

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE UN ARREGLO DE COSECHADORES DE ENERGÍA BASADOS EN VIBRACIONES INDUCIDAS POR FLUJO

COMPUTATIONAL SIMULATION OF AN ARRAY OF ENERGY HARVESTERS BASED ON FLOW-INDUCED VIBRATIONS

Marcelo F. Valdez^{a,b}, Danae Franco Lopera^a, Silvana E. Flores Larsen^a y Sergio
Preidikman^c

^a*Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET), Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, CP A4400FVY, Salta, Argentina. <http://inenco.unsa.edu.ar>*

^b*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, CP A4400FVY, Salta, Argentina. mvaldez@ing.unsa.edu.ar, <https://ing.unsa.edu.ar>*

^c*Department of Mechanical Engineering, University of Puerto Rico at Mayagüez, 259 Av. Alfonso Valdés Cobián, 00682, Puerto Rico, spreidik@umd.edu, <https://www.uprm.edu/inme/>*

Palabras clave: Dinámica de Fluidos, Aeroelasticidad, Vibraciones.

Resumen. En este trabajo, se analizan las vibraciones inducidas por una corriente de aire en arreglos de cilindros de sección circular para aplicaciones de cosecha de energía. El objetivo del estudio es cuantificar el potencial de generación de energía de los cuerpos cilíndricos explotando la interferencia aerodinámica entre ellos. Para esto, se analiza la potencia mecánica entregada por la corriente a los cosechadores en función de la cantidad de cuerpos del arreglo y de la separación entre ellos. El problema se estudia resolviendo las ecuaciones URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*) con el modelo de turbulencia k-omega SST con el software OpenFoam. Los resultados obtenidos proveen evidencia de que la elección adecuada de la separación entre los cosechadores puede resultar en un incremento de la potencia generada por los cosechadores individuales.

Keywords: Fluid dynamics, Aeroelasticity, Vibrations.

Abstract. In this effort, the flow induced vibrations over arrays of circular-cross-section cylinders is analyzed in the context of wind energy harvesting. The objective of the study is to quantify the energy generation potential of the cylindrical bodies exploiting the aerodynamic interference between them. To this end, the mechanical power delivered by the airstream to the harvesters is analyzed as a function of the amount of bodies in the array and the separation between them. The problem is studied by solving the URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*) equations with the k-omega-SST turbulence model using the OpenFoam software. The results provide evidence that the proper selection of the separation between the harvesters can result in an increase in the power generated by each individual harvester.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la captación de la energía cinética del viento para convertirla en energía mecánica o eléctrica se ha realizado casi exclusivamente mediante turbinas eólicas cuyas potencias nominales van desde algunos kilowatts hasta la decena de megawatts. Una relativamente nueva línea de investigación, llamada “cosecha de energía”, plantea la extracción de la energía cinética del viento transformando en energía eléctrica las oscilaciones que dicha corriente de aire genera sobre estructuras o sistemas flexibles inmersos en ella (flow induced vibrations). En la práctica, estos sistemas son de muy pequeña escala, pensados como reemplazo o complemento de las baterías para la alimentación de dispositivos de bajo consumo tales como sensores inalámbricos e instrumentos de monitoreo (Wen et al., 2021; Ma y Zhou, 2022; Zheng et al., 2023). Entre los mecanismos de transducción de la energía mecánica de las oscilaciones a energía eléctrica ha tomado especial impulso el piezoeléctrico. Menos difundidos son los de transducción electromagnética, electroestática, triboeléctrica, e híbridos.

A pesar de que la investigación en esta área ha avanzado significativamente en los últimos años, la tecnología de cosecha de energía está lejos de ser completamente confiable y madura. Uno de los principales desafíos que esta enfrenta es la baja potencia eléctrica generada (del orden de los miliWatts). Por este motivo, los investigadores han buscado distintas alternativas para maximizar la producción eléctrica de estos dispositivos. Entre ellas, se incluyen: el aprovechamiento de fenómenos aeroelásticos no lineales y el aprovechamiento de la interferencia aerodinámica constructiva.

Ciertos fenómenos de origen aeroelástico como el *flutter*, el *galloping* y las vibraciones inducidas por vórtices pueden producir vibraciones de niveles excesivos y peligrosos en estructuras civiles y aeronáuticas. Las inestabilidades de *flutter* y *galloping* se producen cuando la velocidad de la corriente de aire es tal que el amortiguamiento efectivo de la estructura se vuelve nulo. El *flutter* involucra a dos o más modos de vibración (torsión y flexión) acoplados y el *galloping* solo a un modo de vibración, ya sea torsional o flexional. Cuando la corriente en si es fluctuante (debido a la turbulencia, por ejemplo), la inestabilidad producida por la resonancia de la estructura se conoce como *buffeting*. Cuando estas fluctuaciones son producidas por estelas o vórtices generados por otros objetos, la inestabilidad se conoce como vibraciones inducidas por vórtices. Desde otra perspectiva completamente opuesta, la de la cosecha de energía, las inestabilidades aeroelásticas, asociados con no-linealidades estructurales y aerodinámicas, son una alternativa más que atractiva para maximizar las vibraciones de un sistema y por lo tanto, maximizar la energía eléctrica producida (Erturk et al., 2010). También, la disposición de cosechadores de energía en arreglos espaciales con una configuración que maximice el efecto multiplicativo de la interacción aerodinámica es otra alternativa para aumentar la potencia eléctrica producida por los cosechadores (Beltramo et al., 2020).

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se realizan simulaciones computacionales de dinámica de fluidos para estudiar el potencial de extracción de energía eólica de distintas configuraciones de arreglos de cosechadores de energía. Los arreglos se componen de cuerpos cilíndricos idénticos de sección circular alineados horizontalmente e inmersos en una corriente de aire caracterizada por un número de Reynolds de 1000 y una intensidad de turbulencia del 1%. Las distintas configuraciones se caracterizan por el número de cuerpos y por la separación horizontal entre ellos. Para resolver el problema de interacción entre el fluido y la estructura se emplea el software de código abierto OpenFoam. Se emplea la aplicación *pimpleFoam* para resolver las ecuaciones de

Navier-Stokes promediadas por Reynolds no estacionarias (URANS) con modelo de turbulencia $k-\omega$ -SST. Las ecuaciones de movimiento de cuerpos rígidos se resuelven con la aplicación *rigidBodyMotion* incluida en OpenFoam. En todos los casos, los modelos computacionales son bidimensionales.

2.1. Dominio Fluido Computacional

La geometría del dominio computacional empleado para las simulaciones con un número arbitrario de cuerpos inmersos se describe en la Fig. 1. El dominio es un prisma rectangular de alto L_{Dy} , largo L_{Dx} y profundidad L_{Dz} . Para todos los casos estudiados $L_{Dy} = 20D$, donde D es el diámetro de los cilindros. La profundidad del dominio es irrelevante debido a que las simulaciones son bidimensionales y se emplea una única celda en esa dirección. El cuerpo a barlovento se ubica a una distancia de $10D$ desde la entrada (*inlet*) del dominio. El cuerpo a sotavento se ubica a $15D$ de la salida (*outlet*). La separación L entre los cuerpos es uniforme. La longitud horizontal del dominio fluido depende de la cantidad N de cuerpos empleados ($L_{Dx} = 25D + (N - 1)L$).

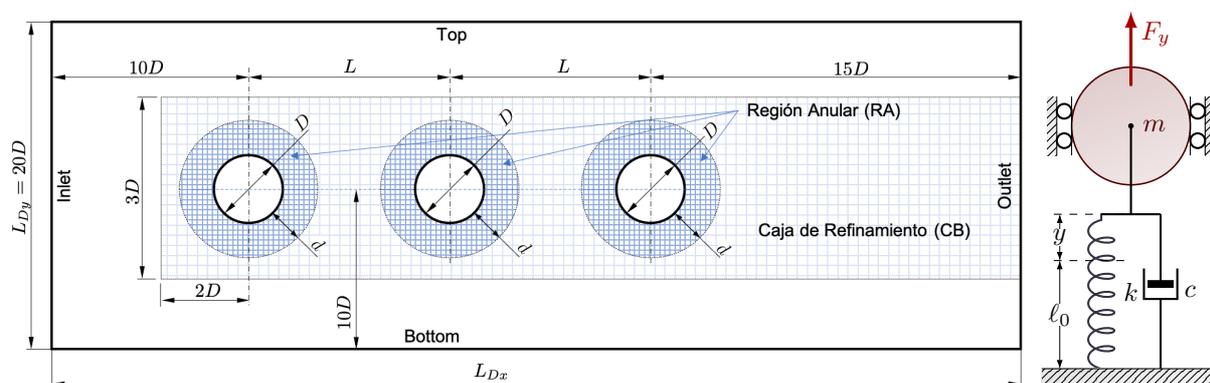


Figura 1: Izquierda: Dominio computacional empleado para las simulaciones. Derecha: Modelo estructural de parámetros concentrados de los cosechadores cilíndricos.

Para generar la malla de volúmenes finitos se empleó la utilidad *SnappyHexMesh* incluida en OpenFoam. Esta utilidad permite generar mallas, en su mayoría formada por hexaedros, que se ajustan a los contornos de geometrías complejas. Para mejorar la resolución de las estelas generadas por los cilindros, se emplea una caja de refinamiento de $3D$ de alto, con su lado corriente arriba a $2D$ por delante del cuerpo a barlovento. Además, se emplea una región anular (RA) de diámetro exterior $D + d$ que envuelve a cada cilindro para refinamiento adicional (Fig. 1). El procedimiento de generación de la malla requiere la definición de una malla regular de fondo (MF) para todo el dominio fluido, sin incluir los cuerpos. Primero, esta malla es refinada en el interior de la caja de refinamiento (CR) y de las regiones anulares (RA) definidas anteriormente. Luego, las celdas contenidas dentro de los cuerpos son eliminadas (*castellation*) y los nodos de las celdas próximas a las superficies sólidas son “pegados” a las superficies de los cuerpos (*snap*). Finalmente, la utilidad agrega capas de celdas adyacentes a las superficies de los cuerpos. La generación de la malla con esa aplicación no es un procedimiento trivial ya que algunas combinaciones de nivel de refinamiento, número de capas adyacentes y razón de expansión de las capas (*inflation*) pueden conducir a una malla cuya calidad no satisface los criterios mínimos y por lo tanto, la utilidad *SnappyHexMesh* no la puede generar correctamente. La determinación de las combinaciones posibles de los parámetros de la malla es una tarea de prueba y error. Se

decidió optar por este procedimiento de mallado ya que es factible de sistematización para la incorporación de múltiples cuerpos y de cuerpos con geometrías diferentes a la circular.

Debido a que los cuerpos se mueven e el interior del dominio, es necesario adoptar una estrategia de malla dinámica. En este caso, se emplea la técnica *mesh morphing*. Si bien, esta estrategia es relativamente sencilla de implementar, es importante limitar el movimiento de los cuerpos para evitar que grandes distorsiones producidas en la malla atenten contra la convergencia de la solución. En trabajos futuros se explorarán otras estrategias más sofisticadas como la de mallas superpuestas (*overset meshes*) o la de refinamiento adaptativo (AMR).

2.1.1. Condiciones iniciales de la corriente libre

Se considera un flujo uniforme con velocidad U a lo largo del eje horizontal caracterizado por un número de Reynolds de 1000 y una intensidad de turbulencia $I = 1\%$. El valor inicial de energía turbulenta k de la corriente libre está dado por:

$$k = \frac{3}{2} (IU)^2 \quad (1)$$

La disipación turbulenta específica ω de la corriente libre se calcula como sigue:

$$\omega = \frac{k}{\nu} \left(\frac{\nu_t}{\nu} \right)^{-1} \quad (2)$$

donde ν y ν_t son las viscosidades cinemática y de remolino, respectivamente. Se adopta $\nu_t/\nu = 1,0$ correspondiente al valor de intensidad de turbulencia.

2.2. Condiciones de Contorno

En la entrada (*inlet*) del dominio se imponen: un valor fijo U para la componente horizontal de la velocidad (correspondiente a un $Re = 1000$), gradiente nulo para la presión $\partial p/\partial x = 0$, y valores fijos para las variables de turbulencia k y ω iguales a los valores iniciales de la corriente libre. En la salida del dominio (*outlet*) se imponen: un valor fijo $p = 0$ para la presión y condiciones de contorno *inletOutlet* con entrada nula para la velocidad y para las variables turbulentas. En las superficies superior e inferior del dominio se imponen la condición de contorno *Slip* para la velocidad y de gradiente nulo $\partial/\partial y = 0$ para la presión p , para las variables turbulentas k y ω . En las superficies frontal y posterior se emplea la condición *empty* para indicar la restricción de flujo bidimensional. Finalmente, sobre las paredes sólidas móviles se imponen la condición de no deslizamiento para la velocidad, gradiente nulo para la presión y valores fijos para las variables turbulentas ($k \approx 0$ y ω con un valor muy grande). Se emplea la metodología de flujo resuelto en la pared (*wall resolved approach*), es decir, no se emplean funciones de pared. Por esto es necesario satisfacer el criterio $y^+ < 5$ (idealmente $y^+ < 1$).

2.3. Dinámica de los Cosechadores

Los cilindros “cosechadores” de energía se modelan como cuerpos rígidos con parámetros concentrados (masa, rigidez y amortiguamiento). Cada cuerpo posee un único grado libertad de movimiento correspondiente a la translación en la dirección vertical (*plunging*). En este trabajo, no se incluye el modelo del transductor de energía mecánica a energía eléctrica (por ejemplo, un material piezoeléctrico). La ecuación de movimiento que describe la dinámica del cuerpo i es la siguiente (Fig. 1):

$$m_i b \ddot{y}_i + c_i b \dot{y}_i + k_i b y_i = F_{y_i} b \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

donde F_{yi} es a componente vertical de la fuerza aerodinámica sobre el cuerpo i , m_i es la masa del cuerpo i por unidad de ancho b y k_i y c_i son la rigidez y amortiguamiento por unidad de ancho b del soporte del cuerpo i . Definiendo las variables adimensionales, $\eta_i := y_i/D_i$ y $\tau := tU/L_c$ (L_c es una longitud característica) la ecuación de movimiento se reescribe como sigue:

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta_i\kappa_{ni}\dot{\eta}_i + \kappa_{ni}^2\eta_i = \frac{C_{yi}}{2\mu_i} \frac{L_c^2}{D_i^2} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

donde $\kappa_{ni} := \omega_{ni}D_i/U$ es la frecuencia natural reducida, $\mu_i := m_i/\rho D_i^2$ es la masa reducida y C_{yi} es el coeficiente de fuerza vertical para el cosechador i . La potencia mecánica que el fluido entrega al cuerpo i esta dada por la siguiente expresión:

$$\mathcal{P}_i(t) = \dot{y}_i F_{yi} = \dot{\eta}_i C_{yi} \frac{\rho D_i U^3}{2} \quad (5)$$

Esta potencia se distribuye entre la deformación elástica de la estructura y la energía disipada por el amortiguador. En todos los casos considerados, todos los cuerpos son de igual diámetro ($D_i = D$) y todos los soportes son idénticos ($k_i = k$, $m_i = m$, $c_i = c$, $L_c = D$).

2.3.1. Limitación de la amplitud del movimiento

Asumiendo que el comportamiento estacionario de la fuerza vertical es armónico con amplitud C_{yamp_ss} y frecuencia reducida κ , la amplitud η_{amp_ss} del movimiento de un cuerpo está dada por (Balachandran y Magrab (2009)[Sección 5.3.3]):

$$y_{amp_ss} = \eta_{amp_ss} D = \frac{C_{yamp_ss} D}{2\mu\kappa_n^2 \sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4\zeta^2\Omega^2}} = \frac{\rho U^2 D C_{yamp_ss}}{2k \sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4\zeta^2\Omega^2}},$$

donde: $\Omega := \kappa/\kappa_n$ y $\mu\kappa_n^2 = k/\rho U^2$. Para valores de amortiguamiento $\zeta \leq 1/\sqrt{2}$, la máxima amplitud de movimiento se obtiene para $\Omega_{max} = \sqrt{1-2\zeta^2}$ y su valor es:

$$y_{ssmax} = \frac{\rho U^2 D C_{yamp_ss}}{2k} \frac{1}{2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}}. \quad (6)$$

En este trabajo se limita el movimiento vertical y del cuerpo a 5% del diámetro para evitar distorsiones excesivas de la malla. Esto determina un límite inferior de la rigidez como sigue:

$$\frac{y_{ssmax}}{D} = \eta_{ssmax} < 0,05 \Rightarrow k > \frac{\rho U^2 C_{yamp_ss}}{0,1} \frac{1}{2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (7)$$

3. ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA MALLA

Para determinar las combinaciones posibles del nivel de refinamiento en las regiones anulares (RA) que rodean a los cuerpos, el espesor δ_1 de la celda adyacente a la superficie sólida, la relación de expansión r (*inflation*) y cantidad n de celdas en las capas adyacentes a los sólidos se generaron en primer lugar, distintas mallas para el caso de un único cilindro de sección circular inmerso en el dominio fluido. Para los casos de dos o más cuerpos, las mallas se obtienen empleando los mismos parámetros, lo que garantiza la convergencia de SnappyHexMesh. Las mallas que se generaron y analizaron para estudiar la convergencia se listan en la Tabla 1. En

todos los casos se adoptaron niveles de refinamiento 3 y 4 en la caja de refinamiento (CR) y en la región anular (AR), respectivamente. La distancia d que define la región anular es en todos los casos igual a 15 veces la longitud media de las celdas Δ_{RA} en la región anular. Se observa en la Tabla 1 que para un mismo valor de δ_1 y r , al aumentar el nivel de refinamiento de la región anular, menor es la cantidad de capas adyacentes que se pueden incorporar. Esto obedece a la necesidad de proveer una transición suave entre los tamaños de celdas de ambas regiones.

Tabla 1: Mallas generadas para un dominio fluido rectangular con un cilindro circular inmerso. Dominio fluido: $25D \times 20D$. Caja de refinamiento (CR): nivel de refinamiento 3. Anillo de refinamiento (AR): $d/\Delta_{RA} = 15$, nivel de refinamiento 4. δ es el espesor total de las capas adyacentes a los cuerpos.

| # | Malla de Fondo (MF) | | CR Nivel | RA Nivel | Capas | | | | #Celdas |
|---|---------------------|-------|-------------|-------------|----------------------|-----|------|--------------------|---------|
| | N_x | N_y | | | $\frac{\delta_1}{D}$ | n | r | $\frac{\delta}{D}$ | |
| 1 | | | | | 0.010 | 4 | 1.20 | 0.054 | 18974 |
| 2 | 50 | 40 | 3 | 4 | 0.005 | 7 | 1.20 | 0.065 | 19250 |
| 3 | | | | | 0.002 | 11 | 1.20 | 0.065 | 19618 |
| 4 | | | | | 0.001 | 14 | 1.20 | 0.059 | 19894 |
| 5 | 100 | 80 | 3 | 4 | 0.002 | 8 | 1.20 | 0.033 | 67354 |
| 6 | | | | | 0.001 | 11 | 1.20 | 0.032 | 67906 |

3.1. Flujo alrededor de un cilindro de sección circular fijo

En primer lugar, se realizó un estudio de convergencia de malla para el flujo alrededor de un cilindro circular fijo con $Re = 1000$ y con intensidad de turbulencia $I = 1\%$. Los resultados obtenidos con cada malla se presentan en la Tabla 2 en términos del número de Strouhal S_t (correspondiente a la frecuencia de desprendimiento de vórtices), el valor del coeficiente de resistencia medio \bar{C}_x , la amplitud del coeficiente de fuerza vertical C_{yamp_ss} y el valor máximo de y^+ en las celdas adyacentes a la superficie del cilindro. Se observa que, para todas las mallas, los resultados obtenidos son similares a excepción del y_{max}^+ . A partir de los resultados de este estudio, se adoptan la malla 6. Las mallas para los casos de más de un cuerpo inmerso serán generadas empleando los mismos parámetros.

Tabla 2: Resultados de las simulaciones del flujo alrededor de un cilindro circular fijo con $Re = 1000$.

| Malla # | S_t | \bar{C}_x | C_{yamp_ss} | y_{max}^+ |
|---------|--------|-------------|----------------|-------------|
| 1 | 0.2200 | 1.3991 | 1.2051 | 1.5462 |
| 2 | 0.2200 | 1.4011 | 1.2160 | 0.7735 |
| 3 | 0.2200 | 1.3966 | 1.2093 | 0.3094 |
| 4 | 0.2200 | 1.3908 | 1.1986 | 0.1547 |
| 5 | 0.2267 | 1.4051 | 1.1986 | 0.3086 |
| 6 | 0.2267 | 1.4012 | 1.1953 | 0.1544 |

4. ESTUDIOS DE ARREGLOS DE CILINDROS MÓVILES PARA COSECHA DE ENERGÍA

En esta sección se analizan las vibraciones producidas por una corriente de aire sobre los cilindros de sección circular dispuestos de manera horizontal alineados con la dirección de la corriente.

4.1. Vibraciones inducidas por el flujo sobre un único cosechador

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para un único cilindro fijo (Tabla 2) y el análisis desarrollado en la Sección § 2.3.1, se seleccionan los parámetros de amortiguamiento, rigidez y masa indicados en la Tabla 3. Estos parámetros se eligen de manera que cada cosechador opere en la condición de “resonancia” o de máxima amplitud de movimiento vertical (la frecuencia de separación de vórtices coincide con la frecuencia amortiguada del sistema masa-resorte-amortiguador). Se aclara que los valores elegidos son estimados en el sentido de que no tienen en cuenta el efecto que la presencia de otros cilindros puede tener sobre la frecuencia o sobre la amplitud de la fuerza vertical.

Tabla 3: Parámetros de amortiguamiento, masa y rigidez para los cosechador circulares en un flujo con $Re = 1000$.

| ρU^2 | C_{yamp_ss} | ζ | Ω | k | m | κ_n | μ |
|------------|----------------|---------|----------|--------|--------|------------|-------|
| 1,00 | 1,1953 | 0,05 | 0,998 | 119,68 | 234,77 | 1,43 | 58,69 |

La Fig. 2 muestra los espectros de frecuencia de la potencia \mathcal{P} entregada por la corriente de aire a un único cosechador circular y de la potencia disipada \mathcal{P}_c para dos valores de Ω , uno correspondiente a la resonancia (Tabla 3) y otro por debajo de ella. También se muestran los diagramas en espacio de estados de la respuesta del cosechador. Las simulaciones se ejecutaron por un tiempo total $\tau_f = t_f D/U = 200$. Los resultados muestran que a partir de $\tau = 150$ el sistema alcanza su régimen estacionario periódico. Se observa claramente una reducción de la máxima potencia entregada por el fluido cuando el sistema opera lejos de la “resonancia”. En ambos casos, la proporción de la energía disipada por el amortiguador es muy pequeña comparada con la potencia total. Para el caso del cosechador operando en “resonancia” ($\Omega = 0,998$), la frecuencia reducida del movimiento vertical del cosechador obtenida es de $\kappa_y = f_y D/U = 0,2399$, la cual es algo mayor que el número de Strouhal $S_t = 0,2267$ empleado para estimar la masa y la rigidez. La potencia entregada por el fluido al cosechador tiene un valor medio $\mathcal{P}_{mean}/(0,5\rho U^3 D) = 0,0270$ y una amplitud $\mathcal{P}_{amp}/(0,5\rho U^3 D) = 0,0317$.

4.2. Arreglos de dos y tres cosechadores alineados en la dirección de la corriente

En esta sección se analiza la potencia que la corriente de aire entrega a cilindros circulares como parte de arreglos de dos y tres cosechadores en tandem horizontal. Para cada uno de los cosechadores se emplean los mismos parámetros de rigidez, masa y amortiguamiento elegidos para el caso de un único cosechador. Se analizan distintos valores de la distancia horizontal entre $L/D = 2,0$ y $L/D = 4,0$. Las simulaciones se ejecutaron por un tiempo total de $\tau_f = t_f D/U = 200$. En la Tabla 4 se indican los valores obtenidos de la frecuencia reducida κ_y del movimiento vertical de cada uno de los cuerpos y la amplitud y valor medio de la potencia adimensional que la corriente de aire entrega a los cilindros. En primer lugar se observa que, para cualquier valor de separación L/D , todos los cilindros de un arreglo se mueven con la misma frecuencia reducida $\kappa_y = f_y D/U$. En segundo lugar, cuando la separación entre los cilindros es $L/D =$

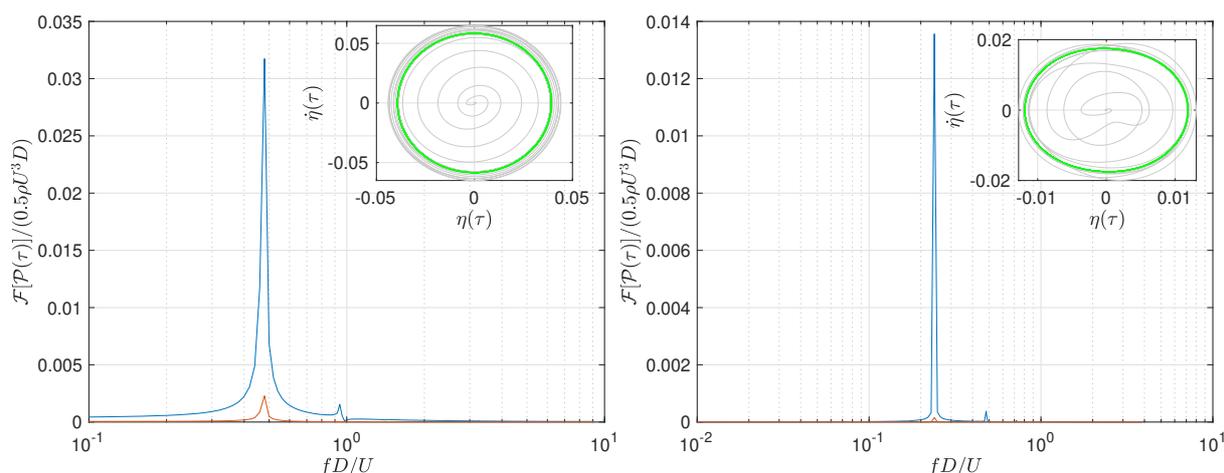


Figura 2: Espectro de frecuencia de la Potencia \mathcal{P} entregada por el fluido al cosechador circular (azul) y de la potencia disipada \mathcal{P}_c (rojo) para $\zeta = 0,05$ y $\Omega = 0,998$ (izquierda) y $\Omega = 0,660$ (derecha). Cada figura incluye los diagramas de fase $\dot{\eta}$ vs. η de la respuesta dinámica del cosechador. La línea verde indica la solución a partir $\tau = 150$

2,0, la frecuencia reducida κ_y del movimiento de los cilindros es significativamente menor que el número de Strouhal $S_t = 0,2267$ estimado para un cilindro y empleado para seleccionar los parámetros de rigidez y masa. Esto puede ser la razón por la cual la potencia entregada por la corriente a los cilindros es muy pequeña para dicho valor de separación. Finalmente, cuando la separación entre los cilindros es $L/D = 3,0$ o $L/D = 4,0$, el cilindro 2 recibe una potencia de la corriente de aire que es mucho mayor que la recibiría dicho cosechador en solitario. Esto muestra que el efecto de la interferencia aerodinámica por la cercanía de los cilindros tiene un efecto multiplicativo. Para ambos casos, el cilindro a barlovento (cilindro 1) también recibe una potencia mayor que la que recibiría si estuviera sólo, siendo el efecto de la interferencia aerodinámica mucho más pronunciado cuando $L/D = 4,0$.

Tabla 4: Resultados para arreglos de dos y tres cilindros de sección circular móviles separados por distintas distancias horizontales L . El flujo se caracteriza por $Re = 1000$ y $I = 1\%$. La numeración de los cuerpos es creciente en la dirección de la corriente.

| Arreglo L/D | → Cuerpo | 2 Cilindros | | | 3 Cilindros | | |
|------------------|-------------|-------------|-----------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------|
| | | κ_y | $\mathcal{P}_{\text{mean}}$ | \mathcal{P}_{amp} | κ_y | $\mathcal{P}_{\text{mean}}$ | \mathcal{P}_{amp} |
| 2,0 | 1 | 0,16 | $5,13E-06$ | $3,52E-05$ | 0,16 | $1,07E-05$ | $8,35E-05$ |
| | 2 | 0,16 | $9,19E-05$ | $5,31E-04$ | 0,16 | $2,86E-04$ | 0,0014 |
| | 3 | — | — | — | 0,16 | $6,82E-04$ | 0,0044 |
| 3,0 | 1 | 0,22 | 0,0290 | 0,0405 | 0,22 | 0,0199 | 0,0306 |
| | 2 | 0,22 | 0,0565 | 0,0641 | 0,22 | 0,0341 | 0,0464 |
| | 3 | — | — | — | 0,22 | 0,0211 | 0,0297 |
| 4,0 | 1 | 0,24 | 0,0404 | 0,0459 | 0,22 | 0,0535 | 0,0495 |
| | 2 | 0,24 | 0,1123 | 0,1171 | 0,22 | 0,0994 | 0,0998 |
| | 3 | — | — | — | 0,22 | 0,0094 | 0,0178 |

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron simulaciones de dinámica de fluidos e interacción fluido estructura para estudiar el potencial de generación de energía a partir de las vibraciones que una corriente de aire induce sobre arreglos de cilindros de sección circular. Se analizó la potencia que la corriente de aire entrega a configuraciones de uno, dos y tres cilindros alineados en la dirección de la corriente libre y separados por una distancia variable. Los resultados obtenidos aportan evidencia de que la interferencia aerodinámica debida a la cercanía de los cuerpos puede contribuir a aumentar considerablemente la potencia que la corriente entrega a los cuerpos en forma de vibraciones mecánicas. Sin embargo, se observó que dicho efecto no es el mismo para todos los cosechadores del arreglo, siendo el cosechador a barlovento, o el cosechador interior (para la configuración de tres cosechadores) el más beneficiados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo y financiación del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) a través del proyecto CIUNSa Tipo C 2853/0 y del FONCyT a través del proyecto PICT-2020-Serie A-00662.

REFERENCIAS

- Balachandran B. y Magrab E.B. *Vibrations*. Cengage Learning, segunda edición, 2009.
- Beltramo E., Pérez Segura M.E., Roccia B.A., Valdez M.F., Verstraete M.L., y Preidikman S. Constructive aerodynamic interference in a network of weakly coupled flutter-based energy harvesters. *Aerospace*, 7(12):167, 2020.
- Erturk A., Vieira W.G.R., De Marqui C. J., y Inman D.J. On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems. *Applied Physics Letters*, 96(18):184103, 2010. ISSN 0003-6951. doi:10.1063/1.3427405.
- Ma X. y Zhou S. A review of flow-induced vibration energy harvesters. *Energy Conversion and Management*, 254:115223, 2022.
- Wen Q., He X., Lu Z., Streiter R., y Otto T. A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters. *Nano Materials Science*, 3(2):170–185, 2021.
- Zheng X., He L., Wang S., Liu X., Liu R., y Cheng G. A review of piezoelectric energy harvesters for harvesting wind energy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 352:114190, 2023. ISSN 0924-4247. doi:https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114190.