

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA INTERACCIÓN FLUIDODINÁMICA ENTRE CILINDRO Y PERFIL AERODINÁMICO EN CONDICIONES DE FLUTTER PARA DIFERENTES FRECUENCIAS DE VÓRTICES DE VON KARMAN

### NUMERICAL SIMULATION OF FLUID-DYNAMIC INTERACTION BETWEEN CYLINDER AND AIRFOIL IN FLUTTER CONDITIONS FOR DIFFERENT VORTEX SHEDDING FREQUENCIES

M. Herrera<sup>a</sup>, A. Scarabino<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Fluidodinámica Computacional, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires,  
Argentina, [gfc@ing.unlp.edu.ar](mailto:gfc@ing.unlp.edu.ar), <https://gfc.ing.unlp.edu.ar>

**Palabras clave:** Cosecha de energía, CFD, Interacción fluido-estructura.

**Resumen.** Los dispositivos de cosecha de energía eólica representan una alternativa viable para la obtención de energía y en particular, para la alimentación de pequeños dispositivos electrónicos de bajo consumo instalados en zonas sin acceso a la red eléctrica, tales como dispositivos de adquisición de datos o instrumentales de medición de variables climáticas. En trabajos previos, se analizó numéricamente mediante Ansys Fluent, la interacción entre un cilindro y un perfil aerodinámico inmersos en una corriente de aire, para una determinada frecuencia de desprendimientos del cilindro. El perfil aerodinámico poseía propiedades de masa e inercia ajustados para obtener la condición de flutter en la corriente de aire, y se encontraba vinculado a un marco de referencia fijo mediante resortes que cuantifican sus rigideces a flexión y a torsión. Mediante tal arreglo, se cuantificó la interacción aerodinámica a partir del análisis del coeficiente de potencia del perfil (potencia adimensional, extraída del aire), para diferentes longitudes de separación entre cilindro y perfil. En el presente trabajo, se han realizado simulaciones adicionales para obtener el coeficiente de potencia del perfil, para otras frecuencias de desprendimientos del cilindro, logrando caracterizar la influencia de la frecuencia de desprendimientos en la captación de energía del perfil. Los resultados son analizados y comparados cualitativamente con resultados encontrados en la bibliografía.

**Keywords:** Wind power harvest, CFD, fluid-structure interaction.

**Abstract.** Wind energy harvesting devices represent a viable alternative for obtaining energy and powering small low-consumption electronic devices. In the last work presented at MECOM 2023 was numerically analyzed the interaction between cylinder and airfoil immersed in an airflow using Ansys Fluent. The airfoil had mass and inertia properties adjusted to obtain the flutter condition, and it was linked to a fixed reference frame by means of springs. It was sought to quantify the aerodynamic interaction from the analysis of the power coefficient of the airfoil (dimensionless power, extracted from the air), based on the separation between cylinder and airfoil. In the present work, additional simulations were carried out to quantify the influence of other vortex shedding frequencies in the power coefficient of the airfoil. The results are analyzed and compared with results found in the bibliography.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los dispositivos de cosecha de energía eólica transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica, a través de diversos mecanismos, ya sean partes rotantes, o dispositivos que utilizan las vibraciones inducidas por vórtices (VIV), tales como flutter, galloping, entre otros. Estos últimos han empezado a ser de gran interés en los últimos años, ya que, representan una alternativa viable para la obtención de energía y en particular, para la alimentación de equipos electrónicos de bajo consumo instalados en zonas sin acceso a la red eléctrica, tales como dispositivos de adquisición de datos o instrumentales de medición de variables climáticas, sensores inalámbricos, etc. (Ma y Zhou, 2022; Zheng et al., 2023). Los cosechadores de energía basados en efectos aeroelásticos aprovechan el acoplamiento entre las cargas aerodinámicas, estructurales e inerciales para extraer energía a partir de las vibraciones de un elemento.

A la fecha, se han realizado diversos trabajos acerca del estudio de la interacción fluido-estructura en cosechadores de energía eólica (Valdez, et al., 2023, Machado, S. et al., 2020), pero actualmente sigue siendo un tema de gran interés para la comunidad científica.

En trabajos previos se analizó numéricamente mediante Ansys Fluent, la interacción entre un cilindro y un perfil aerodinámico inmersos en una corriente de aire, para una determinada frecuencia de desprendimientos del cilindro (Herrera, M. et al., 2023). Mediante tal arreglo, se cuantificó la interacción aerodinámica a partir del análisis del coeficiente de potencia del perfil (potencia adimensional, extraída del aire), para diferentes longitudes de separación entre cilindro y perfil. En el presente trabajo, se han realizado simulaciones adicionales para obtener el coeficiente de potencia del perfil, para otras frecuencias de desprendimientos del cilindro, logrando caracterizar la influencia de la frecuencia de desprendimientos en la captación de energía del perfil. Los resultados son analizados y comparados cualitativamente con resultados encontrados en la bibliografía.

## 2 MARCO TEÓRICO

Existen diferentes enfoques analíticos para la resolución de problemas de multifísica con interacción fluido-estructura, en función de los modelos y métodos utilizados para resolver el campo fluidodinámico, y las ecuaciones que modelan la dinámica de la estructura.

En el presente trabajo, utilizando la herramienta computacional Ansys Fluent, para obtener la solución del dominio fluidodinámico, se resuelven las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (ecuaciones RANS) para un flujo incompresible, utilizando el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST (Durbin and Petterson, 2010; Menter, F., 1994).

A partir de la solución del campo de flujo se obtienen las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el cuerpo, las cuales son variables de entrada para un solver utilizado en Ansys Fluent, y denominado *6DOF Solver* (“6 degrees of freedom”), el cual, a partir de las fuerzas y momentos resultantes sobre el perfil, calcula la velocidad lineal y angular del centro de gravedad del cuerpo (Ansys, Documentation, Six DOF Solver Theory), ver Ec. ( 1 ):

$$\dot{\bar{V}}_G = \frac{1}{m} \sum \bar{f}_G$$

$$\dot{\bar{\omega}}_B = L^{-1} \left( \sum \bar{M}_B - \bar{\omega}_B \times L \bar{\omega}_B \right) \quad (1)$$

$$\bar{M}_B = R \bar{M}_G$$

Donde:

$\overline{V}_G$  : Velocidad del centro de gravedad del perfil aerodinámico en el sistema inercial.

$m$ : masa del perfil aerodinámico.

$\overline{f}_G$  : fuerzas que actúan sobre el perfil aerodinámico, en el sistema de coordenadas global.

$L$ : Tensor de inercia.

$\overline{\omega}_B$  : velocidad angular del perfil, en el sistema de coordenadas propio del perfil (no inercial).

$\overline{\dot{\omega}}_B$  : aceleración angular del perfil.

$\overline{M}_G$  : Momento actuante en el perfil, referenciado al sistema global de coordenadas (inercial).

$\overline{M}_B$  : Momentos respecto al sistema de referencia propio del perfil (no inercial).

$R$ : Matriz de transformación desde el sistema de referencia inercial, al sistema del perfil.

La velocidad lineal y angular obtenidas mediante el solver  $6DOF$  son integradas numéricamente para obtener el desplazamiento lineal del centro de gravedad del cuerpo, y su rotación angular, en el sistema de referencia del cuerpo. Posteriormente, se regenera la malla numérica, mediante el método de superposición de mallas denominado “overset”, descrito en la sección Metodología, y nuevamente se inicia el procedimiento de cálculo descrito. Este procedimiento se realiza para cada paso de tiempo de la simulación.

### 3 PROBLEMA DE ESTUDIO Y METODOLOGIA

Se desea obtener la potencia extraída del aire por el perfil aerodinámico con 2 grados de libertad (movimiento en la dirección perpendicular a la corriente y rotación sobre su eje elástico) con cuerda “ $C$ ” conocida, colocado en la estela de un cilindro fijo (0 grados de libertad) de diámetro “ $D$ ”, ambos separados una distancia “ $L$ ” e inmersos en un flujo con una velocidad de corriente libre conocida  $U_\infty$ , con intensidad de turbulencia de 1%. El número de Reynolds del problema es  $1.4E5$  basado en la cuerda del perfil y el problema es analizado en dos dimensiones, como se muestra a la izquierda de la Figura 1:

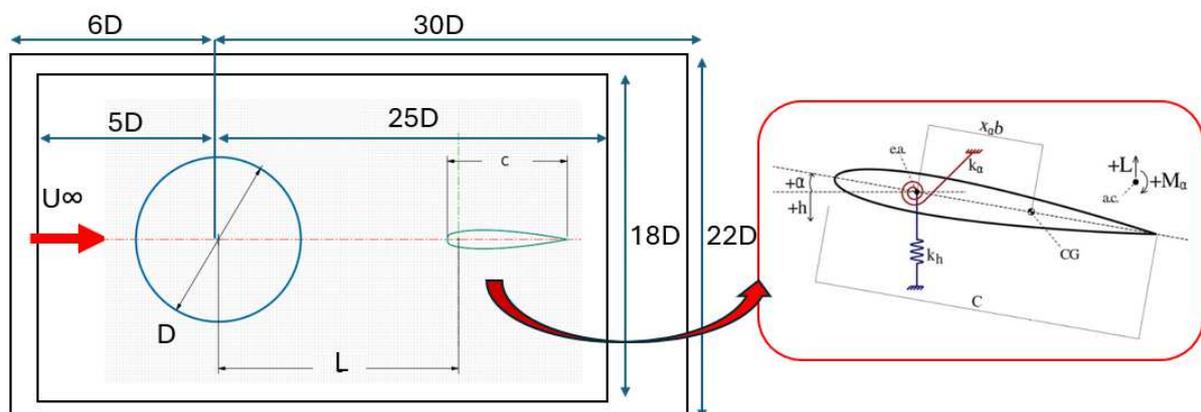


Figura 1: Dominio computacional, y modelo estructural de parámetros concentrados.

El perfil aerodinámico presenta propiedades de masa por unidad de envergadura “ $m/b$ ”, inercias y frecuencias naturales (torsional y longitudinal) tales que, la velocidad crítica de *flutter*, coincide con la velocidad de la corriente libre “ $U_\infty$ ”, es decir, sin la presencia del cilindro, el perfil presenta la ocurrencia del fenómeno *flutter*. Esta sincronización entre “ $U_\infty$ ” y

la velocidad crítica de *flutter*, ha sido establecida intencionalmente para evaluar la influencia de los desprendimientos vorticosos del cilindro en la extracción de potencia del aire por el perfil aerodinámico. Tal sincronización, ha sido calculada mediante el método analítico establecido en Report No. 496 (Theodorsen, T., 1979).

El modelo matemático que describe la dinámica del perfil queda planteado según Ec. ( 2 ).

$$\begin{aligned} \sum F &= F_L - K_h h = m \ddot{h} \\ \sum M &= M_a - K_\alpha \alpha + (K_h h)(x_\alpha b) = I \ddot{\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$F_L$ : Fuerza de sustentación aerodinámica.

$F_R = - K_h h$  : Fuerza del resorte lineal.

$M_a$ : Momento de las fuerzas aerodinámicas, respecto al centro de gravedad del perfil (C.G)

$M_{RT} = - K_\alpha \alpha$  : Momento generado por la fuerza del resorte torsional, respecto al C.G.

$x_\alpha b$  : Distancia desde el eje elástico (e.a. según Figura 1) hasta el C.G.

$M_{RL} = (K_h h)(x_\alpha b)$  : Momento respecto al C.G, debido a la fuerza del resorte lineal.

En la parte derecha de la Figura 1 se observa el modelo de parámetros concentrados del perfil, el cual consta de un resorte lineal, de rigidez " $K_h$ " y un resorte torsional, de rigidez " $K_\alpha$ ", ambos colocados en el eje elástico del perfil e.a. Estas rigideces (" $K_h$ " y " $K_\alpha$ "), han sido calculadas a partir de las frecuencias naturales longitudinal " $f_n$ " y a torsión " $f_t$ ", respectivamente, del perfil aerodinámico, según las ecuaciones de un sistema masa resorte:

$$K_h = m * (2\pi f_n)^2 \quad ; \quad K_\alpha = I * (2\pi f_t)^2 \quad (3)$$

Donde " $f_n$ " y " $f_t$ " son las frecuencias naturales del perfil tales que sincronizan la velocidad de crítica de *flutter* con la velocidad de la corriente libre  $U_\infty$ , e " $I$ " es el momento de inercia del perfil. Debido a que las rigideces " $K_h$ " y " $K_\alpha$ " están calculadas para obtener el fenómeno de *flutter* a la velocidad de la corriente libre " $U_\infty$ " y no se contempla un amortiguamiento estructural, para limitar el crecimiento indeterminado de la amplitud de las oscilaciones, se ha definido una función variable de la rigidez torsional " $K_\alpha$ ", tal que, cuando el ángulo  $\alpha$  se encuentra entre  $\pm 10^\circ$  su valor es constante e igual a  $K_\alpha = I * (2\pi f_t)^2$ , y un incremento lineal a partir de  $\pm 10^\circ$ , hasta llegar a un valor de  $1.69 * K_\alpha$ . Este valor se definió de forma arbitraria, de forma tal que este valor de rigidez torsional está asociado a una velocidad crítica de flutter un 25% mayor a la velocidad de corriente libre " $U_\infty$ " utilizada en el presente trabajo.

Del análisis adimensional del problema, se tiene que, siendo constantes las variables, cuerda del perfil " $C$ ", la velocidad de la corriente libre " $U_\infty$ ," y la frecuencia de *flutter* " $f^*$ ", el coeficiente " $C_p$ " de potencia adimensional, depende de las relaciones  $D/C$  y  $L/C$ , según Ec. ( 4 ):

$$C_p = f \left( Re, \frac{D}{C}, \frac{L}{C} \right) = \frac{\text{Potencia}}{0.5 * \rho * U_\infty^3 * C} \quad (4)$$

Se han definido 5 coeficientes de potencia, para caracterizar la potencia asociada a cada una de las fuerzas y momentos que actúan sobre el perfil aerodinámico, según Ec. (5):

$$C_{P(F)} = \frac{F_L \dot{h}}{0.5 \rho U_\infty^3 C} \quad ; \quad C_{P(R)} = \frac{F_R \dot{h}}{0.5 \rho U_\infty^3 C} \quad (5)$$

$$C_{P(Ma)} = \frac{M_a \dot{\alpha}}{0.5 \rho U_\infty^3 C} \quad ; \quad C_{P(RT)} = \frac{M_{RT} \dot{\alpha}}{0.5 \rho U_\infty^3 C} \quad ; \quad C_{P(RL)} = \frac{M_{RL} \dot{\alpha}}{0.5 \rho U_\infty^3 C}$$

El problema queda caracterizado, al definir “D” y “L”.  
El diámetro del cilindro es ajustado según la Ec. (6):

$$D = \frac{\text{Strouhal} * U_\infty}{\text{frecuencia}} \quad (6)$$

Debido a que la velocidad de la corriente libre “ $U_\infty$ ”, y el número de Strouhal son conocidos (Strouhal  $\approx 0.2$  para el rango de números de Reynolds utilizados en el presente trabajo), el valor del diámetro del cilindro “D” queda dependiente del valor de la frecuencia de desprendimientos de vórtices del cilindro, que se quiera obtener.

En el presente trabajo, ha sido de interés analizar 3 frecuencias de desprendimientos de vórtices del cilindro (ver Ec. (7) ):

$$f_1 = \frac{f^*}{2}; \quad f_2 = f^* \quad ; \quad f_3 = 2 f^* \quad (7)$$

Donde, “ $f^*$ ” es la frecuencia del fenómeno de *flutter* del perfil aerodinámico, y ha sido definida como un parámetro constante en el presente trabajo.

En consecuencia, se han analizado 3 diámetros de cilindro,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , con el objetivo de producir 3 diferentes frecuencias de desprendimientos de vórtices del cilindro “ $f_1$ ”, “ $f_2$ ”, “ $f_3$ ”. Para cada diámetro de cilindro, se han analizado diferentes relaciones  $L/C$ .

#### 4 ANÁLISIS DE LA MALLA COMPUTACIONAL

El método utilizado para la generación de la malla computacional ha sido por superposición de mallas, lo que da lugar a mallas conocidas como “overset meshes”, donde se definen diferentes bloques o mallas, alrededor del cuerpo de estudio, cada bloque o malla más cercano al cuerpo de estudio, con un tamaño de elemento menor que el anterior ([Ansys Documentation – Fluent – Overset Meshes](#)). Estos bloques o mallas se superponen para dar lugar a la malla computacional final utilizada por Ansys Fluent para cada paso de tiempo de la simulación numérica. Entonces, se calcula el desplazamiento del centro de gravedad del perfil para cada paso de tiempo de la simulación, y se aplica dicho desplazamiento a todos los nodos asociados a la malla o bloque que contiene al perfil aerodinámico. En la Figura 2 y a modo de ejemplo, se observa una imagen de la malla para el caso particular con diámetro de cilindro tal que la frecuencia de vórtices  $f_2$  coincide con la frecuencia de *flutter*, es decir,  $f_2 = f^*$  y la separación entre cilindro y perfil  $L$  corresponde a “ $L/C = 2$ ”.

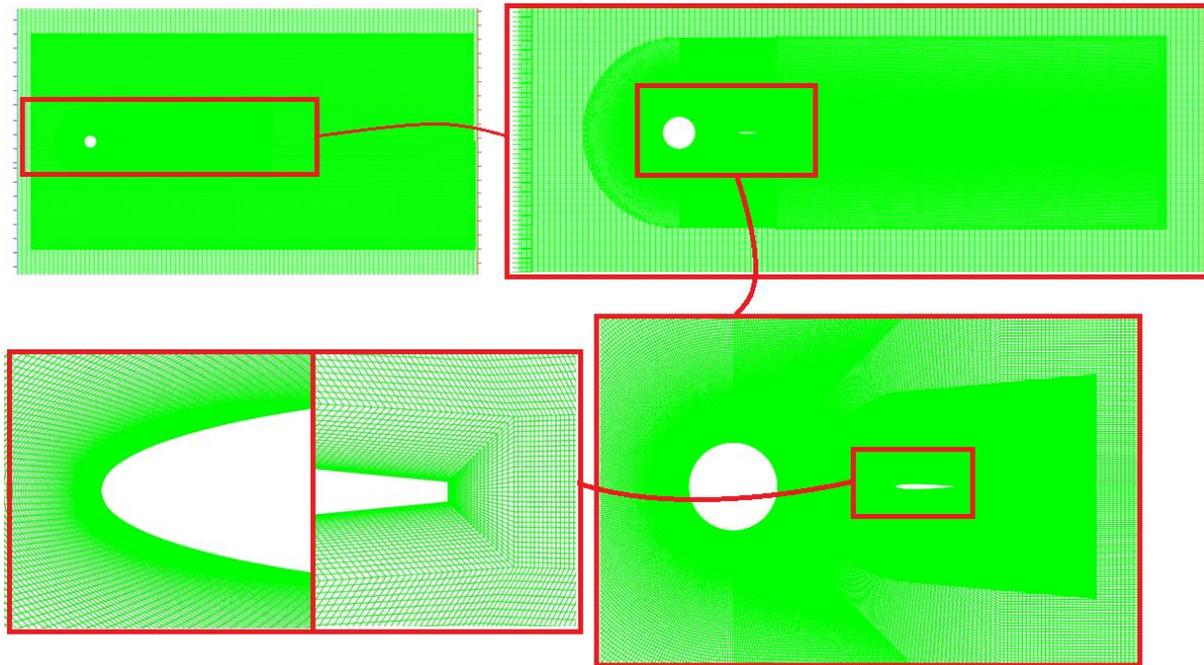


Figura 2: Malla computacional generada para el caso  $f_2 = f^*$  y  $L/C = 2$

En general, las mallas para otras relaciones “D/C” y “L/C” son cualitativamente similares, y cuentan con aproximadamente  $5E5$  elementos. Todas cumplen con los parámetros mínimos de calidad de skewness, ortogonalidad y en particular, cumplen con la máxima relación de “overset donor size ratio”, parámetro específico de este tipo de método de mallado, donde se debe cumplir transiciones “suaves” de tamaños de elementos entre mallas a solapar.

#### 4.1 Independencia de resultados con la malla

Se ha verificado la independencia de resultados con la cantidad de elementos de la malla para diferentes casos de estudio. En la Tabla 1 se muestran los parámetros característicos de 3 mallas analizadas para el caso  $f_2 / f^* = 1$  y  $L/C = 2$ .

Malla	N° de celdas	Máximo skewness	Mínima ortogonalidad	Máximo “overset donor size ratio”	Máxima sustentación [N]	Frecuencia de oscilación h(t) [Hz]
1	1E6	0.76	0.05	4	70	14,8
2	5E5	0.8	0.03	6	73	15.2
3	3E5	0.84	0.01	9	84	15.9

Tabla 1: Parámetros de las mallas analizadas.

Se observa buena concordancia entre los parámetros asociados a cada malla, por lo que, en general se utilizaron mallas con características similares a la malla 2, de  $5E5$  elementos.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Perfil aerodinámico sin cilindro aguas arriba

Se realizaron diferentes simulaciones para evaluar la performance del perfil aerodinámico aislado en una corriente libre incidente con velocidad  $U_\infty$  e intensidad de turbulencia 1%, sin

cilindro aguas arriba.

En la [Figura 3](#) se observan contornos de magnitud de la velocidad del flujo en diferentes instantes de tiempo ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ), donde se visualizan diferentes posiciones del perfil durante la ocurrencia del fenómeno de *flutter*.

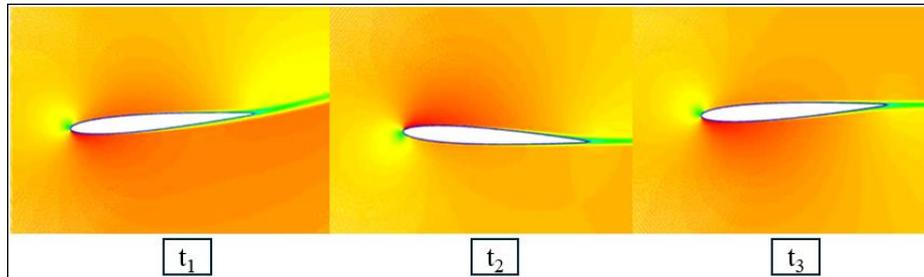


Figura 3: Contornos de velocidad en el perfil aerodinámico durante el flutter. La escala de velocidades va desde 0 [m/s] (color azul), hasta 27 [m/s] (color rojo).

Analizando las curvas de sustentación y resistencia aerodinámicas del perfil en el tiempo para dos casos: con rigidez torsional del resorte “ $k\alpha$ ” constante (según Ec. ( 3 )), y variable, se observa que, en el caso del perfil con rigidez torsional constante, las amplitudes de las fuerzas aerodinámicas aumentan indefinidamente, debido a que se presenta el fenómeno de *flutter*, y no se encuentra definido ningún mecanismo de limitación de las amplitudes de las variables. En el caso del perfil con rigidez torsional variable, ésta actúa como mecanismo limitador del crecimiento de las amplitudes de todas las variables durante el *flutter*.

En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de potencia asociados a las fuerzas y momentos del perfil con rigidez torsional variable (ver Ec. (5)). Estos parámetros han sido obtenidos durante el movimiento oscilatorio ya establecido en el tiempo, y con amplitudes constantes, es decir, luego del transitorio inicial, y se utilizan supra índices “0” debido a que posteriormente estos valores sirven de referencia.

$C_{P(L)}^0$	$C_{P(R)}^0$	$C_{P(RT)}^0$	$C_{P(Ma)}^0$	$C_{P(RL)}^0$
0.022	0.0037	0.011	0.007	0.0015

Tabla 2: Coeficientes de potencia del perfil sin perturbaciones del cilindro.

Estos valores se han comparado con coeficientes y eficiencias de cosechadores basados en *flutter*, recopilados en los trabajos de [Young et al. \(2013\)](#), y [Ma y Zhou \(2022\)](#), y se han encontrado valores cercanos a los valores de la Tabla 2.

De la Tabla 2, se observa que el coeficiente de potencia asociado a la sustentación aerodinámica  $C_{P(L)} = 0.022$ , es aproximadamente 6 veces mayor que el coeficiente asociado a la potencia del resorte lineal  $C_{P(R)} = 0.0037$ . El coeficiente de potencia asociado al resorte torsional  $C_{P(RT)} = 0.011$  es 1.57 veces superior al coeficiente de potencia del momento aerodinámico  $C_{P(Ma)} = 0.007$ , y 9.56 veces superior al coeficiente de potencia del resorte lineal  $C_{P(RL)} = 0.0015$ .

## 5.2 Perfil aerodinámico con cilindro aguas arriba: Visualización de resultados

A modo de visualización de la evolución transitoria de las simulaciones, en la [Figura 4](#), se observan contornos de magnitud de la velocidad en diferentes instantes de tiempo ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$ ,  $t_6$ ) durante un periodo de oscilación del perfil, para el caso particular  $f_2 = f^*$ , y  $L/C = 2$ .

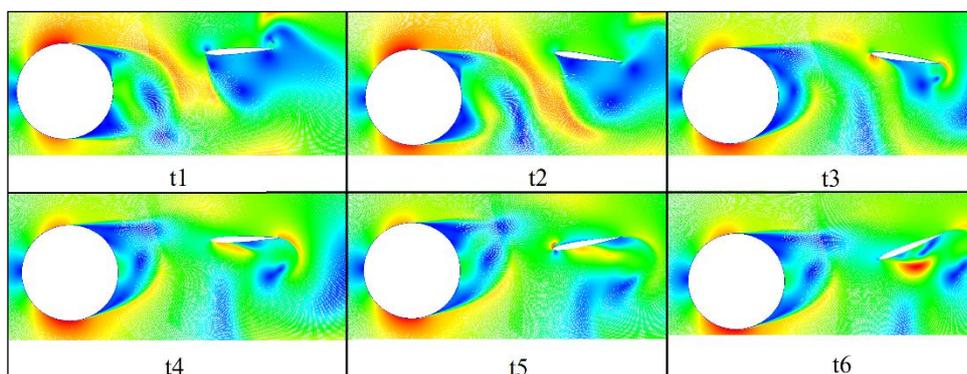


Figura 4: Contornos de velocidad a lo largo del tiempo para caso  $f_2 = f^*$ , y  $L/C = 2$ . La escala de velocidades va desde 0 [m/s] (color azul), hasta 35 [m/s] (color rojo).

De la Figura 4, se observan movimientos oscilatorios rápidos del perfil aerodinámico en la estela del cilindro, y valores máximos globales para la magnitud de la velocidad de 35 m/s en el borde de ataque del perfil, en intervalos de tiempo pequeños. Para otras relaciones de  $L/C$ , el movimiento tiende a ser más suave y menos abrupto.

### 5.3 Perfil aerodinámico con cilindro aguas arriba: Coeficientes de Potencia

La Figura 5 muestra los valores relativos de los coeficientes de potencia del perfil, los cuales resultan de dividir cada coeficiente de potencia (según Ec. (5)), por el valor de referencia obtenido para el perfil aerodinámico solo (sin cilindro aguas arriba), según valores de la Tabla 2.

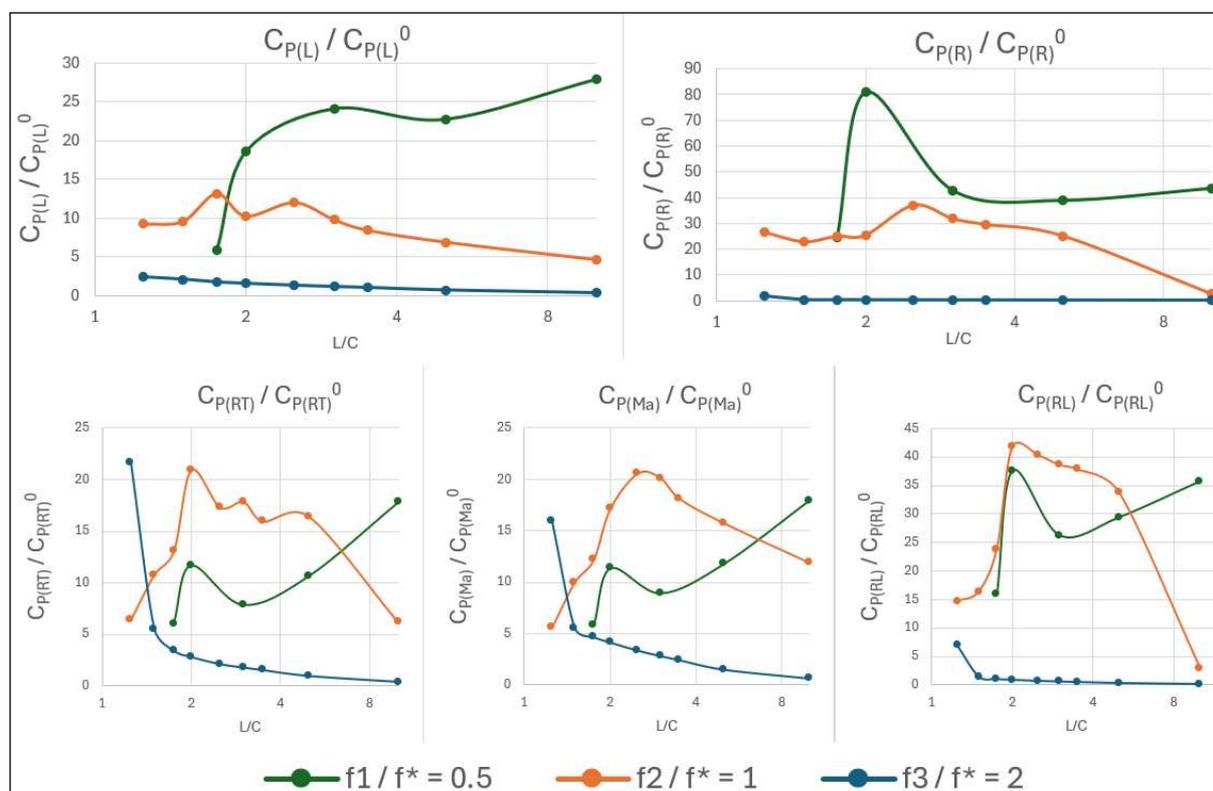


Figura 5: Cocientes de coeficientes de potencia del perfil

De la [Figura 5](#) vemos que, para el caso  $f_1 / f^*$ , es decir, cuando la frecuencia de vórtices del cilindro es la mitad de la frecuencia de *flutter*  $f^*$ , al incrementar  $L/C$  el cociente  $C_{P(L)} / C_{P(L)}^0$  incrementa desde 5.78 a 28. Para los casos  $f_2 / f^*$  y  $f_3 / f^*$  el valor máximo del cociente  $C_{P(L)} / C_{P(L)}^0$  se da para relaciones cercanas a  $L/C = 1.75$ . Un comportamiento similar se ve asociado al cociente  $C_{P(R)} / C_{P(R)}^0$  donde el máximo valor de 80.8 se obtiene para  $L/C = 2$ . Con respecto a los cocientes  $C_{P(RT)} / C_{P(RT)}^0$ ,  $C_{P(Ma)} / C_{P(Ma)}^0$ ,  $C_{P(RL)} / C_{P(RL)}^0$  vemos que, en general, para  $f_3/f^*$  disminuyen con  $L/C$ , llegando a valores menores a 1, lo que indica menor potencia respecto a la potencia asociada al perfil solo, sin cilindro aguas arriba. Para el caso  $f_2/f^*$  se observa que los cocientes alcanzan un máximo para  $L/C$  entre 2 y 2.5, y para el caso  $f_1/f^*$  se observa un máximo local en  $L/C = 2$ , y un incremento con  $L/C$ .

Se realizó un análisis en frecuencia de la dinámica del perfil, y se evaluaron para cada caso las frecuencias longitudinales y torsionales, del movimiento de traslación vertical “ $h(t)$ ”, y del movimiento de rotación “ $\alpha(t)$ ”, del perfil. En la [Figura 6](#), se muestran los valores de las frecuencias longitudinal y torsional de oscilación del perfil aerodinámico, respecto a la frecuencia de *flutter* “ $f^*$ ”, para las diferentes frecuencias de vórtices del cilindro.

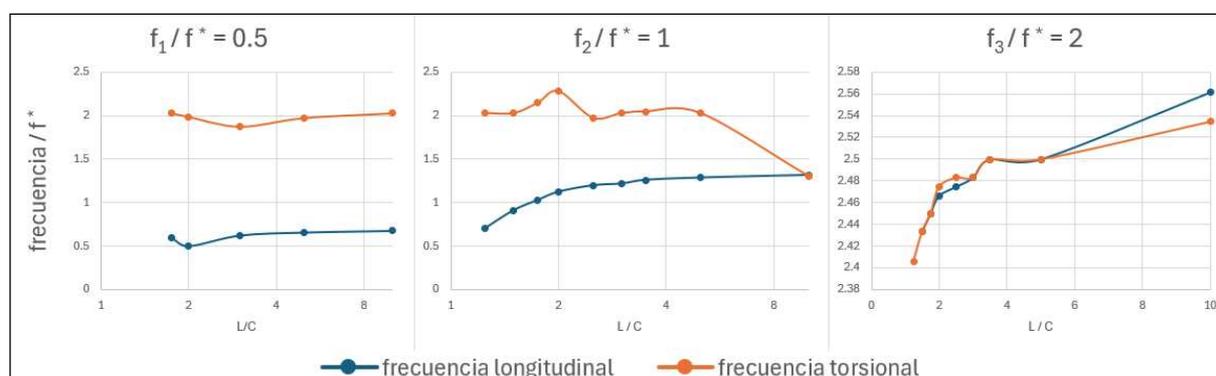


Figura 6: Frecuencias longitudinal y torsional de oscilación del perfil aerodinámico.

A la izquierda de la [Figura 6](#), se observa el caso “ $f_1 / f^*$ ”, es decir, cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices del cilindro es la mitad de la frecuencia de *flutter*  $f^*$  del perfil. En este caso, se observa que tanto la frecuencia longitudinal y la torsional del perfil son aproximadamente constantes con la relación  $L/C$ , siendo la frecuencia longitudinal aproximadamente 0.6 veces, y la frecuencia torsional 2 veces la frecuencia de *flutter*  $f^*$ .

En el centro de la [Figura 6](#), se observa el caso “ $f_2 / f^*$ ”, es decir, cuando la frecuencia de vórtices del cilindro coincide con la frecuencia de *flutter*  $f^*$  del perfil. Se destaca que para la relación  $L/C = 10$ , la frecuencia torsional del perfil coincide con la frecuencia longitudinal, tomando el valor de 1.3 veces la frecuencia de *flutter*  $f^*$ , es decir, el perfil oscila con una frecuencia 1.3 veces superior a la frecuencia de *flutter*  $f^*$ .

A la derecha de la [Figura 6](#), se observa el caso “ $f_3 / f^*$ ”, es decir, cuando la frecuencia de vórtices del cilindro es 2 veces la frecuencia de *flutter*  $f^*$  del perfil. Se observa que para cualquier valor de  $L/C$ , la frecuencia torsional y longitudinal del perfil toman el mismo valor e incrementan ligeramente con la relación  $L/C$ , iniciando en un valor de 2.4 veces  $f^*$  para  $L/C = 1.25$ , y llegando hasta 2.55 veces  $f^*$  para  $L/C = 10$ .

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron simulaciones de dinámica de fluidos computacional con interacción fluido-estructura para el estudio de captación de energía por un perfil aerodinámico con 2 DOF, en la estela de un cilindro con 0 DOF. Se analizaron las potencias involucradas

asociadas a fuerzas y momentos sobre el perfil, y se cuantificaron mediante cociente de coeficientes, que cuantifican la potencia generada respecto al perfil en una corriente libre, sin cilindro aguas arriba.

Los resultados muestran que el perfil montado elásticamente en la estela de un cilindro es capaz de aumentar considerablemente su energía de oscilación, especialmente para determinadas frecuencias de vórtices del cilindro, y a distancias específicas de separación entre perfil y cilindro ( $L/C$ ).

En particular, cuando la frecuencia de vórtices del cilindro es la mitad de la frecuencia de flutter ( $f_1 / f^* = 0.5$ ), podemos decir que, los cocientes  $C_{P(L)} / C_{P(L)}^0$  y  $C_{P(R)} / C_{P(R)}^0$  toman los mayores valores, y que, los modos longitudinales y torsionales del perfil no se encuentran acoplados.

Cuando la frecuencia de vórtices del cilindro coincide con la frecuencia de flutter ( $f_2 / f^* = 1$ ), podemos decir que, los cocientes  $C_{P(RT)} / C_{P(RT)}^0$ ,  $C_{P(Ma)} / C_{P(Ma)}^0$ ,  $C_{P(RL)} / C_{P(RL)}^0$  toman los mayores valores, observándose máximos locales para distancias  $L/C \approx 2$ , y que, los modos longitudinales y torsionales del perfil se acoplan para  $L/C = 10$ .

Cuando la frecuencia de vórtices del cilindro es el doble de la frecuencia de flutter ( $f_2 / f^* = 2$ ), podemos decir que, en general, todos los cocientes toman menores valores con respecto a los casos anteriores, y disminuyen con  $L/C$ . Además, los modos longitudinales y torsionales del perfil se acoplan para todos los valores  $L/C$ .

Futuros trabajos analizarán la energía obtenible y la conveniencia o no de colocar el perfil en la estela de un cilindro cuando la velocidad del flujo se aleje de la velocidad crítica de flutter.

## REFERENCIAS

- Ansys, Documentation, 2024. Part III: Solution Mode. Chapter 6: Reading and Manipulating Meshes. Overset Meshes.
- Ansys, Documentation, 2024. Fluent theory guide: Chapter 3: Flows using sliding and dynamic meshes. Dynamic mesh theory. Six DOF Solver Theory.
- Durbin, P. A., and Pettersson, R., *Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flow*. Iowa State University, USA. Wiley. Second Edition. 2010.
- Herrera, M., y Scarabino, A. Estudio numérico de la respuesta aeroelástica de un perfil aerodinámico en la estela de un cilindro. *Mecánica Computacional*. Vol. 40, pags. 1067-1067, 2023.
- Ma X. y Zhou S. A review of flow induced vibration energy harvesters. *Energy Conversion and Management*, 254:115223, 2022.
- 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.
- Menter, F.R. "Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", *AIAA-Journal.*, 32(8), pp. 1598 – 1605, 1994.
- Theodorsen, T., *General Theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter*. Ames Research Center NASA, 1979.
- Valdez M., Lopera, F., Flores Larsen, S., Preidikman. Simulación computacional de un arreglo de cosechadores de energía basados en vibraciones inducidas por flujo. *Mecánica Computacional*, Vol XL, pags. 1043-1051. 2023.
- Young J., Lai J.C.S., y Platzer M.F. A review of progress and challenges in flapping foil power generation. *Progress in Aerospace Sciences*. Vol 67, pags. 2-28. 2013.
- 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>.