

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA INTERACCIÓN AERODINÁMICA ENTRE CUERPOS INMERSOS PARA APLICACIONES DE COSECHA DE ENERGÍA DEL VIENTO

COMPUTATIONAL SIMULATION OF AERODYNAMIC INTERACTION BETWEEN BODIES FOR WIND ENERGY HARVESTING APPLICATIONS

Daniel S. Franco Lopera^a y Marcelo F. Valdez^{b,c} y Sergio Preidikman^d

^a*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47, B1900TAG, La Plata, Buenos Aires, Argentina, danielfrancoopera@gmail.com, <https://www.ing.unlp.edu.ar>*

^b*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina, mfvaldez@unsa.edu.ar, <https://www.ing.unsa.edu.ar>*

^c*Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional, CONICET, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina, <http://inenco.unsa.edu.ar>*

^d*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT), Universidad Nacional de Córdoba-CONICET, Av. Velez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, <http://www.inv.idit.efn.uncor.edu>*

Palabras clave: Interacción Aerodinámica, Cosecha de Energía, Vibraciones Inducidas por Vórtices, RANS, Interacción Fluido-Estructura

Resumen. Los dispositivos de cosecha de energía eólica representan una potencial alternativa a pequeñas baterías para alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia, tales como sensores inalámbricos, transeptores de radiofrecuencia, cámaras, etc. Entre los mecanismos de cosecha de energía, se destacan los basados en los fenómenos aeroelásticos de flutter y de vibraciones inducidas por vórtices. En este artículo, se analiza el fenómeno de vibraciones inducidas por vórtices en un arreglo de dos cuerpos inmersos en una corriente de aire. Se emplea el software OpenFoam para realizar las simulaciones de CFD. Se analiza la influencia de la separación entre los cuerpos sobre la frecuencia y la amplitud de la potencia transferida por el fluido al cuerpo móvil. El fin de este estudio es cuantificar la potencialidad de estas configuraciones para su aplicación en la cosecha de energía eólica.

Keywords: Aerodynamic Interaction, Energy Harvesting, Vortex-Induced Vibrations, RANS, Fluid-Solid Interaction

Abstract. Wind Energy harvesting devices represent a potential alternative to small batteries for powering low-consumption small electronic devices, such as wireless sensors, radiofrequency transeptors, small cameras, and so on. Amongst the various mechanisms of energy harvesting, those based on the aeroelastic phenomena of flutter and vortex-induced vibrations are the most popular. In this article, the vortex-induced vibrations phenomenon in an array of two bluff bodies immersed in an airflow is analyzed. OpenFoam is employed to carry out the CFD simulations. The influence of the spacing between the bodies on the frequency and the amplitude of the power transferred to the moving body by the fluid is analyzed. The goal of this study is to assess the potential of these arrays for wind energy harvesting applications.

1. INTRODUCCIÓN

Los cosechadores de energía son dispositivos que recolectan la energía del ambiente para transformarla en energía eléctrica. Dentro de aquellos que aprovechan la energía cinética del viento, podemos encontrar dos grandes categorías: los aerogeneradores con partes rotantes y los que utilizan vibraciones inducidas por el viento (He, Yang, & Jiang, 2018). Estos últimos dispositivos se caracterizan por valerse de diferentes fenómenos aeroelásticos, que en otros contextos suelen ser indeseados, como las vibraciones inducidas por vórtices (VIV), el galloping, el fluttering, entre otros.

El interés en el aprovechamiento de las vibraciones inducidas por vórtices para la generación de energía eléctrica mediante cosechadores de energía eólica ha crecido notoriamente en los últimos años (Machado, S. et al., 2020; Beltramo, E. et al., 2018; Tan, T, and Yan, S., 2016; Hobeck, J., and Inman, D., 2012; Litak, G. et al., 2012). En la actualidad, las aplicaciones prácticas de este tipo de dispositivos cosechadores se limitan a la alimentación de sensores inalámbricos y otros instrumentos de monitoreo de bajo consumo. Estos dispositivos representan una alternativa más sustentable a las baterías, principalmente en lugares remotos o de difícil acceso, ya que suelen requerir muy poco mantenimiento y pueden ser fácilmente miniaturizadas.

A pesar de la gran cantidad de investigaciones realizadas a la fecha, las potencias eléctricas que estos dispositivos pueden suministrar continúan siendo demasiado pequeñas para considerarse una tecnología madura (del orden de los miliWatts), lo cual limita considerablemente su aplicabilidad actual. Trabajos anteriores han explorado el uso de diferentes técnicas para aumentar la potencia neta generada por los cosechadores (Baoshou, Z. et al., 2017; Abdelmoula, H. et al., 2017; Hobbs, W., and Hu, D., 2012)

En este trabajo se analiza el fenómeno de la interferencia aerodinámica entre dos cuerpos inmersos en una corriente de aire. Uno de los cuerpos está fijo y actúa como obstáculo generador de vórtices y el otro, corriente abajo puede oscilar debido tanto a la influencia de los vórtices del cuerpo corriente arriba como por la propia naturaleza intermitente de la separación de flujo del mismo. Mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) realizadas con el software OpenFOAM se estudia la influencia de la separación entre los cuerpos sobre la amplitud y la frecuencia de las vibraciones inducidas sobre el cuerpo oscilante. Este estudio preliminar tiene por objetivo determinar la potencialidad de las configuraciones de múltiples cosechadores distribuidos espacialmente para incrementar la potencia total producida por el arreglo. OpenFOAM es un software de código abierto y distribución gratuita, ampliamente utilizado en la academia y en la industria.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

Para el estudio que se presenta en este trabajo se emplean dos cilindros A y B de igual diámetro $D=0.2$ m. Estos cilindros se encuentran inicialmente alineados sobre la dirección horizontal y separados por una distancia L entre sus centros. Ambos cilindros se encuentran dentro de un dominio computacional fluido rectangular de $31D$ de largo y $22D$ de ancho como se muestra en la Figura 1. Se analiza sólo la situación en dos dimensiones, por lo que la profundidad del dominio fluido es irrelevante. El fluido considerado es aire (fluido newtoniano) con una viscosidad cinemática $\nu = 1 \times 10^{-5}$ m²/s.

Para todos los casos analizados, el cilindro A permanece fijo y se varía la distancia L corriente abajo del cilindro B. El cilindro B tiene dos grados de libertad, correspondientes a las translaciones en la dirección vertical y y en la dirección horizontal x . La rotación del cilindro B está restringida. El cilindro B forma parte de un sistema estructural con rigidez y amortiguamiento como se muestra a la derecha de la Figura 1.

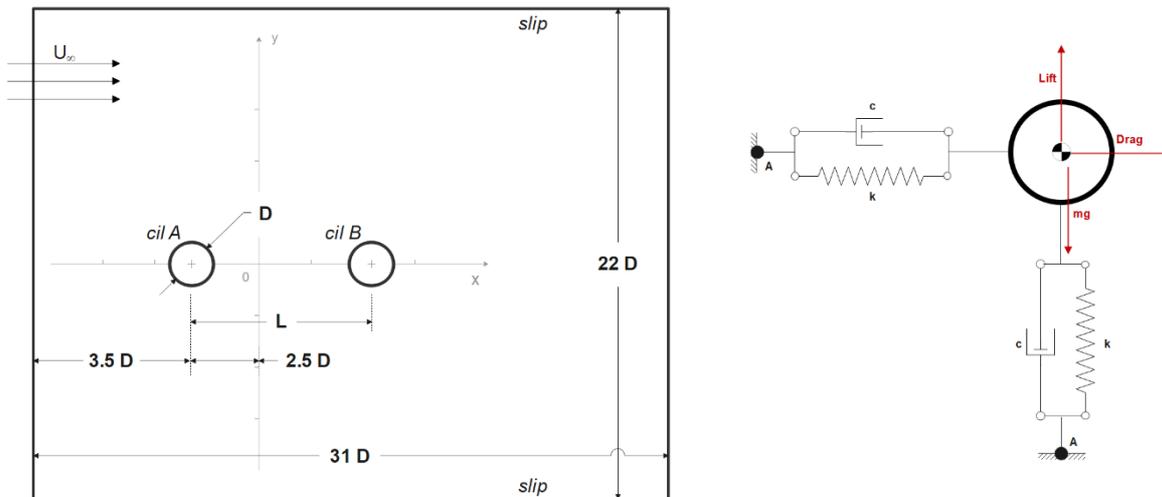


Figura 1: Izquierda Representación esquemática del dominio computacional y la geometría del sistema de cilindros para cosecha de energía. Derecha: Modelo estructural de los soportes del cilindro B.

En el presente trabajo se adoptan una masa $m = 0.08$ kg y los mismos valores de rigidez $k = 4000$ N/m y amortiguamiento $c = 0.02$ Ns/m en ambas direcciones x y y . Esto implica una frecuencia natural $f_n = 35.59$ hz para los modos de translación horizontal y vertical.

El flujo turbulento incompresible se simula empleando la estrategia RAS (Reynolds-Averaged Simulation). En particular, se utilizó el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), un modelo de dos ecuaciones, muy difundido en aplicaciones aerodinámicas. Se refiere al lector interesado en este modelo a la documentación de OpenFOAM¹.

Las condiciones de contorno del dominio fluido se definen como sigue:

- **Entrada del dominio (inlet):** se imponen un corriente uniforme con velocidad en la dirección $U_\infty=100$ m/s y la condición de gradiente nulo (*zeroGradient*) para la presión. Se adoptan distribuciones uniformes de la energía cinética turbulenta k y de la disipación turbulenta específica ω con valores de 37 m²/s² y 32 m²/s³. Esto corresponde a una intensidad de turbulencia del flujo de entrada de aproximadamente 4.97%.
- **Salida del dominio (outlet):** se imponen una presión uniforme igual a 0 y una condición de velocidad de tipo *inletoutlet* con valor 0 de inlet.
- **Superficies superior e inferior del dominio:** se impone una condición de deslizamiento (*slip*) para la velocidad. Esta condición establece que la componente de la velocidad normal a la superficie es nula. Para la presión se impone la condición de gradiente nulo (*zeroGradient*).
- **Superficies de los cilindros:** se impone la condición de no deslizamiento (*noSlip*) que anula la velocidad relativa entre el fluido y el sólido en todos los puntos de la misma. Para la presión se impone la condición de gradiente nulo (*zeroGradient*). Para las variables de turbulencia k y ω se emplean las funciones de pared y *kqWallFunction* y *omegaWallFunction*, respectivamente.

2.1 Generación de la malla de volúmenes finitos en OpenFoam

La generación de la malla se realiza en dos etapas. Con la utilidad *blockMesh* de OpenFOAM se crea una malla de fondo compuesta por hexaedros. Esta malla no tiene en cuenta la presencia los cilindros y su resolución no es necesariamente alta ya que se emplea para describir el flujo alejado de los cilindros. Esta malla de fondo consiste en 36 celdas de largo y 21 celdas de alto.

¹ <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html>

Luego, con la utilidad *snappyHexMesh* se realiza el mallado alrededor de los cilindros. La geometría de cilindros es provista en forma de un archivo en formato *stl* generado con un software CAD. Con esta utilidad, se introduce una región rectangular con 2 niveles de refinamiento que se extiende a lo largo de todo el dominio y 5D por encima y por debajo de la línea de los cilindros. Además, se genera una zona con 5 niveles de refinamiento rodeando a la superficie de cada uno de los cilindros. Finalmente, se incluyen 3 capas sobre la superficie de los paneles para capturar mejor la capa límite. Finalmente, con la utilidad *extrudeMesh* se extrude, la cara posterior de la malla en la dirección transversal para generar una única celda en dicha dirección. Esto último es un requerimiento de OpenFoam para simulaciones bidimensionales. La malla resultante del proceso secuencial descrito, junto con los detalles de las zonas de refinamiento y las capas sobre los paneles se muestran en la Figura 2. La cantidad total de celdas de las mallas obtenidas fueron 75488 para la configuración de un cilindro y entre 122000 y 123500 para las configuraciones de dos cilindros, dependiendo de la separación entre ellos.

Para acomodar el movimiento del cilindro B se empleó la técnica de *morphing mesh*. En esta metodología, la malla original generada al inicio de la simulación es deformada en cada paso de tiempo siguiendo el movimiento del cilindro B. Este método tiene un alto costo computacional debido a que la malla debe actualizarse constantemente. Además, es necesario que el movimiento del cilindro B no sea demasiado grande para evitar distorsionar en exceso la malla y deteriorar la calidad de los resultados. Otra alternativa a esta estrategia es la metodología de mallas superpuestas (*overset meshes*). Esta no se empleó en el presente trabajo, pero será implementada en trabajos futuros debido a su mayor flexibilidad en cuanto a los movimientos de los cuerpos.

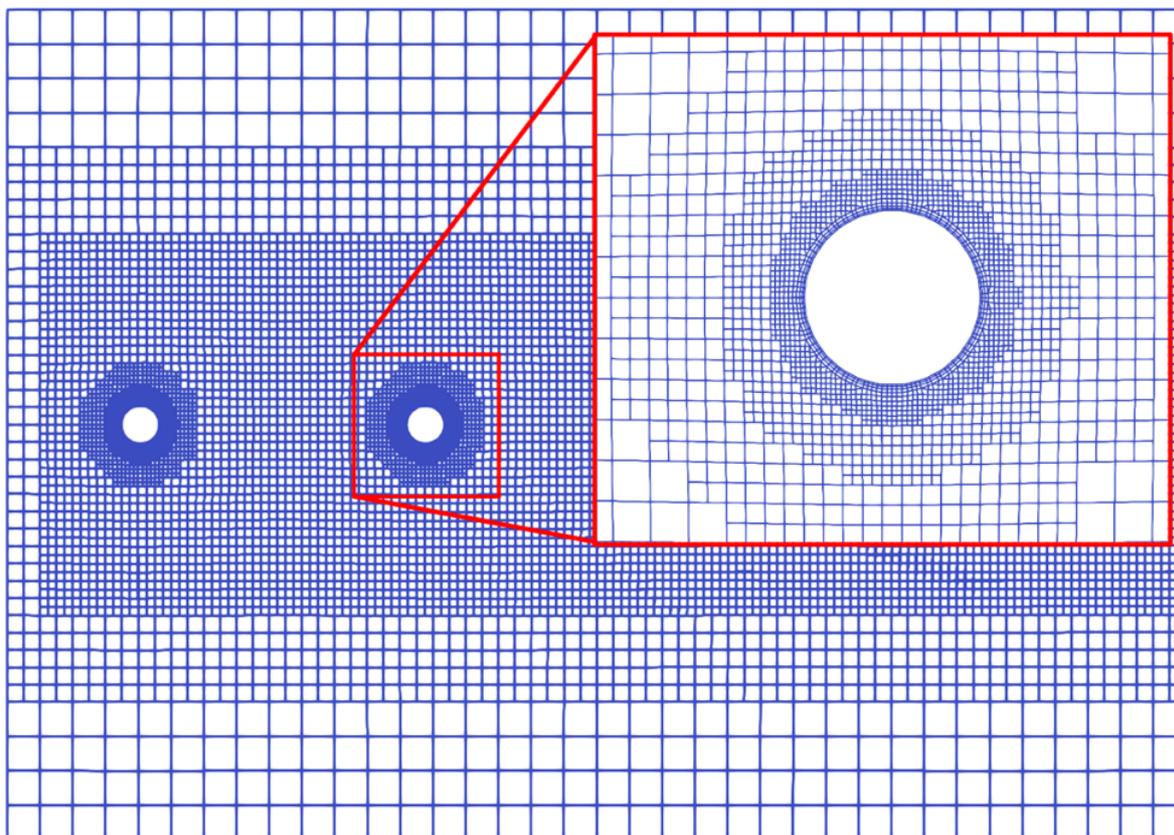


Figura 2: Malla de volúmenes finitos para el estudio del flujo sobre de un arreglo de dos cilindros. Se observan la malla de fondo, las dos zonas de refinamiento y las capas sobre la superficie de los cilindros.

3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para realizar la simulación se emplean de manera secuencial dos solucionadores (*solvers*) de OpenFOAM: *simpleFoam* y *pimpleFoam*. En primer lugar se emplea la aplicación *simpleFoam*, que consiste en un solver para flujo incompresible, turbulento y de estado estacionario basado en el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Con este solver se resuelve el flujo estacionario alrededor de los dos cilindros fijos. Se emplean 3000 iteraciones para asegurar que la solución ha alcanzado el estado estacionario. En realidad, no existe tal estado estacionario ya que ambos cilindros emiten vórtices periódicamente. La idea de las simulaciones con *simpleFoam* es la de generar condiciones iniciales adecuadas para acelerar la convergencia de las simulaciones no estacionarias.

A continuación, se emplea el solver *pimpleFoam*. Este combina elementos de los algoritmos SIMPLE y PISO, pudiendo trabajar con flujos en estado transitorio y con grandes pasos de tiempo. Mediante la aplicación *pimpleFoam* es posible incorporar el movimiento del cilindro B como consecuencia de las propias cargas aerodinámicas que se generan sobre este. Esto implica que el problema ahora pertenece al campo de la interacción fluido-estructura y, por lo tanto, se requiere un solver adicional para la resolución de las ecuaciones dinámicas del cilindro B, es decir, se requiere determinar la deformación de la estructura que soporta al cilindro B (ver [Figura 1](#)). Para esto se emplean el solver *sixDoFRigidBodyMotion* para el movimiento del cuerpo rígido y *dynamicMotionSolverFvMesh* para resolver la malla dinámica que se adapta al movimiento del cuerpo.

Para las simulaciones se adoptó un paso de cálculo de $\Delta t=10\times 10^{-5}$. Sin embargo, se indicó la opción *maxCo* de *pimpleFoam* para limitar el máximo valor del número CFL a 0.9. Esto significa que el paso de cálculo, en general, es variable durante la simulación, ya que es ajustado por OpenFoam para garantizar la condición impuesta sobre el número CFL. Se observó que los pasos de cálculos variables durante la simulación fueron mayores al Δt indicado, y oscilan entre 4×10^{-5} y 5×10^{-5} una vez que el sistema alcanza la solución periódica estacionaria.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones realizadas. Se realizaron dos tipos de simulaciones. Para el primer tipo de simulaciones, el movimiento del cilindro B es restringido en la dirección horizontal y en su rotación. Es decir, sólo puede desplazarse en la dirección vertical. Para el segundo tipo de simulaciones, sólo se restringe la rotación cilindro B, es decir que este puede desplazarse tanto en la dirección vertical como horizontal.

En ambos casos se ha realizado un barrido en la variable L/D (distancia adimensional entre los cilindros) en un rango de valores de 1.75 a 5. El límite inferior del valor L/D está determinado por el solapamiento entre las zonas de refinamiento de las mallas alrededor de los cilindros. Cuando estas zonas se superponen se producen resultados indeseables. Además, para el caso con movimiento en x no restringido, puede ocurrir que el cilindro B se aproxime demasiado al cilindro A produciendo el solapamiento de las zonas de refinamiento.

Un ejemplo del movimiento del cilindro B en presencia del obstáculo A obtenido por medio de las simulaciones con OpenFOAM se puede observar en la [Figura 3](#). En esta figura se representa el campo de velocidad (magnitud) para un instante de tiempo y corresponde a una separación L/D=2.5 entre los cilindros. Como se puede apreciar, las simulaciones realizadas capturan correctamente las calles de vórtices que genera el cilindro A y su influencia sobre el cilindro B.

Los cosechadores de energía eólica emplean por lo general dispositivos o transductores piezoeléctricos para transformar, en energía eléctrica utilizable, la deformación que el viento produce sobre la estructura. El potencial eléctrico, y la potencia generada es proporcional a la

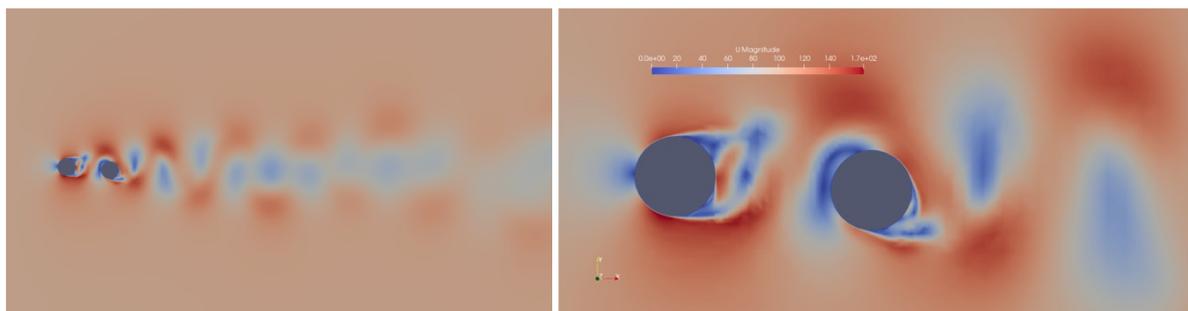


Figura 3: Campo de velocidad (magnitud) para un instante dado correspondiente a la configuración de dos cilindros separados $L/D=2.5$.

deformación aplicada al material piezoeléctrico. En este trabajo, no se modelan los elementos piezoeléctricos. Sin embargo, esto será el objeto de trabajos futuros. En este trabajo se estima la potencia mecánica que el fluido transmite al cilindro B. Esta potencia se puede considerar como la potencia mecánica máxima disponible, la cual que puede ser transformada en energía eléctrica mediante los dispositivos piezoeléctricos adecuados.

La potencia mecánica disponible, es decir, la potencia desarrollada por las fuerzas del fluido al mover cilindro B se calcula como sigue:

$$\mathcal{P} = F_y \dot{y} + F_x \dot{x} \quad (1)$$

El primer término de la potencia está asociado con el movimiento vertical del cilindro y el segundo término con el movimiento horizontal. La posición y la velocidad del cilindro B, al igual que las fuerzas resultantes del fluido sobre el mismo son variables de salida de las simulaciones en OpenFoam. Conociendo las historias temporales de las fuerzas y las velocidades, es posible calcular la potencia del fluido por medio de la Ecuación (1).

Para estudiar la potencia mecánica disponible, se emplea el dominio de la frecuencia. Por este motivo, se recurre a la transformada rápida de Fourier (FFT) que permite descomponer la señal en los distintos componentes de frecuencia. Los espectros de frecuencia de la potencia, obtenidos para el caso del cilindro B con movimiento horizontal y vertical se muestran en la Figura 4 para distintos valores de la separación L/D entre los cilindros. Para facilitar la comparación se optó por adimensionalizar la amplitud de la potencia empleando como referencia la amplitud de la potencia correspondiente al cilindro B sin la presencia del cilindro A, o lo que es equivalente, empleando la potencia para $L/D \rightarrow \infty$. La frecuencia se adimensionaliza con la frecuencia natural del modo de vibración vertical del sistema masa-resorte-amortiguador del cual el cilindro B forma parte. Se observa en la Figura 4 la clara influencia del parámetro L/D sobre la frecuencia y la amplitud de los picos de potencia. La variación de L/D produce el corrimiento de la frecuencia con máxima amplitud y la aparición de picos en frecuencias secundarias. De los casos mostrados, se destaca el caso donde $L/D = 2.5$. Para esa configuración, la amplitud del máximo pico de potencia es casi 8 veces el valor para $L/D \rightarrow \infty$. Este comportamiento se observó tanto cuando el movimiento del cilindro B es restringido en x como cuando no lo es. Esto implica que la configuración con un obstáculo generador de vórtices y un cosechador es potencialmente mejor que la configuración de un cosechador solo.

Otra observación importante es que la potencia asociada al movimiento horizontal del cilindro es considerablemente menor que la potencia asociada al movimiento vertical. Esto puede implicar que en los dispositivos cosechadores, el movimiento horizontal puede ser restringido sin penalizar demasiado la potencia generada.

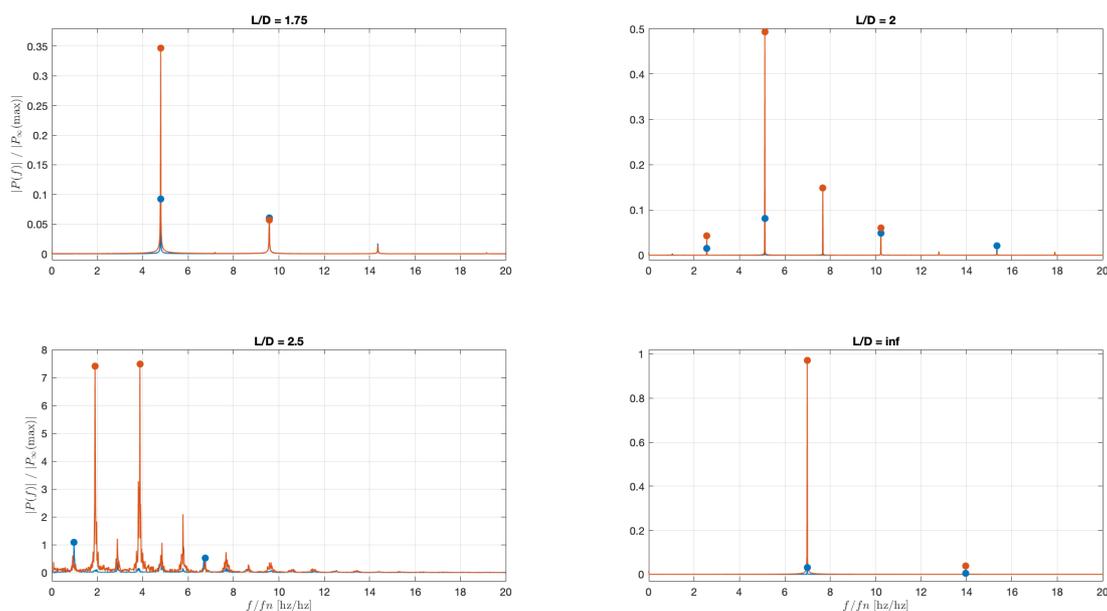


Figura 4: Gráficos de la FFT de la potencia transmitida por el fluido al cilindro B para diferentes valores de L/D . Los gráficos corresponden al caso de movimiento libre en el plano XY. Rojo: componente asociada al movimiento vertical. Azul: componente asociada al movimiento horizontal.

Para valores de separación L/D entre 2 y 2.5, se observa que aumenta considerablemente el nivel de ruido en los gráficos. En su trabajo respecto a la interacción de cilindros en un fluido, [Zdravkovich \(1985\)](#) propone la existencia de 3 regímenes de acoplamiento. Si bien dicho estudio se concentra en el análisis de las calles de vórtices, es posible asumir que el aumento de la excitación y el ruido en el rango $2 \leq L/D \leq 2.5$ está relacionado con el régimen intermedio de acoplamiento, donde pequeñas estelas se forman en el espacio entre ambos cilindros y la frecuencia de desprendimiento de vórtices es distinta para los dos cuerpos.

Finalmente, en la [Figura 5](#) se resumen los resultados en la forma de gráficos de amplitud del máximo pico de potencia y frecuencia del máximo pico de potencia versus el parámetro L/D . Si bien es necesario un estudio más profundo se distinguen al menos tres regímenes: uno para $L/D < 2.125$ con poca potencia desarrollada y frecuencias varias veces mayores a la frecuencia natural (f_n); otro $2.125 \leq L/D < 3$, donde se alcanzan valores máximos de amplitud y la frecuencia se acerca a f_n ; y un último régimen, donde ambos valores se acercan a los de un cilindro solitario en el flujo.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió el potencial de generación y cosecha de energía de un arreglo de dos cuerpos, en este caso, dos cilindros en tándem inmersos en una corriente de aire. Se empleó para la realización de las simulaciones la herramienta OpenFOAM. Los resultados obtenidos proveen evidencia de que el acoplamiento aerodinámico y las vibraciones inducidas por los vórtices generados por un cuerpo obstáculo tienen un impacto significativo sobre la potencia que puede generar el cosechador ubicado corriente abajo. Se observó que estos fenómenos de interacción son potencialmente ventajosos para valores específicos de la separación entre los cuerpos. En este caso, se observó que cuando la separación entre los cilindros se encuentra en el rango $2.125 \leq L/D < 3$, el pico de máxima potencia puede ser hasta 8 veces mayor que el del cosechador solitario, sin obstáculo generador de vórtices.

Como trabajo futuro se plantea el empleo de mallas superpuestas (overset meshes) como sugiere [Chandar et al. \(2015\)](#) y la simulación para diferentes geometrías, tanto del obstáculo generador de vórtices como del objeto cosechador.

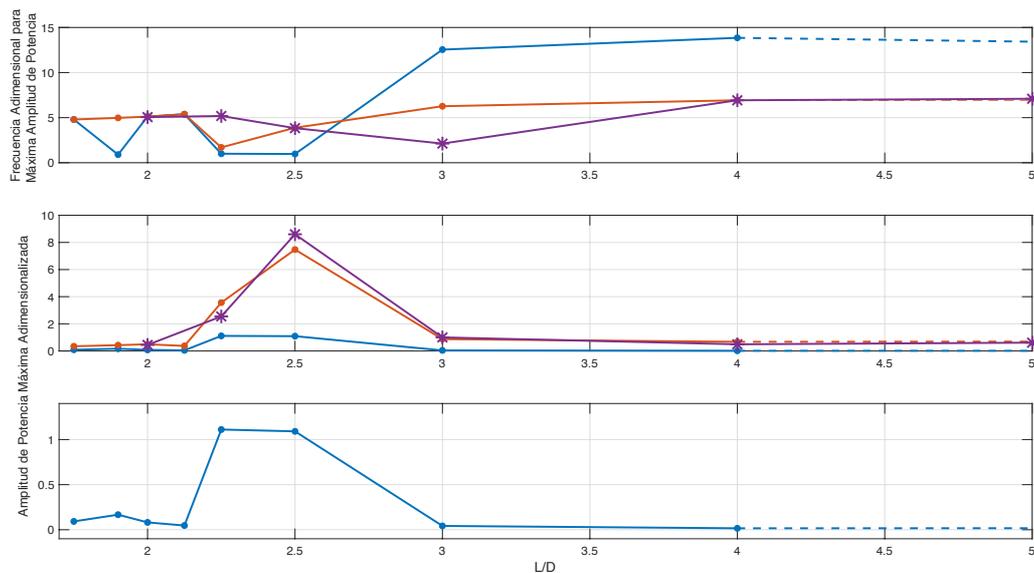


Figura 5: Influencia del parámetro L/D sobre la amplitud del máximo pico de potencia y sobre la correspondiente frecuencia. De arriba abajo: frecuencia, amplitud y detalle de amplitud para la potencia asociada al movimiento horizontal. Azul: valores asociados al movimiento horizontal. Rojo: valores asociados al movimiento vertical. Violeta: Valores para el caso de movimiento horizontal restringido.

REFERENCIAS

- Abdelmoula, H., Sharpes, N., Abdelkefi, A., Lee, H., and Priya, S., Low-frequency Zigzag energy harvesters operating in torsion-dominant mode, *Applied Energy*, 204:413-419, 2017
- Baoshou, Z., Baowei, S., Zhaoyong, M., Wenlong, T., and Boyang, L., Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement, *Energy*, 133:723-736, 2017.
- Beltramo, E., Ribero, S., Hümöller, J.M., Stuardi, J.E., and Preidikman, S., Modelo electromecánico de un cosechador aeroelástico de energía, *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 5:53-61, 2018.
- Chandar, D., Nguyen, V.-T., Gopalan, H., and Jaiman, R., Flow Past Tandem Circular Cylinders at High Reynolds numbers using Overset Grids in OpenFOAM, *AIAA-2015-0315, AIAA-Scitech Forum*, Kissimmee, FL, 2015
- He, X., Yang, X., and Jiang, S., Enhancement of wind energy harvesting by interaction between vortex-induced vibration and galloping, *Applied Physics Letters*, 112:033901, 2018.
- Hobbs, W., and Hu, D., Tree-inspired piezoelectric energy harvesting, *Journal of Fluids and Structures*, 28:103-114, 2012.
- Hobeck, J., and Inman, D., Artificial piezoelectric grass for energy harvesting from turbulence-induced vibration, *Smart Materials and Structures*, 21: 105024, 2012.
- Litak, G., Friswell, M., Kitio Kwiimy, C., Adhikari, S., and Borowiec M., Energy harvesting by two magnetopiezoelectric oscillators with mistuning, *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, 2:043009, 2012.
- Machado, S., Febbo, M., Gatti, C., and Osinaga, S., A piezoelectric beam model with geometric, material and damping nonlinearities for energy harvesting, *Smart Materials and Structures*, 29:095009, 2020.
- Tan, T., and Yan, Z., Analytical solution and optimal design for galloping-based piezoelectric energy harvesters, *Applied Physics Letters*, 109:25902, 2016.
- Zdravkovich, M., Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 101, No. 4:511-521, 1985.