

# ESTUDIO NUMÉRICO DEL FLUJO VISCOSO ALREDEDOR DE UN CILINDRO CON OPENFOAM: COMPARACIÓN ENTRE DOS DOMINIOS MALLADO

Artículo arbitrado 22

Edición 16

Alfredo Villanueva<sup>1</sup>, Uzziel Caldiño Herrera<sup>2</sup>, Carlos Alberto Gómez<sup>3</sup> y Manuel Alejandro Lira Martínez<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Universidad Autónoma de  
Ciudad Juárez  
Instituto de Ingeniería y Tecnología, Av. del  
Charro 450 Nte. Col. Partido Romero  
Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C.P.  
32310.  
uzziel.caldino@uacj.mx



Recibido: Marzo 8, 2021.

Recibido en forma revisada: Junio 7, 2021.

Aceptado: Junio 10, 2021.

**Resumen:** El flujo alrededor de un cilindro ha sido objeto de estudio por más de un siglo. En él se encuentran fenómenos como la formación de vórtices, el desprendimiento de capa límite, gradientes adversos de presión, entre muchos otros. Debido a la simplicidad en sus condiciones de frontera sirve como un referente para la validación de métodos y esquemas numéricos. En este trabajo se evalúa la diferencia entre simular numéricamente este problema bajo dos dominios distintos; un dominio circular que facilita la generación de un mallado estructurado y un dominio rectangular que requiere un menor tamaño, pero complica la generación del mallado estructurado. Usando OpenFOAM y esquemas numéricos iguales para ambos casos se encuentra que hay menor variación entre los resultados numéricos (1.3% para el dominio circular y 0.3% para el dominio rectangular) al disminuir el tamaño de la malla para el dominio rectangular. Además, se observa un mayor detalle en el desarrollo de la capa límite, lo que resulta de mayor interés para el estudio de fenómenos como el arrastre viscoso o la sustentación.

**+ Palabras clave:** Flujo externo, dinámica de fluidos computacional, capa límite, arrastre y sustentación.

**Abstract:** The flow past a cylinder has been studied for over a century. In this flow it is possible to find phenomena such as vortex formation, boundary layer detachment, adverse pressure gradients, among

others. Due to its simplicity for an experimental disposal it is a reference for validating numerical methods and schemes. In this paper a comparison between two geometrical domains for a flow past a cylinder is performed: a circular domain ease the generation of a structured mesh, while a rectangular domain is smaller, but requires more detail to get a structured mesh. Using OpenFOAM for solving the flow with identical numerical schemes and boundary conditions for both cases, a lesser variation in results is observed as mesh size decreases for rectangular mesh (0.3%) than for circular mesh (1.3%). It is also noticed a greater detail in boundary layer formation, which leads to more information for the viscous phenomena study.

+ **Keywords:** *External flow, computational fluid dynamics, boundary layer, lift and drag.*

## Introducción

El flujo alrededor de un cilindro es un problema de la mecánica de fluidos que ha sido sujeto de investigación a través de estudios analíticos, numéricos y experimentales por más de un siglo. A pesar de la simplicidad en las condiciones de frontera que existen en este problema, se pueden observar, estudiar y analizar diferentes fenómenos como capa límite y su desprendimiento, formación de vórtices y desprendimiento, así como la estela cercana y lejana (Noack, 1999).

Este problema aún representa un reto importante en la mecánica de fluidos y sus aplicaciones se extiende tanto para el aprovechamiento del fenómeno en problemas de mezclado o transferencia de calor en intercambiadores, como en evitarlo debido a sus implicaciones en problemas de aeroelasticidad (Rajani, Kandasamy y Majumdar, 2009). El flujo alrededor de un cilindro es un caso de estudio que permite la validación de técnicas experimentales y de simulaciones numéricas ya que existe una gran cantidad de datos disponibles en la literatura.

Dependiendo del número de Reynolds ( $Re$ ) el fenómeno observado aguas abajo del cilindro puede ser un flujo sin separación ( $Re < 5$ ), un par de vórtices fijos ( $5 < Re < 40$ ), desprendimiento de vórtices ( $40 < Re < 200$ ), transición a flujo turbulento en la estela ( $200 < Re < 300$ ) o estela completamente turbulenta ( $Re > 300$ ). Y fenómenos como la separación de capa límite o la periodicidad de los vórtices depende del régimen en el que se encuentre el flujo (Sumer y Fredsoe, 2006).

Para este estudio se hace uso del software libre OpenFOAM (Weller y Tabor, 1998), el cual permite, a través del método de volumen finito, implementar diferentes esquemas numéricos ya programados o incluso modificarlos o crear los propios de acuerdo con las necesidades del problema a resolver. Para el caso del flujo laminar alrededor de un cilindro el solver icoFoam se adapta adecuadamente ya que está diseñado para problemas de flujo incompresible, laminar y en estado transitorio.

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de un flujo laminar, incompresible son la ecuación de continuidad y la ecuación de momentum.

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

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

La solución numérica de estas ecuaciones se lleva a cabo por el método de volumen finito en OpenFOAM a través de algoritmos que se adaptan a las condiciones del flujo. Como ejemplo, para flujo incompresible existe icoFoam que resuelve régimen transitorio para flujo incompresible y laminar en fluidos newtonianos. También se cuenta con pimpleFoam que resuelve régimen transitorio para flujo incompresible y turbulento para mallas dinámicas. Asimismo, existe el solver simpleFoam que resuelve régimen estacionario para flujo incompresible y turbulento.

En la actualidad se realizan una gran cantidad de trabajos de investigación para ampliar el conocimiento de los fenómenos que ocurren en el flujo alrededor de un cilindro. En el ámbito experimental se puede mencionar la realizada por (Zhao, Jacono, Sheridan, Hourigan y Thompson, 2018), en donde se estudia la vibración inducida en un cilindro circular montado de manera elástica y sujeto a rotación axial en una corriente libre. Los autores encontraron a través de la técnica de PIV una correlación entre la frecuencia de los vórtices, la rotación del cilindro y la vibración inducida. Asimismo, identificaron las condiciones que suprimen la vibración de acuerdo con la rotación y la velocidad del flujo.

En el área de flujo compresible (Nagata y otros, 2020), estudiaron el flujo compresible alrededor de un cilindro en un túnel de viento de baja densidad a través de medición de presión y fuerza y de la visualización Schlieren. Observaron un cambio considerable en los efectos del número de Mach a partir del  $Re = 3000$ . Detectaron que la onda de inestabilidad oblicua en la región de desprendimiento de capa límite es causada por los efectos de compresibilidad y esto afecta a los vórtices desprendidos.

En la parte numérica trabajos como los de (BowenFu, Zou y Wan, 2018), (Hamid y otros, 2020) y (Da Silva, Luciano, Utzig y F.Meier, 2019), muestran la implementación de esquemas numéricos adaptados para condiciones específicas de una problemática particular como el estudio de combustibles de alta viscosidad o las vibraciones inducidas por vórtices de un cilindro flexible.

La importancia de los estudios numéricos radica en lo accesible que resultan desde el punto de vista económico. Ya que el costo del diseño, montaje, mantenimiento y operación de un banco de pruebas instrumentado resulta por mucho, más costoso que un equipo de cómputo con la capacidad necesaria para simulaciones numéricas. Además, los modelos y esquemas numéricos implementados para un caso de estudio particular pueden ser validados con la información experimental disponible en la literatura.

En este trabajo se lleva a cabo un estudio numérico en 2 dimensiones del flujo alrededor de un cilindro en régimen laminar ( $Re = 25$ ), utilizando el software libre OpenFOAM. Este régimen de flujo resulta en un par de vórtices simétricos detrás del cilindro que no se desprenden (Sumer y Fredsoe, 2006). Bajo el mismo esquema de solución (modelo numérico, condiciones de frontera y discretización temporal) se evalúan dos diferentes tipos de dominio, uno circular y otro rectangular. Se comparan algunos parámetros del flujo como las dimensiones de la zona de recirculación y condiciones de velocidad en algunas regiones geométricas de interés. Finalmente se evalúa la variación de estos parámetros. Asimismo, se comparan los tiempos de cómputo para determinar que dominio se ajusta mejor para la solución de este caso

## Metodología

Este análisis se divide en tres diferentes etapas: generación del dominio geométrico, discretización del dominio, definición del esquema numérico, solución y análisis de resultados.

### Geometría del dominio

El dominio consiste en la región de fluido que rodea al cilindro hacia todas las direcciones sobre la cual se resuelven las ecuaciones de gobierno. Para simplificar la ubicación de cualquier punto del dominio, el origen del sistema coordenado se ubica en el centro del cilindro y se utiliza al diámetro del cilindro como la dimensión característica de este análisis.

El primer caso consiste en un dominio rectangular alrededor del cilindro con las siguientes dimensiones: 23 diámetros de largo por 10 diámetros de altura. El centro del cilindro se encuentra ubicado a 3 diámetros de la entrada del flujo y a 20 diámetros de este.

El segundo caso consiste en un dominio circular conteniendo al cilindro justo en el centro. El radio del dominio circular es de 18 diámetros para poder visualizar los efectos dinámicos del flujo aguas abajo del cilindro. En la Figura 1, se muestran de manera esquemática las dimensiones en términos de la dimensión característica, que es el diámetro del cilindro. Para el presente caso de estudio se establece que un diámetro del cilindro de 0.1 m.

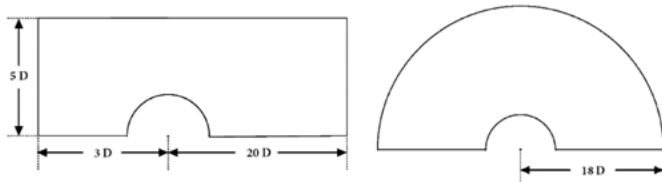


Figura 1. Dimensiones generales de los dos dominios de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

### Discretización del dominio

Ambos dominios se discretizan a través de un mallado por bloques con el fin de lograr un mallado estructurado. Para obtener una densidad de malla mayor en la vecindad del cilindro, los bloques se organizan según se muestra en la Figura 2, siendo que para el dominio rectangular se emplean 10 bloques y para el dominio circular solo dos bloques.



Figura 2. Bloques para el mallado de cada dominio geométrico.

Fuente: Elaboración propia.

La discretización o mallado por bloques se lleva a cabo la dividir de la misma manera todos los vértices paralelos de los bloques contiguos. La densidad de la malla se define con una función en la distribución de las divisiones a lo largo de los vértices. De esta manera es posible controlar el número de celdas en el dominio discretizado.

Para el dominio rectangular existen 6 vértices en los que se determina el número de divisiones y la relación de aspecto de estas, mientras que para el dominio circular únicamente se controlan 2 vértices. En la Figura 2, se muestran estos vértices para cada dominio resaltando con el mismo color los vértices que deben tener las mismas condiciones tanto en el número de divisiones como en la relación de aspecto. Para lograr un mallado más fino en la región cercana al cilindro se define una relación de aspecto en los bloques que coinciden con el cilindro. En el caso del dominio rectangular son 4 los bloques que coinciden con el cilindro y son independientes del resto del dominio. Para el dominio circular son los 2 bloques que componen el dominio los que están en contacto con el cilindro. Esto facilita la discretización del dominio circular.

En la Tabla 1, se muestran las relaciones de aspecto empleadas en los bloques de cada dominio para la direcciones radial y tangencial al cilindro, así como para los alrededores. Independientemente del número de elementos, la relación de aspecto se mantiene fija para asegurar la densidad de malla en la cercanía del cilindro.

Tabla 1. Relación de aspecto en la malla.

Dirección	Relación de aspecto	
	Dominio circular	Dominio rectangular
Radial	10	10
Alrededor (vertical)	[-]	4
Alrededor (horizontal)	[-]	6

Fuente: Elaboración propia.

### Esquema numérico y solución

Para llevar a cabo la solución de las ecuaciones de gobierno se utilizó el solver icoFoam, que emplea el método PISO y es adecuado para resolver flujo laminar e incompresible en estado transitorio para fluidos newtonianos (OpenFOAM, 2012).

La discretización temporal se definió a partir de la malla más fina, con el fin de lograr un tiempo de residencia en el volumen finito que no afecte a la solución del fenómeno advectivo. De acuerdo con las dimensiones geométricas y la velocidad en la entrada del dominio, el estudio se llevó a cabo para un tiempo de 20 segundos, con un paso de tiempo  $\Delta t = 1E-04$  s. Para evitar el exceso de archivos generados durante el cómputo, solo se almacenaron los resultados cada 1000 pasos de tiempo.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{u_{\infty}} \quad (3)$$

Las condiciones de frontera se ajustan de acuerdo con cada uno de los dominios geométricos, definiendo una entrada, una salida y la región del cilindro. Para la entrada, se impone una condición de velocidad uniforme de 0.1 m/s en dirección horizontal. Para la salida se impone una condición de velocidad de gradiente cero y una presión uniforme de cero  $P_a$ . Además, el dominio rectangular contiene dos regiones geométricas adicionales, que son la pared superior y la pared inferior. A estas regiones se les impuso una condición de simetría para evitar extender aún más el dominio en esta dirección.

Tabla 2. Condiciones de frontera.

Región geométrica	Condición
Entrada	Velocidad - 0.1 m/s
Salida	Presión - Gradiente cero
Pared superior e inferior	Simetría

Fuente: Elaboración propia.

La solución a través del solver icoFoam resulta en la evolución del flujo y la formación de una zona de recirculación que contiene a dos vórtices simétricos los cuales no se desprenden. La zona de recirculación se define por su longitud  $L$ , que es la distancia desde el centro del cilindro hasta el punto de cierre en la dirección de la corriente de flujo, la distancia  $a$  se mide desde el centro del cilindro hasta el centro del vórtice y  $b$  es la distancia entre los centros del par de vórtices. La Figura 4, muestra un diagrama esquemático de la zona de recirculación.

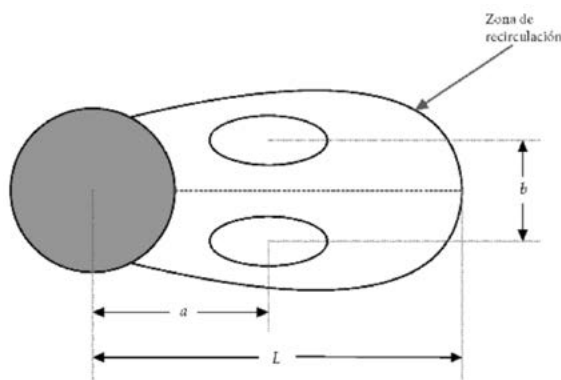


Figura 3. Diagrama esquemático de la zona de recirculación.

Fuente: Elaboración propia.

Como parte del análisis se identifica el tiempo que le toma al flujo desarrollar por completo la zona de recirculación, así como los parámetros de esta para cada uno de los dominios en las diferentes mallas estudiadas. Asimismo, se identifican las regiones con mayor velocidad y vorticidad respectivamente para evaluar la variación de dichos puntos con respecto al tiempo. Al analizar estos parámetros en un análisis de

convergencia de malla se puede definir hasta que punto es necesario aumentar el número de elementos y al compararlo entre los dos dominios estudiados, se determina que caso resulta más efectivo desde el punto de vista de costo computacional.

## Resultados y análisis

El análisis numérico del flujo alrededor de un cilindro bajo las condiciones descritas en la sección anterior se realizó para 6 diferentes discretizaciones: 3000, 5000, 8400, 11200, 16000 y 20000 elementos. En la Figura 4, se muestra la región cercana al cilindro para las mallas de 20,000 elementos de ambos dominios. En ambos casos se puede observar la relación de aspecto correspondiente y la diferencia en los bloques utilizados de un dominio a otro. Debido a su geometría, el mallado en el dominio circular es más simple que el del dominio rectangular, el cual requiere un mayor número de bloques. Sin embargo, se tiene un mayor control en el número de elementos.

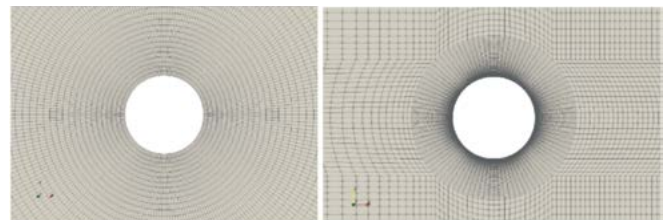


Figura 4. Mallado en la cercanía del cilindro para dominio circular y rectangular. Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de cómputo es un factor de gran importancia en el cálculo numérico. En la Tabla 3 se muestran los tiempos de cómputo para cada tipo de dominio según el número de elementos en la malla.

Tabla 3. Tiempo de solución para los casos evaluados.

No. de elementos	Tiempo de solución Dominio circular	Tiempo de solución Dominio rectangular
20,000	8,292 s	19,876 s
16,000	6,784 s	13,222 s
11,000	4,158 s	8,289 s
8,000	2,901 s	5,969 s
5,000	1,610 s	2,918 s
3,000	961 s	1,026 s

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5, se muestra el campo de velocidad para todo el dominio en ambos casos de estudio para la malla con mayor número de elementos y para el último tiempo evaluado, es decir  $t=20$ .

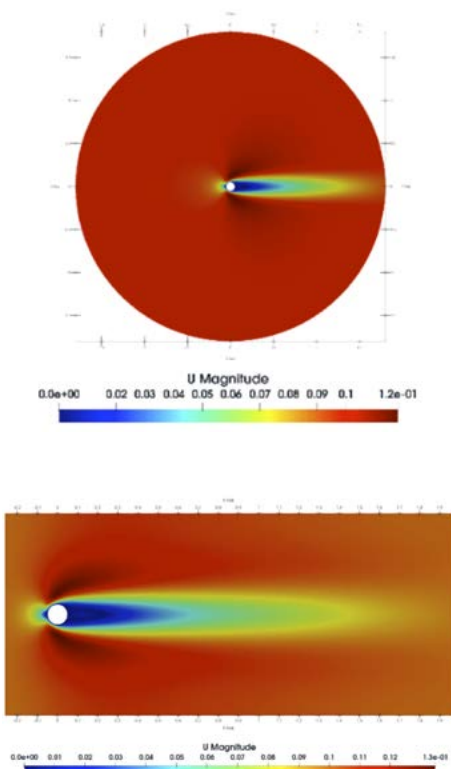


Figura 5. Contornos de velocidad para los dos dominios.  
Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, las Figuras. 6 y 7 muestran los campos de presión y vorticidad para las mismas condiciones. Se observa que, para el dominio circular, debido a su simetría, la mitad izquierda del dominio no captura los efectos del flujo sobre el cilindro.

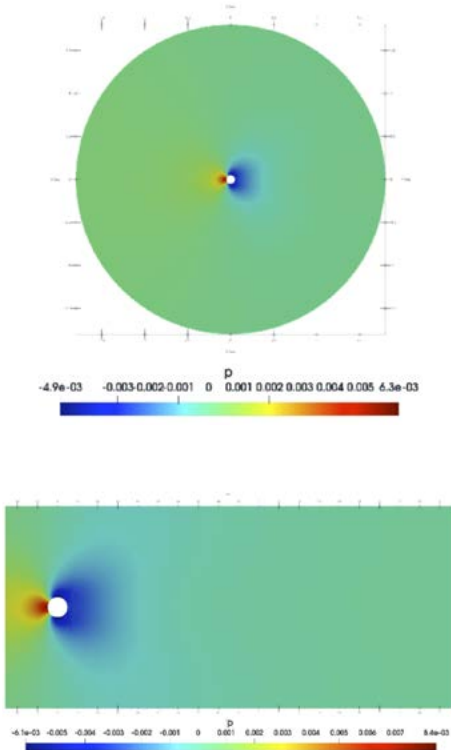


Figura 6. Contornos de presión para los dos dominios.  
Fuente: Elaboración propia.

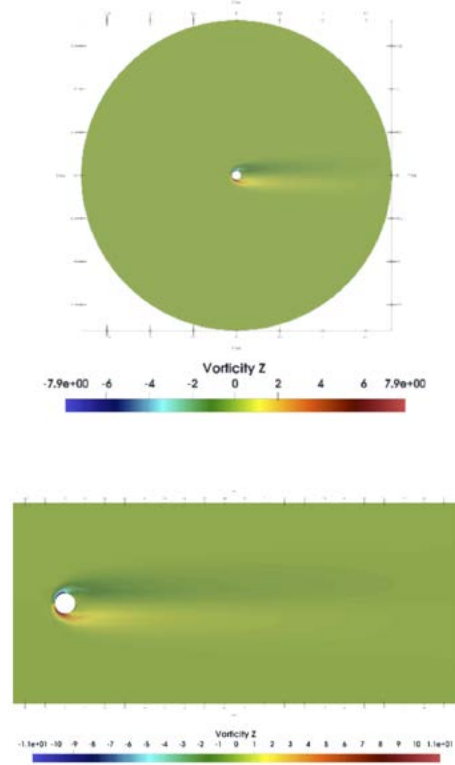


Figura 7. Contornos de vorticidad para los dos dominios.  
Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la comparación entre los resultados de resolver con un dominio circular o un dominio rectangular, se evalúa la zona de recirculación, la variación de presión y velocidad en una línea vertical que atraviesa el centro de los vórtices, la variación de presión y velocidad sobre una línea vertical que se extiende desde la superficie del cilindro hasta un diámetro por encima y la variación de la presión y velocidad en el punto correspondiente a la máxima velocidad en el dominio para el último tiempo evaluado. En la Figura 8, se muestran los vórtices formados en la zona de recirculación para las mallas con mayor número de elementos evaluadas en el último paso de tiempo ( $t=20$  s).

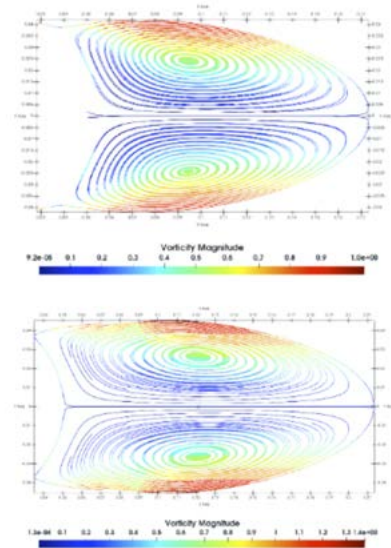


Figura 8. Zona de recirculación.  
a) Dominio circular, b) Dominio rectangular.  
Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones en la zona de recirculación son mayores para el dominio rectangular. En la Tabla 4, se muestran las características de la zona de recirculación para ambos dominios de acuerdo con las diferentes mallas evaluadas y para el último paso de tiempo calculado.

Tabla 4. Características de la zona de recirculación.

Malla [celdas]	Dominio circular			Dominio rectangular		
	L [m]	a [m]	b [m]	L [m]	a [m]	b [m]
3,000	0.1670	0.0902	0.0485	0.2060	0.1212	0.0518
5,000	0.1705	0.0924	0.0486	0.2098	0.1196	0.0511
8,000	0.1720	0.0939	0.0480	0.2122	0.1201	0.0522
11,000	0.1725	0.0943	0.0481	0.2129	0.1210	0.0521
16,000	0.1725	0.0942	0.0479	0.2050	0.1212	0.0527
20,000	0.1735	0.0945	0.0484	0.2135	0.1211	0.0526

Fuente: Elaboración propia.

La relación entre el centro del vórtice y la longitud de la zona ( $a/L$ ) varía un valor de 0.007 para el dominio circular y entre 0.025 para el dominio rectangular. Mientras que la relación entre la distancia entre centros y la longitud de la zona ( $b/L$ ) varía 0.01 para el dominio circular y 0.08 para el dominio rectangular.

La ubicación donde ocurre la velocidad máxima en  $t=20$  para los dos dominios y las diferentes mallas evaluadas se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Ubicación y magnitud de velocidad máxima.

Malla [celdas]	Dominio circular		Dominio rectangular	
	Magnitud [m/s]	Ubicación [x,y]	Magnitud [m/s]	Ubicación [x,y]
3,000	0.1169	(0.0340,0.1325)	0.1341	(0.0000,0.1000)
5,000	0.1174	(0.0199,0.1258)	0.1342	(0.0000,0.11004)
8,000	0.1179	(0.0229,0.1263)	0.1344	(0.0078,0.1085)
11,000	0.1180	(0.0193,0.1227)	0.1345	(0.0000,0.1078)
16,000	0.1171	(0.0130,0.1099)	0.1346	(0.0000,0.10707)
20,000	0.1164	(-0.0234,0.1266)	0.1346	(0.0000,0.10591)

Fuente: Elaboración propia.

Para el dominio circular la magnitud de la velocidad máxima varía hasta en 1.35% con respecto al mayor valor obtenido, mientras que su posición varía 0.57 D en la dirección x y 0.22 D en la dirección y. Para el dominio rectangular la magnitud de la velocidad varía hasta en 0.3% con respecto al mayor valor obtenido, mientras que su posición varía 0.078 D en dirección x (solo en una de las mallas) y 0.01 D en la dirección y.

En las Figuras 9 y 10, se muestra el perfil de presión y velocidad en una línea vertical de longitud igual al diámetro del cilindro que atraviesa por el centro de los vórtices para las mallas evaluadas en los dominios circular y rectangular respectivamente.

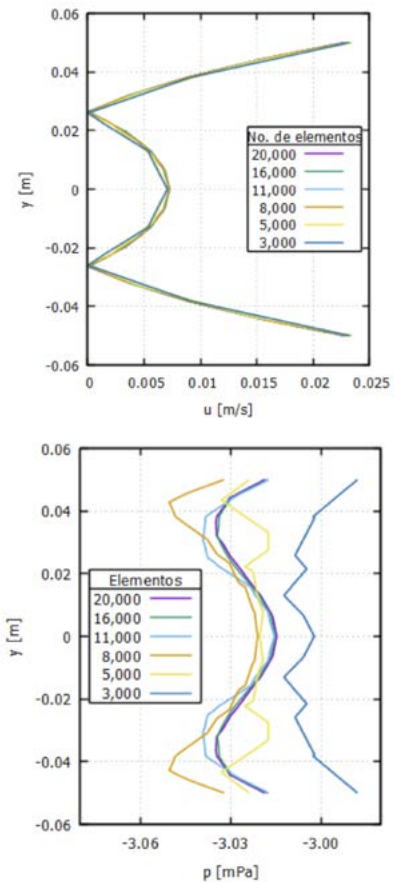


Figura 9. Perfil de velocidad y presión para dominio rectangular.

Fuente: Elaboración propia.

La comparación del perfil de velocidad en el dominio rectangular arroja muy pequeñas variaciones a lo largo de la línea en la que se evalúa. Sin embargo, la distribución de la presión muestra variaciones significativas tanto en la magnitud como en el comportamiento a lo largo de la línea evaluada. Únicamente las mallas de 20, 16 y 11 mil elementos mantienen el mismo comportamiento.

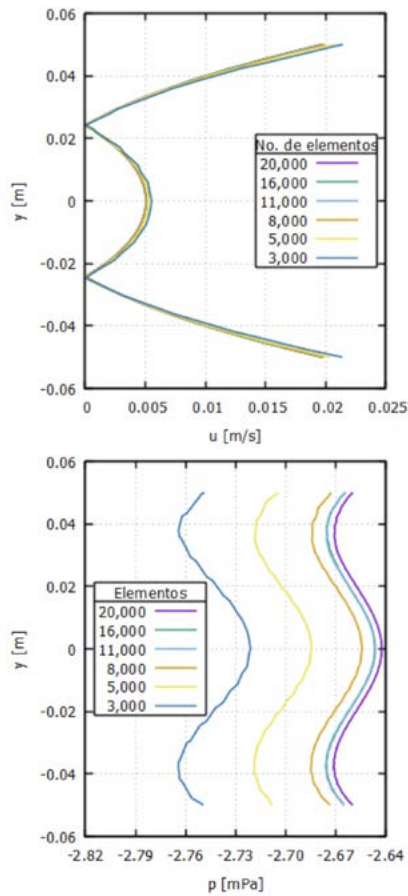


Figura 10. Perfil de velocidad y presión para dominio circular.  
Fuente: Elaboración propia.

En el caso del dominio circular, el perfil de velocidades muestra un comportamiento similar en cada una de las mallas evaluadas, a excepción de la malla de 16 mil elementos, que para la velocidad en las distancias más alejadas de los vórtices presenta un mayor valor que en el resto de las mallas. Respecto a la presión se presenta el mismo comportamiento a lo largo de la línea evaluada pero los valores difieren de una malla a otra. Esta diferencia es más evidente para las mallas de 5 y 3 mil elementos.

El perfil de velocidad sobre una línea vertical con origen en el cilindro y que se extiende una distancia de  $ID$  se muestra en la Figura 11, para el dominio rectangular y circular con sus respectivas mallas. Se observa como existe una menor variación de la capa límite para el caso del dominio rectangular.

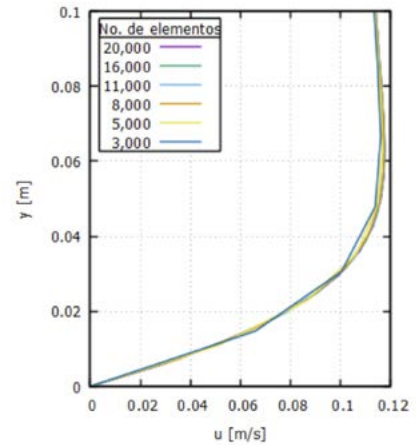
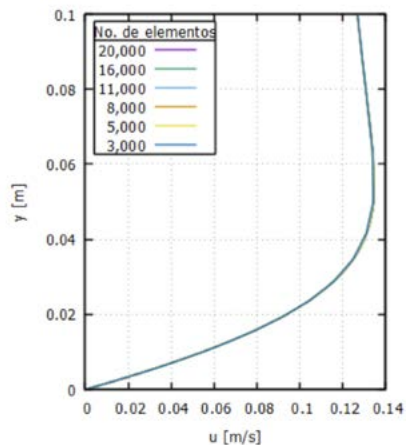


Figura 11. Perfil de velocidad en la capa límite  
a) Dominio rectangular, b) Dominio circular.  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 12, se muestra la variación con respecto al tiempo de la velocidad en un punto fijo del dominio. Este punto corresponde al mostrado en la Tabla 5 para cada dominio y malla.

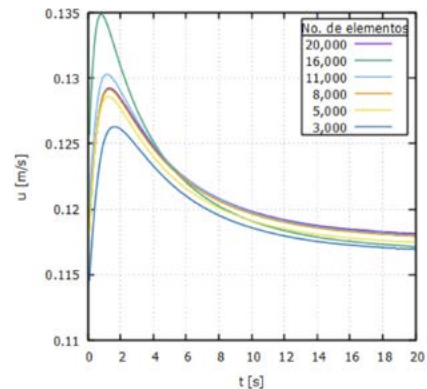
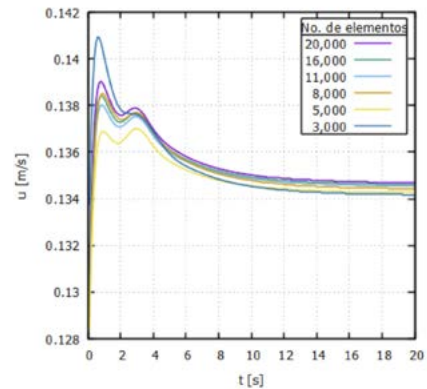


Figura 12. Variación de la velocidad máxima con respecto al tiempo para a) Dominio rectangular b) Dominio circular.  
Fuente: Elaboración propia.

Se observa un comportamiento diferente entre la variación de la velocidad en el dominio rectangular y en el dominio circular. Además, para cada dominio se observa una variación significativa en la magnitud correspondiente al punto más alto de la velocidad. Para el dominio rectangular solo las mallas de 3,000 y 5,000 elementos muestran variaciones significativas, mientras que para el dominio circular son las mallas de 16,000 y 3,000 elementos las que muestran valores muy por encima de lo esperado.

## Conclusión

Se realizó una comparación entre dos geometrías del dominio para el mismo caso de estudio: el flujo alrededor de un cilindro para  $Re = 25$ . Para cada caso se realizó un estudio de convergencia de malla considerando mallas de 20 mil, 18 mil, 11 mil, 8 mil, 5 mil y 3 mil elementos.

Comparando perfiles de velocidad en la zona de recirculación y en la cercanía del cilindro, así como las dimensiones de la zona de recirculación y la variación de la velocidad máxima con respecto al tiempo se determinó que dominio resulta más adecuado para el modelado numérico de este caso de estudio. Se concluyó que el dominio rectangular ofrece los mejores resultados hasta una malla de 8 mil elementos. Para mallas de menos elementos la variación en los resultados aumenta considerablemente. Este efecto ocurre de manera más marcada en el dominio circular, en donde existe una variación de hasta 1.35% en la magnitud máxima de la velocidad entre una malla y otra, mientras que para el dominio rectangular esta variación es del 0.3%.

La principal ventaja de la malla circular es su simplicidad topológica para lograr un mado estructurado, lo que resulta en un menor tiempo de cómputo. Sin embargo, una malla de 8 mil elementos implica que únicamente la mitad de esos elementos se avocan a la región de interés debido a que más de la mitad del dominio geométrico corresponde a los alrededores y aguas arriba del problema. Por lo tanto, la densidad de malla que en un dominio rectangular es de 8 mil elementos, resulta en una malla de 16 mil elementos para el dominio circular, lo que resulta en un tiempo de cómputo aún mayor que en caso del dominio rectangular.

Conocer que se obtienen resultados con menor variación en un dominio rectangular permite elegir esta condición para estudios sobre geometrías más complejas con un menor número de elementos, lo que reduce el tiempo de cómputo y hace más eficiente el proceso de solución.

Como trabajo futuro se tiene pensado implementar un método numérico desarrollado por el equipo de investigación del Laboratorio de Aeronáutica de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez para el flujo alrededor de un cilindro cuadrado. Validado sus resultados para los casos laminar y turbulento será posible posteriormente estudiar el caso particular de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus y evaluar las condiciones de operación nominal y también el arranque de la misma, comparando diferentes perfiles aerodinámicos y mecanismos para variar el ángulo de ataque y su influencia en el desempeño aerodinámico.

## Símbolos

$a$	Distancia al centro del vórtice	(m)
$b$	Distancia entre centros de vórtices	(m)
$L$	Longitud de la zona de recirculación	(m)
$u$	Velocidad	(m/s)
$p$	Presión	(Pa)

## Bibliografía

1. BowenFu, Zou, L. y Wan, D. (2018). Numerical study of vortex-induced vibrations of a flexible cylinder in an oscillatory flow. *Journal of Fluids and Structures*, 170-181.
2. Da Silva, B. L., Luciano, R. D., Utzig, J. y F.Meier, H. (2019). Analysis of flow behavior and fluid forces in large cylinder bundles by numerical simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 209-226.
3. Hamid, M. F., Idroas, M. Y., Sa'ad, S., Heng, T. Y., Ma, S. C., Alauddin, Z. A., . . . Abdullah, M. K. (2020). Numerical Investigation of Fluid Flow and processes, 439.
4. Nagata, T., Noguchi, A., Kusama, K., Nonomura, T., Komuro, A., Ando, A. y Asai, K. (2020). Experimental investigation on compressible flow over a circular cylinder at Reynolds number of between 1000 and 5000. *Journal of Fluid Mechanics*.
5. Noack, B. (1999). On the flow around a circular cylinder. Part I: laminar and transitional. Supplement: Minisymposia University of Bremen, 223-226.
6. OpenFOAM (2012). *OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox Userguide*. OpenCFD Limited.
7. Rajani, B., Kandasamy, A. y Majumdar, S. (2009). Numerical simulation of laminar flow past a circular cylinder. *Applied Mathematical Modelling*, 1228-1247.
8. Sumer, B. M. y Fredsoe, J. (2006). *Hydrodynamics around cylindrical structures*. Denmark: World Scientific.
9. Weller, H. G. y Tabor, G. (1998). A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics*, 620-631.
10. Zhao, J., Jacono, D. L., Sheridan, J., Hourigan, K. y Thompson, M. C. (2018). Experimental investigation of in-line. *Journal of Fluid Mechanics*, 664-699.