a bioinspired vortex ring thruster for locomotion of underwater robots. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, vol. 33, no 2, p. 123-132.
- [6] JIAN, Li; JIANING, Zhao; ZHENLONG, Wang. Cfd simulation of effect of vortex ring for squid jet propulsion and experiments on a bionic jet propulsor. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, 2016, vol. 9, no 5, p. 211-226.
- [7] DABIRI, John O.; GHARIB, Morteza. The role of optimal vortex formation in biological fluid transport. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, vol. 272, no 1572, p. 1557-1560.
- [8] KRUEGER, Paul S., et al. Vortex rings in bio-inspired and biological jet propulsion. *Advances in science and technology*, 2009, vol. 58, p. 237-246.
- [9] RUIZ, Lydia A.; WHITTLESEY, Robert W.; DABIRI, John O. Vortex-enhanced propulsion. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, vol. 668, p. 5-32.