

Aerogeneradores resonantes por *VIV*

David Jesús Yáñez Villarreal
Vortex Bladeless S.L.
www.vortexbladeless.com

Resumen. Nuevos instrumentos de generación eólica que cuenten con características diferentes a las de los aerogeneradores convencionales pueden fomentar el aprovechamiento de esta fuente de energía limpia. Los fenómenos de resonancia aeroelástica son normalmente considerados un problema, pero también pueden ser el fundamento de una tecnología para la transformación de energía renovable. Este trabajo realiza una sinopsis condensada de los aspectos más generales de una tecnología de máquinas eólicas carente de ejes mecánicos y basada en la interacción fluido-estructura *VIV*. La utilización de campos magnéticos permite modificar pasivamente la rigidez de la estructura, incrementando el rango de lock-in y el número de horas de trabajo al año. La inducción electromagnética es una de las posibles estrategias con las que transformar el movimiento oscilatorio en energía eléctrica.

1 Introducción

La efectividad de las energías de origen renovable ha crecido notablemente en los últimos años y la energía eólica ha sido una de las responsables. El incremento de escala de las máquinas eólicas ha permitido colocarlas entre las fuentes de energía más utilizadas. Sin embargo, en el ámbito de la energía distribuida, en donde la energía se genera cerca del punto de consumo, la tecnología más destacable quizá sea la energía fotovoltaica. La carencia de elementos mecánicos móviles permite recoger la energía del sol con un mínimo mantenimiento y nulo impacto medioambiental en forma de ruido. Además, es bien conocido que la combinación de fuentes de energía renovable es sinérgica por la compensación mutua en los periodos de ausencia de viento, de luz, etc. El desarrollo de un instrumento de generación eólica que emule las características que han hecho de la fotovoltaica la fuente de energía protagonista en el contexto de la energía distribuida puede ser muy útil.

En relación a la gran generación, la eólica *offshore* (molinos instalados en el océano) es muy prometedora. Uno de los problemas a los que se enfrenta es la agresividad del entorno marino, especialmente por la corrosión de elementos mecánicos móviles del molino. La eliminación total de engranajes, rodamientos, etc. en un dispositivo capaz de recoger la energía del viento puede ser ventajoso en este ámbito.

La influencia en la fauna avícola, el impacto visual, la aparición de fenómenos *EMI* con antenas o radares, los costes y otros variados factores también deben considerarse a la hora de desarrollar un nuevo dispositivo de generación eólica.

2 Resonancia

Uno de los eventos más famosos producido por resonancia aerodinámica es el colapso del puente de *Tacoma Narrows* [1]. La resonancia surge cuando una oscilación es reforzada por un movimiento periódico. En aeroelasticidad, el aire puede inducir un movimiento oscilatorio en un cuerpo cuando su frecuencia natural y la frecuencia de aparición de vórtices o torbellinos en su estela son semejantes. Las vibraciones inducidas en un cuerpo por vórtices se conocen como fenómenos de *VIV* [2]. El desprendimiento de torbellinos (figura 1) ocurre con periodicidad, apareciendo fuerzas en dirección normal a la corriente incidente. Existe una constante de proporcionalidad St entre la velocidad media de la corriente incidente v , la inversa de su dimensión característica Φ y la frecuencia f a la que se desprenden los torbellinos:

$$f = \frac{St \cdot v}{\Phi} \quad (1)$$

El primer modo de oscilación es una de las frecuencias fundamentales en las que típicamente se manifiestan fenómenos de resonancia.

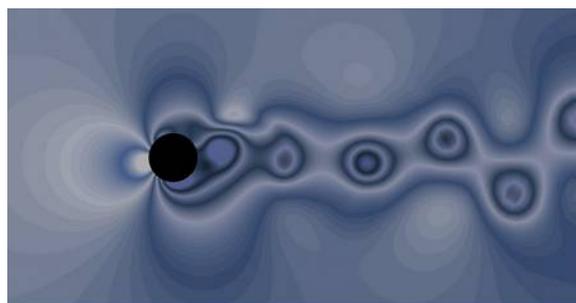


Figura 1. Contorno de presiones 2D de un *VIV* obtenido por *CFD* para un modelo *DNS*, $Re = 416$ y $A/D = 0,2$ (*AcuSolve v14*, *HyperWorks®*, *Altair®*).

Generalmente, la dirección del viento es variable. Un dispositivo sin ejes mecánicos que deba estar en todo momento bien orientado ha de tener una sección circular. El desprendimiento de torbellinos, al contrario que otros fenómenos dinámicos como el flameo o galope, se produce con facilidad en cuerpos con esta sección. Por otro lado, es sabido que a medida que nos alejamos del suelo, el gradiente de velocidades del viento suele ser creciente. La ley exponencial *Hellmann* [3] es una conocida aproximación a este hecho. Por estos dos motivos, una estructura vertical, esbelta y de sección circular parece adecuada para recolectar energía eólica sin precisar de ejes mecánicos móviles.

El rendimiento en la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica debe de acercarse todo lo que sea posible al límite de *Betz* [4]. Para ello llamemos mástil a la parte rígida de la estructura que interacciona directamente con el viento. Como se verá a continuación, podemos pretender la sincronía en el desprendimiento de vórtices a lo largo de la longitud del mástil modificando su diámetro en función de la altura. De esta manera, las fuerzas perpendiculares a la línea de corriente trabajarán en fase y al unísono, alcanzando un mayor rendimiento que si no lo hicieran.

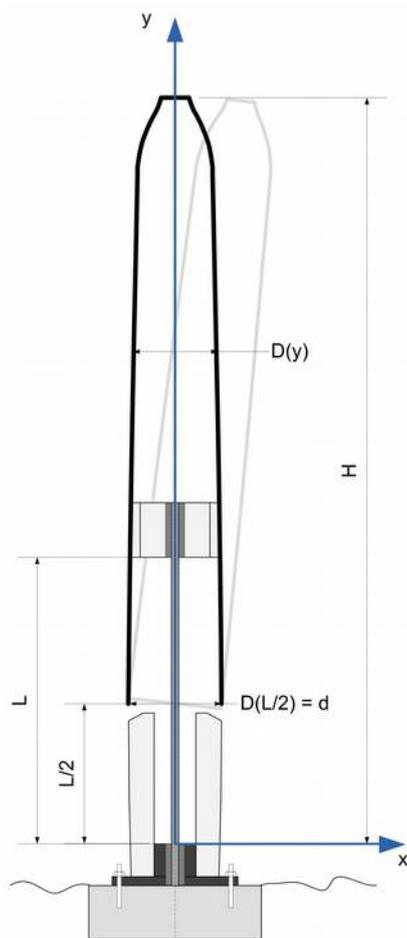


Figura 2. Esquema de la evolución del diámetro del mástil en función de la altura.

La dimensión característica para estructuras cilíndricas mencionada en la ecuación (1) toma el valor del diámetro. Esta aproximación se ajusta bien para estructuras estáticas, pero con estructuras cuya oscilación no es despreciable se puede comprobar que un mejor ajuste se obtiene con:

$$\Phi = D + a \cdot X \quad (2)$$

En donde la dimensión característica Φ es la suma del diámetro del mástil y la amplitud de oscilación X multiplicada por un factor de ajuste a dependiente de *Reynolds*. Un correcto ajuste de este factor permite un desprendimiento ordenado de vórtices.

Supongamos una varilla flexible de longitud libre L empotrada en su parte superior al mástil y en su parte inferior a una fijación solidaria al suelo (figura 2). Considerando el mástil un sólido rígido que oscila ángulos pequeños, es aceptable asumir que en $y = L/2$ la amplitud de oscilación x es nula [5]. En esta posición la dimensión característica según (2) coincide con el diámetro del mástil $\Phi = D(L/2) = d$ y la frecuencia f de desprendimiento de vórtices con velocidad del viento $v_{\infty}(L/2)$ es:

$$f = \frac{S_t \cdot v_{\infty}(L/2)}{d} \quad (3)$$

Para cualquier otra sección del mástil en donde el valor de la oscilación no es despreciable, la frecuencia de desprendimiento de vórtices resulta de:

$$f(y) = \frac{S_t \cdot v_{\infty}(y)}{D(y) + a \cdot X(y)} \quad (4)$$

En donde $v_{\infty}(y)$ y $X(y)$ son respectivamente la velocidad del fluido y la amplitud de oscilación del mástil a cada altura y . Así, si H es la distancia desde el empotramiento de la varilla flexible en la fijación solidaria al suelo hasta la parte más elevada del dispositivo y el desplazamiento en la parte superior del dispositivos es γ veces el diámetro del mástil en su parte más baja:

$$X(y) = \frac{y - L/2}{H - L/2} \cdot \gamma \cdot d \quad (5)$$

Igualando la frecuencia de desprendimiento de vórtices en toda la longitud del mástil obtenemos finalmente que :

$$D(y) = d \cdot \frac{v_{\infty}(y)}{v_{\infty}(L/2)} - a \cdot X(y) \quad (6)$$

Una correcta estimación del gradiente de velocidades que incluya el efecto de discontinuidad en el extradós de la cúspide del mástil debe de seguir la misma identidad de frecuencia de desprendimiento de

vórtices que el resto del mástil que, para alcanzar la deseada resonancia, ha de ser coincidente con la frecuencia del primer modo de oscilación natural de la estructura.

3 Sintonizado

Como se ha visto anteriormente, la frecuencia de desprendimiento de vórtices es proporcional a la velocidad de viento que, como se sabe, dista mucho de ser constante. Por otro lado, como la frecuencia de oscilación natural de una estructura es fija, el rango de velocidades de viento en el que se alcanza la resonancia o rango de *lock-in* [6] es pequeño. Para incrementar el número de horas equivalentes año en los que el dispositivo opera, debemos incrementar este rango de velocidades. A continuación se muestra una estrategia que nos permite hacerlo sin introducir ejes mecánicos móviles.

La figura 3 muestra el esquema de oscilador armónico amortiguado en donde una masa m oscila por la acción de una fuerza F y está unida a un resorte de constante de elasticidad k y a un amortiguador de constante de amortiguamiento c .

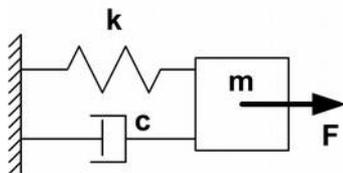


Figura 3. Esquema de oscilador armónico amortiguado.

El comportamiento de un aerogenerador resonante por *VIV* sin sistema de sintonizado puede entenderse en base a este modelo. La masa de un mástil sustentado por una varilla con una cierta rigidez y amortiguado por el alternador y las pérdidas, resonará si la fuerza oscilatoria inducida por el viento tiene la siguiente frecuencia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (7)$$

Una posible estrategia para incrementar el rango de velocidades de viento en los que el dispositivo se encuentra en resonancia puede ilustrarse con el siguiente esquema:

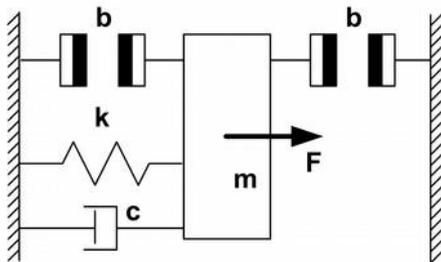


Figura 4. Esquema de oscilador con sistema de sintonizado magnético.

Al oscilador armónico amortiguado se le han añadido dos pares de imanes permanentes de magnetización b , enfrentados por el mismo polo en donde en cada pareja, uno es solidario a la masa y el otro es fijo. La fuerza magnética que aparece entre dos imanes permanentes es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia media de sus polos, es decir, se comportan como un resorte de compresión con elasticidad no constante dependiente del desplazamiento. A medida que se acercan, el crecimiento de la fuerza de repulsión entre ellos es de orden superior al lineal. Así, ahora la frecuencia de oscilación es creciente con la amplitud:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k+k'(x))}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (8)$$

En donde k' representa la parte de elasticidad correspondiente a la repulsión magnética.

Como ya se ha mencionado, en el diseño del dispositivo se busca una simetría axial completa con el objetivo de tener un comportamiento independiente de la dirección del viento. El efecto buscado puede implementarse con una o más parejas de imanes permanentes y circulares, en donde el de menor diámetro es el fijo y se encuentra magnéticamente confinado en el interior del de mayor diámetro. Como ejemplo, su polarización puede ser axial (figura 5a) o radial (figura 5b), etc.

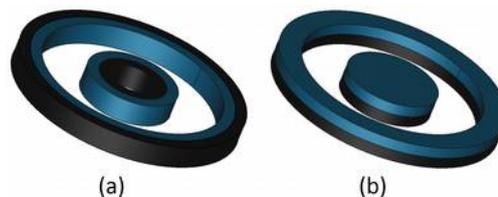


Figura 5. Posible disposición de imanes permanentes para la sintonización del dispositivo. En ambos casos el imán exterior es solidario al mástil y el interior es fijo.

A modo de ejemplo, en la figura 6 se muestra la evolución temporal de fuerzas en una oscilación completa de un mástil perteneciente a un modelo de laboratorio.

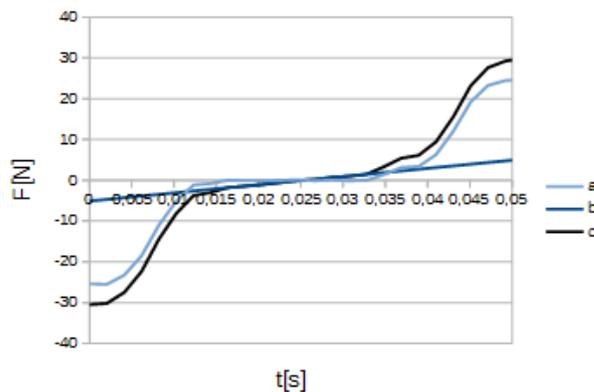


Figura 6. Evolución de fuerzas debidas a la elasticidad de la varilla y a la repulsión magnética del sistema de sintonizado en función de la amplitud de oscilación.

En él, la evolución de la fuerza a es de origen magnético, la de la fuerza b se debe a la elasticidad de la varilla y c es la evolución de la fuerza percibida por el mástil resultante de las dos anteriores.

Un aumento de velocidad de viento produce un incremento de amplitud de oscilación. A mayor amplitud de oscilación la energía potencial acumulada en una flexión crece más rápido que con un resorte lineal y la frecuencia de oscilación del conjunto se incrementa. Así, sin la utilización de ningún actuador, el rango de *lock-in* (figura 7b) alcanza en el eje horizontal valores superiores a los alcanzados con un *lock-in* clásico (figura 7a).

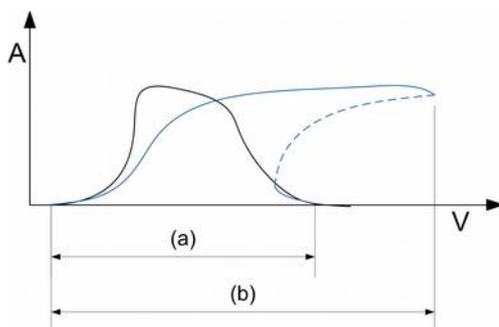


Figura 7. Ilustración simplificada de la evolución del *lock-in* (amplitud vs velocidad del fluido) para un dispositivo sin sistema de sintonizado (a) y con sistema de sintonizado (b).

En ensayos de túnel de viento (figura 8) se ha comprobado que la salida del rango de *lock-in* por exceso de velocidad en un modelo con sistema de sintonizado incorporado es abrupta. Como consecuencia de ello, los sistemas de frenado ante la presencia de fuertes vientos es prescindible.



Figura 8. Ensayo en el túnel Aclal6 del CIDA (IDR/UPM) de un modelo de 1m de altura, diámetro máximo del mástil de 95mm sustentado por una varilla de fibra de carbono, circular, pultrusionada y maciza de 10mm de diámetro. (Febrero 2018).

4 Alternador

La conversión de la energía estructural en energía eléctrica puede realizarse por diferentes métodos. Como la oscilación del dispositivo es muy próxima a

la de un *cantilever*, la utilización de materiales con fuerte acoplamiento electromecánico es muy sugestiva. Si en algún momento futuro la resistencia a la fatiga y la densidad de potencia de estos materiales mejora, los aerogeneradores resonantes por VIV podrán integrarlos.

La opción actualmente más desarrollada es la obtención de energía eléctrica mediante inducción electromagnética, concretamente mediante la utilización de un alternador de imanes permanentes. La imposición de excluir ejes móviles u otras estrategias mecánicas y el carácter esférico y variable del movimiento del mástil condiciona enormemente el diseño de un alternador propio para esta tecnología. En una primera aproximación y dado que la máxima velocidad del mástil se produce a su paso por la posición neutra de la oscilación, parece atractivo desde un punto de vista electromagnético que la interacción entre imanes y bobinas se produzca en el momento de máxima verticalidad del mástil. Se ha podido comprobar que con esta estrategia la resonancia toma una trayectoria circular y debilitada o incluso desaparece. Esto ocurre por la lógica búsqueda del sistema de una trayectoria de mínima energía. Por otro lado, la interacción entre imanes y bobinas en posición de flexión máxima e incluso las fuerzas que se producen entre imanes y núcleos de hierro eléctrico son admitidas por la dinámica del sistema.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el diseño del alternador es la necesidad de mantener una simetría axial completa. El dispositivo ha de comportarse de manera idéntica independiente de la dirección del viento. Por ello, imanes permanentes en forma de anillo y solidarios al mástil vuelve a ser la estrategia más natural. Por último debe destacarse los beneficios aerodinámicos que se desprenden de disponer de un mástil liviano tanto en amplitud como en rango de *lock-in* [7]. La utilización dual del anillo móvil tanto para la generación de energía como para el sintonizado de la estructura ahorra peso y coste al sistema.

En la figura 9 se esquematiza la disposición de los diferentes elementos del alternador. Los anillos de imanes permanentes b son solidarios al mástil. Cuando este se flexiona se produce su interacción con las bobinas y los imanes de sintonizado ubicados en el estátor a que a su vez se sustenta en el soporte fijado al suelo en su parte inferior c .

Como cabe esperar los métodos convencionales de rectificado, filtrado y regulación eléctrica son igualmente aplicables aquí. La salida de potencia eléctrica de este alternador, como en otros muchos casos es alterna de amplitud y frecuencia variable. Si se desea, tras su rectificado y filtrado queda transformada en corriente continua.

Otras estrategias más exóticas de conversión de energía mecánica en energía eléctrica no han sido evaluadas por el momento.

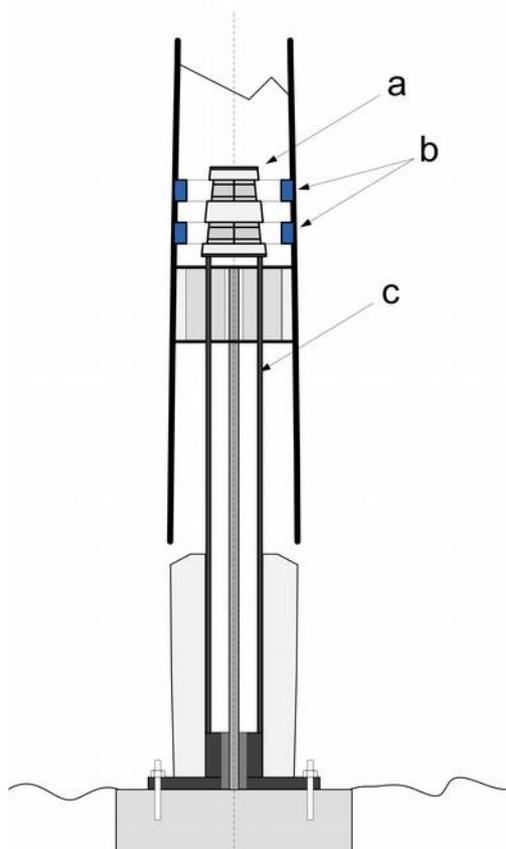


Figura 9. Disposición del alternador y el sistema de sintonizado.

5 Fatiga

Los aerogeneradores resonantes por *VIV* se caracterizan por la ausencia de elementos mecánicos que puedan degradarse por efecto de la fricción. Sin embargo, el dispositivo cuentan con una varilla de fibra de carbono sometida a carga dinámica cíclica a flexión. Este tipo de demanda produce la rotura del material por fatiga. Un breve análisis preliminar da una orientación de la magnitud del problema.

Aplicando el principio de prudencia se considera un dispositivo cuya flexión se produjera siempre con un ángulo máximo, sobre un mismo plano y con una frecuencia de trabajo ininterrumpida de 5Hz. La formulación clásica:

$$S_f = a \cdot N^b \quad (9)$$

con un $S_{ut} = 500$ MPa y $S'_e = 252$ MPa y factores $K_a = 0,96$, $K_b = 0,94$, $K_q = 0,98$, $K_d = 1$, $K_e = 0,98$, $K_g = 0,97$ y $K_c = 0,897$ arroja un resultado de 19,83 años.

6 Discusión

El cálculo del coste o *LCoE* de cualquier fuente de energía relaciona por un lado la inversión total que se

afronta en su fabricación, instalación, mantenimiento y achatarrado/reciclado y por otro, la energía que genera a lo largo de su vida operativa. En este ratio influyen muchos aspectos que determinan su valor final. En una instalación eólica, la influencia de la estela en el comportamiento de dispositivos vecinos determina la distancia mínima a la que pueden disponerse unos de otros. Una menor distancia es favorable a una reducción del coste de la energía. Experimentos preliminares con aerogeneradores de este tipo permite anticipar la aparición de fenómenos de sincronía y otros comportamientos emergentes propios de sistemas caóticos. Dispositivos colocados a una distancia equivalente a la mitad de su altura no sufren una reducción dramática de su rendimiento pero aún deben realizarse estudios más rigurosos en este área.

La capacidad del dispositivo para soportar fuertes vientos es importante en muchas zonas del planeta. Para salvaguardar su integridad, los molinos convencionales diseñados para enfrentar velocidades de viento elevadas se dotan de sistemas de frenado y variación del ángulo de incidencia de sus palas. En el caso de los aerogeneradores resonantes por *VIV* los vientos fuertes producen un desacoplamiento entre la frecuencia de oscilación estructural y la de aparición de vórtices. Así, la resonancia y la oscilación desaparecen y las fuerzas de sustentación pierden importancia frente a las de arrastre. Experimentos preliminares en este área apuntan una tolerancia notable a vientos fuertes y baja resistencia a la colisión objetos proyectados por estos. Aún deben realizarse estudios más rigurosos en este área.

Especialmente en entornos urbanos, el impacto visual y medioambiental del dispositivo influirá en su coste y aceptación como instrumento de generación eólica.

7 Conclusiones

La implementación de un dispositivo de generación eólica basado en resonancia aeroelástica es factible. Se ha esgrimido lo deseable que es recolectar la energía del viento con un dispositivo que minimice su necesidad de mantenimiento, especialmente en lo que a generación distribuida se refiere. Para ello se propone un aerogenerador esbelto y de sección circular cuyo diámetro se hace variable con la altura. Para mantener la resonancia en un mayor rango de velocidades de viento se ha mostrado una estrategia basada en la repulsión magnética utilizando imanes permanentes. Para la conversión de energía mecánica en energía eléctrica se ha ilustrado la utilización de alternadores de imanes permanentes cuyo estátor es solidario al suelo y su parte móvil es solidaria a la parte oscilante de la estructura. Ningún elemento mecánico susceptible degradarse por fricción es necesario.

Referencias

- [1] K. Y. Billah, and R.H. Scanlan, “Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks”, *Amer. J. Phys.* 59, 1991, pags 118-124.
- [2] C. C. Feng, “The measurement of vortex-induced effects in a flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders” *MSc thesis, University British Columbia, Vancouver*, 1968.
- [3] D. A. Spera and T. R. Richards. “Modified power law equations for vertical wind profiles”, *NASA Lewis Research Center*, 1979.
- [4] A. Betz. “Das Maximum der theoretisch moglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren” *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, 1920, pags 307–309.
- [5] D. J. Yáñez “An electrical power generator and an electrical generator method”, *Patent W PCT/EP2015/072802*, 2015.
- [6] R. Bourguet, G. E. Karniadakis, M. S. Triantafyllou. “Lock-in of the vortex-induced vibrations of a long tensioned beam in shear flow”, *Journal of Fluids and Structures*, 2011, vol. 27, pags. 838-847.
- [7] J. K. Vandiver, “Damping Parameters for flow-induced vibration”, *Journal of Fluids and Structures*, 2012, vol. 35, pags 105-119.

Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-SA 4.0) de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es> En líneas generales: Es libre de: · Compartir – Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra. · Transformar la obra y crear obras derivadas. · Hacer un uso comercial de esta obra. Bajo las condiciones siguientes: · Reconocimiento — Debe reconocer al autor de la obra original (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoya el uso que hace de su obra). · Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 726776