

UN CONCEPTO NO CONVENCIONAL BASADO EN “FLUTTER” PARA COSECHAR ENERGÍA¹

Martín E. Pérez Segura², Emmanuel Beltramo², Bruno A. Rocca^{2,3}, Marcelo F. Valdéz⁴,
Marcos L. Verstraete³, Luis R. Ceballos³ y Sergio Preidikman²

RESUMEN: La cosecha de energía ha adquirido un papel preponderante en la actualidad debido a su creciente aplicación en la alimentación de dispositivos de muy baja potencia, tales como sensores inalámbricos, transceptores de radiofrecuencia, dispositivos de carga y cámaras. Entre otras alternativas, la cosecha de energía eólica a partir de fenómenos aeroelásticos desempeña un papel fundamental en el suministro de energía para el funcionamiento prolongado de dichos dispositivos, reduciendo o anulando el uso de baterías. En este artículo se presenta un concepto que explora la posibilidad de recolectar energía del flujo de aire a partir de un arreglo de dispositivos cosechadores dispuestos en tándem, contruidos mediante alas multifuncionales de gran alargamiento, y que experimentan movimientos oscilatorios bajo la acción del viento. La eficiencia de estos sistemas depende, de manera combinada, de fenómenos inherentemente no-lineales y de la sinergia aerodinámica entre los cosechadores y entre estos y sus estelas. Además, se presenta un estudio preliminar que analiza la factibilidad del concepto mediante técnicas de co-simulación que permiten investigar la interacción entre el fluido y las estructuras deformables. Los resultados del presente trabajo son alentadores ya que evidencian el potencial tanto del concepto propuesto como de la combinación de estas nuevas tecnologías con métodos de diseño y análisis aeroelástico para crear una nueva generación de cosechadores de energía.

Palabras clave: cosecha de energía, energía eólica, “flutter”, piezoaeroelasticidad, vibraciones inducidas por flujo

A FLUTTER-BASED NON-CONVENTIONAL CONCEPT FOR ENERGY HARVESTING

ABSTRACT: Energy harvesting has currently taken a central role due to its application to feed low power devices, such as wireless sensors, radio-frequency transceivers, charging devices and cameras. Among other alternatives, wind energy harvesting based on aeroelastic phenomena plays a pivotal role in providing sufficient power for extended operation of such devices with little or no battery replacement. In this article, a concept that explores the possibility of harvesting wind energy using an array of harvesting devices is presented. Each device is built as a long span multifunctional wing that exhibits oscillatory motions under the action of the wind. The efficiency of these systems depends on inherently non-linear phenomena, as well as on the aerodynamic synergy between the harvesters, and between them and their wakes. In addition, a preliminary study of the feasibility of the concept is conducted through co-simulation techniques that allow one to investigate the fluid-structure interaction. The results of this effort are encouraging since they highlight the potential not only of the proposed concept but also of the combination of these new technologies with aeroelastic analysis and design methods to create a new generation of power harvesters.

Keywords: energy harvester, flow-induced vibrations, flutter, piezo-aeroelasticity, wind energy

¹ Artículo recibido el 24 de noviembre de 2020 y aceptado para publicación el 12 de diciembre de 2020.

² Universidad Nacional de Córdoba—CONICET. Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT), Córdoba, Córdoba 5000, Argentina; Emails: mperezsegura@unc.edu.ar; ebeltramo@unc.edu.ar; spreidikman@unc.edu.ar

³ Grupo de Matemática Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba X5804BYA, Argentina; Emails: broccia@ing.unrc.edu.ar ; mverstraete@ing.unrc.edu.ar; lceballos@ing.unrc.edu.ar

⁴ Universidad Nacional de Salta—CONICET. Facultad de Ingeniería and Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Salta, Salta 4400, Argentina; Email: mfvaldez@unsa.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La energía extraída del viento ha sido, y posiblemente seguirá siendo una fuente vital de energía renovable. Tradicionalmente, la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica o eléctrica se ha realizado (casi exclusivamente) mediante el uso de turbinas eólicas estratégicamente dispuestas en parques eólicos, con el fin de maximizar el aprovechamiento del potencial eólico disponible. Estas turbinas permiten una producción de energía más eficiente y reducen los costos de electricidad, a tal punto que se proyectan más de 1000 gigavatios de capacidad eólica acumulada para el año 2050 (Gorini et al., 2019). Recientemente, los nuevos diseños de turbinas buscan reducir su tamaño con el fin de poder instalarlas en infraestructuras urbanas y suburbanas. Sin embargo, todavía existe cierta preocupación respecto a estos desarrollos, fundamentalmente en lo que refiere a la generación de ruido y vibraciones, a la rentabilidad, y a la seguridad. Consecuentemente, mientras continúan los impactos de la pandemia de coronavirus en la salud, la política, la economía y la sociedad, y a medida que se desarrollan los planes de recuperación, esta coyuntura representa una oportunidad para ponernos en el camino hacia el desarrollo sostenible.

En lo que concierne a los efectos del viento, una estructura flexible sometida a la acción de cargas provenientes del flujo de aire puede experimentar varios tipos de respuestas, como bifurcaciones (Abdelkefi et al., 2012), oscilaciones de ciclo límite (Eskandary et al., 2011), oscilaciones autoexcitadas (Gendelman, 2011), resonancias internas (Gilliatt et al., 2003), y movimientos caóticos (Afonso et al., 2017). De entre los fenómenos de origen aerodinámico, tales como oscilaciones inducidas por vorticidad, “buffeting”, y “galloping”, el flameo (“flutter” en inglés) es el que reviste de interés en este trabajo y consiste en oscilaciones autoexcitadas experimentadas por una estructura cuando la velocidad del viento supera un valor crítico. Estos fenómenos pueden dar lugar a vibraciones no deseadas y, muchas veces, excesivas. Por lo tanto, los campos de la ingeniería civil y aeronáutica se han concentrado en minimizar estas vibraciones en diversos sistemas, tales como edificios, puentes, aeronaves, cañerías, y líneas de transmisión, con el fin de predecir y evitar posibles fallas y/o el colapso de estas estructuras. En efecto, la comunidad científica ha clasificado al flutter como un fenómeno destructivo, altamente no-lineal, y de naturaleza no estacionaria.

Últimamente, ha surgido una nueva perspectiva que propone a los fenómenos aeroelásticos asociados con no linealidades estructurales y/o aerodinámicas como mecanismo no convencional de generación de energía (McCarthy et al., 2016; Wang et al., 2020), especialmente para alimentar sistemas de bajo consumo eléctrico (Daqaq et al., 2014). En este contexto, la cosecha de energía se define como el proceso por el cual la energía presente en el entorno de un sistema es convertida en una forma utilizable de energía con el fin de, por ejemplo, alimentar sensores, actuadores, u otros dispositivos electrónicos.

Investigaciones recientes han explorado la posibilidad de desarrollar cosechadores de energía que utilizan vibraciones mecánicas causadas por inestabilidades aeroelásticas como fuente principal de energía de entrada. En este sentido, la conversión de las vibraciones en energía aprovechable puede realizarse mediante mecanismos de transducción electromagnéticos (Carneiro et al., 2020), electrostáticos (Khan and Qadir, 2016), inteligentes (“smart materials”) (Batra and Alomari, 2017) o piezoeléctricos (Elahi et al., 2018). Particularmente en el campo de la aeroservoelasticidad, los materiales piezoeléctricos han sido históricamente empleados para controlar o modificar el comportamiento aeroelástico de distintos sistemas y, más recientemente, han sido utilizados para generar/cosechar energía (Safaei et al., 2019), debido principalmente a su gran versatilidad y eficiencia en un amplio intervalo de frecuencias.

La mayor parte de los estudios relativos a la cosecha de energía basada en flutter mediante transductores piezoeléctricos embebidos se concentran en el diseño del cosechador de energía como un dispositivo aislado, y en determinar la influencia de distintos parámetros (geometría, velocidad del viento, etc.) sobre la velocidad lineal de flutter. No obstante, el potencial de la cosecha de energía basada en la respuesta no lineal de un arreglo de cosechadores aeropiezoelásticos dispuestos horizontalmente o en tándem, por ejemplo, no ha sido aún explorado (Roccia et al., 2020; M. L. Verstraete et al., 2018).

Desde este punto de vista, el presente trabajo introduce un concepto de diseño novedoso para un dispositivo adaptativo de cosecha de energía eólica utilizando materiales piezoeléctricos, basado en el fenómeno de flutter. El concepto consiste en un arreglo de cosechadores, contruidos mediante alas multifuncionales de gran alargamiento dispuestas en tándem, como el mostrado en la Figura 1. Además, se explora la posibilidad de maximizar la cosecha de energía en distintos escenarios mediante la adaptación de la separación entre los dispositivos para sintonizar el sistema de acuerdo a la velocidad del viento. De esta manera, se considera que la alternativa propuesta satisface las exigencias de robustez, compactibilidad, adaptabilidad, transportabilidad y escalabilidad requeridas para los sistemas de generación de energía en pequeña escala.

Para evaluar el comportamiento del sistema, se presenta un esquema numérico, basado en técnicas de co-simulación, que combina un modelo estructural de parámetros concentrados con una versión bidimensional del Método de Red Vórtice No-lineal e Inestacionario (UVLM). En este análisis, cada una de las alas que conforman el arreglo posee transductores piezoeléctricos como parte de su estructura. Además, el flujo de aire que rodea el arreglo, causante de sus vibraciones no lineales asociadas a inestabilidades de naturaleza aeroelástica, es considerado como la única fuente de energía externa. El acoplamiento del sistema resulta débil, debido a que sólo proviene del fenómeno de interacción aerodinámica.

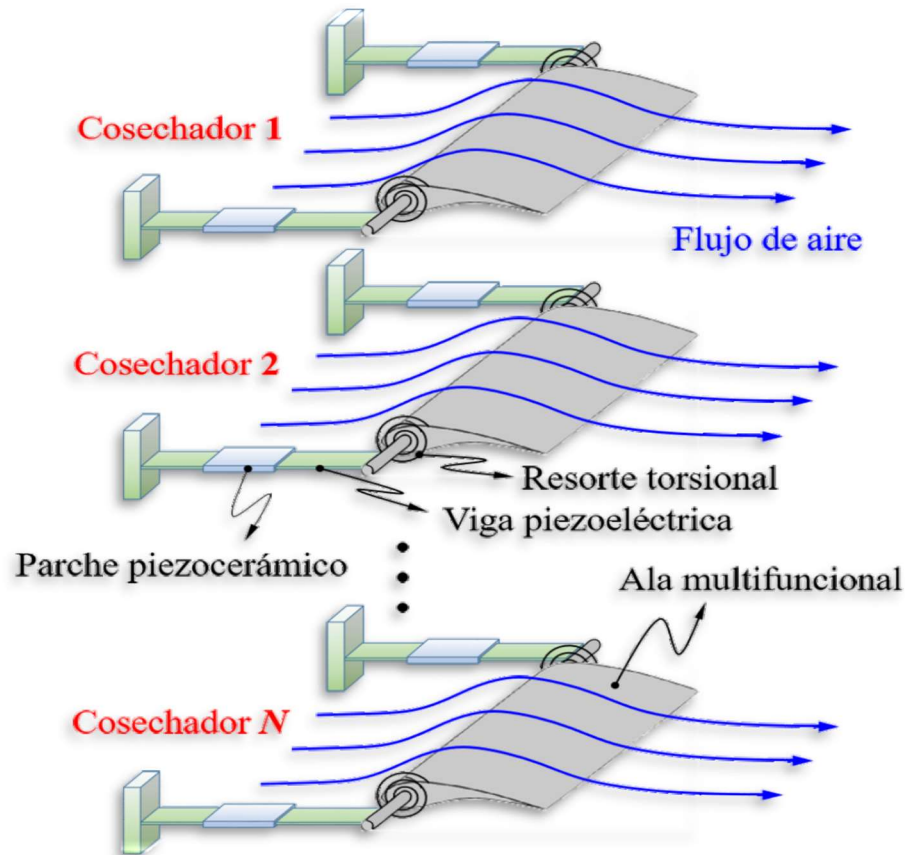


Figura 1: Esquema ilustrativo de un arreglo en tándem de cosechador de energía basado en “flutter”.

En cuanto a la organización del artículo, las características de diseño más relevantes del concepto propuesto se presentan en la segunda sección. La tercera y la cuarta sección describen brevemente los modelos utilizados, el modelo piezoelástico (MPE) y el modelo aerodinámico (MA), respectivamente. A continuación, se presenta el método de interacción entre el MPE y el MA. En la sección siguiente se exponen y se analizan detalladamente los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas. Finalmente, se exponen las conclusiones más importantes de este trabajo.

EL DISEÑO CONCEPTUAL

En esta sección se presenta el diseño conceptual no convencional del dispositivo para la recolección de energía. El diseño propuesto consiste en un arreglo de seis cosechadores con la posibilidad de servocontrolar sus posiciones relativas con el fin de maximizar su eficiencia bajo múltiples condiciones de trabajo. Para ejemplificar esto, en las Figura 2 (a) y (b) se presentan dos configuraciones diferentes de arreglo, aunque se excluyen datos y detalles de los dispositivos electrónicos, cableados y de sus correspondientes alojamientos.

De acuerdo con lo mostrado en la Figura 2(c), para el armado del sistema se usan tres tipos de subsistemas o conjuntos: el marco, el dispositivo separador y los cosechadores per se. El marco da soporte rígido a todo el arreglo, contiene a los otros conjuntos mencionados, conduce el movimiento traslacional de los cosechadores y, adicionalmente, podría dar soporte estructural total o parcial en distintas aplicaciones (edificios, puentes, estaciones meteorológicas, anidado de varios arreglos, etc.). El dispositivo separador gobierna la posición relativa de los cosechadores y es utilizado para “sintonizar” el arreglo. Consiste en un conjunto de actuadores lineales paso a paso incorporados dentro de un único contenedor robusto y, para garantizar el correcto desplazamiento de los cosechadores, se utilizan dos dispositivos separadores, uno a cada lado del marco. El conjunto cosechador se compone de un perfil alar, generador de cargas aerodinámicas, y de dos dispositivos generadores de potencia eléctrica (ver Figura 2(c)). Cada dispositivo generador contiene en su interior un resorte de torsión, una viga piezoeléctrica flexible y un parche piezocerámico, y, además, el contenedor o carcasa del generador sirve como empotramiento rígido de la viga (ver Figura 1).

Además de cumplir con los aspectos funcionales necesarios para lograr un sistema robusto para la extracción de energía, el diseño prevé un montaje simple y que, estando desmontado, resulte en un conjunto compacto que contribuya a obtener un eficiente factor de ocupación de transporte, entendido como la relación entre el valor de la carga y la capacidad de transportación. Estas dos características favorecen a que estos dispositivos puedan ser fácil y económicamente transportados, y desplegados aún en zonas de muy difícil acceso y con condiciones climáticas totalmente adversas y hostiles, como por ejemplo en las regiones continentales del sur argentino o en la Antártida Argentina (ver Figura 3).

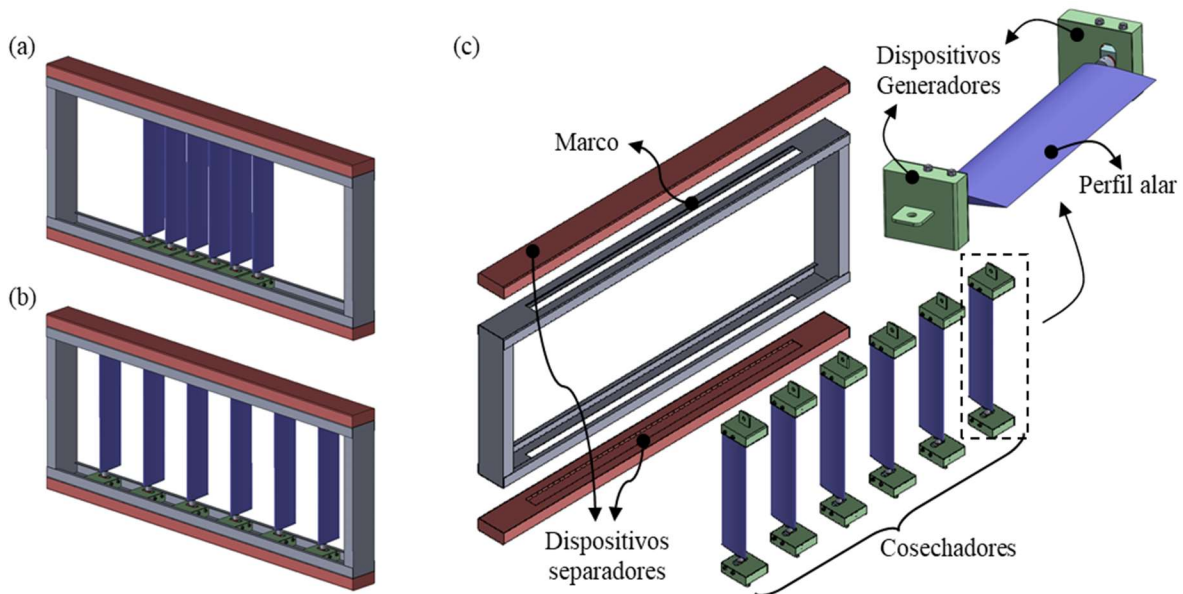


Figura 2: Configuraciones del arreglo con cosechadores igualmente separados. (a) Mínimas y (b) máximas separaciones admitidas en el diseño. (c) Denominación de los conjuntos.



Figura 3: Concepto de una granja de arreglos de múltiples cosechadores (Edición utilizando la imagen recuperada de <https://www.pxfuel.com/es/free-photo-jdxxm>).

MODELO PIEZOELÁSTICO

En este trabajo se considera un arreglo de cosechadores compuesto por N dispositivos piezoaeroelásticos; cada uno de ellos idealizado como un perfil alar 2D simétrico y rígido. Las propiedades elásticas de cada cosechador son modeladas por medio de un enfoque de parámetros concentrados, donde la rigidez torsional es representada por un resorte de torsión y la rigidez a flexión es modelada por medio de un resorte lineal (Erturk et al., 2010). Adicionalmente, se considera que el piezoeléctrico es excitado únicamente por el desplazamiento traslacional de cada cosechador (ver Figura 4). Bajo estas hipótesis, el espacio de configuración (“ c -space”) para el k -ésimo cosechador puede ser descrito por $\chi_k = \mathbf{R}^2 \times SO(2)$, donde $SO(2)$ es el grupo especial ortogonal en dos dimensiones. Debido a la ausencia de restricciones en el sistema dinámico, el número de grados de libertad por cosechador es igual a la dimensión del c -space, $n_{DOF} = \dim(\chi_k) = 3$; por lo tanto, el número de grados de libertad para el sistema dinámico completo es $N_{DOF} = Nn_{DOF}$. El vector de coordenadas generalizadas puede ser expresado finalmente como,

$$\mathbf{q}_k(t) = (h(t) \quad \theta(t) \quad V(t))_k^T \quad (1)$$

Donde $h(t)$ es el desplazamiento traslacional del perfil, $\theta(t)$ es el ángulo de cabeceo del perfil, y $V(t)$ es el voltaje generado por el sistema eléctrico a través del piezoeléctrico.

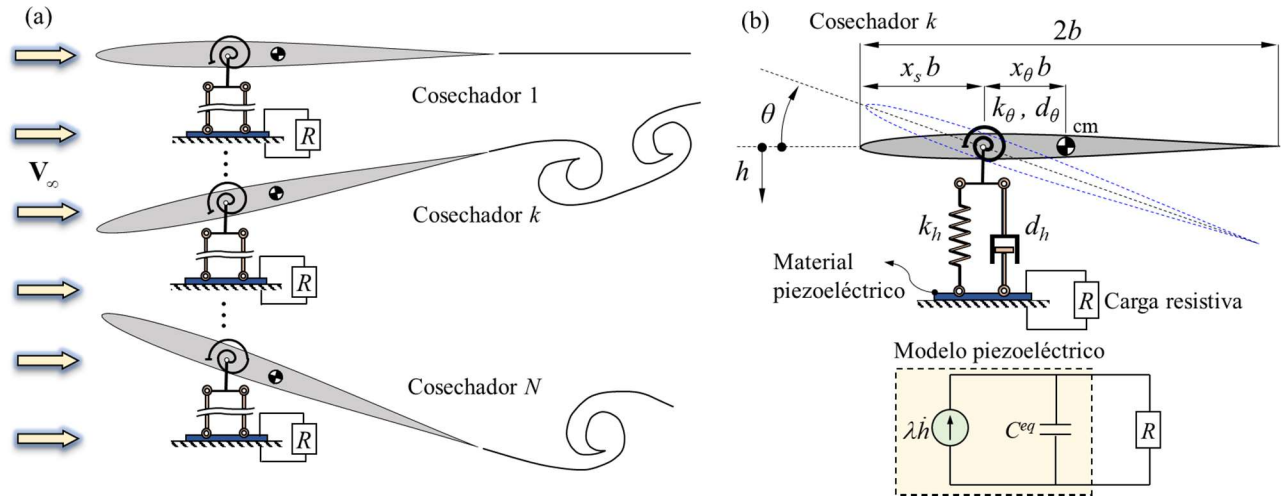


Figura 4: (a) Arreglo de cosechadores de energía, (b) modelo piezoaeroelástico 2D de un cosechador.

Como se mencionó, el piezoeléctrico es excitado únicamente por el desplazamiento traslacional del perfil alar. Este hecho se traduce en un acoplamiento lineal entre $h(t)$ y $V(t)$ a través del coeficiente de acoplamiento electromecánico λ . Las ecuaciones de movimiento (EdM) para el k -ésimo cosechador se obtienen modificando las ecuaciones aeroelásticas clásicas para una sección típica provista por (Hodges & Pierce, 2011); esto es,

$$\begin{bmatrix} m + m_f & mx_\theta b \\ mx_\theta b & I_p \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \ddot{h}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{Bmatrix}_k + \begin{bmatrix} d_h & 0 \\ 0 & d_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{h}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{Bmatrix}_k + \begin{bmatrix} k_h & 0 \\ 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h(t) \\ \theta(t) \end{Bmatrix}_k - \begin{Bmatrix} \frac{\lambda}{l} V(t) \\ 0 \end{Bmatrix}_k = \begin{Bmatrix} L_a(t) \\ M_a(t) \end{Bmatrix}_k, \quad (2)$$

$$\left(\lambda \dot{h}(t) + C^{eq} \dot{V}(t) + \frac{1}{R} V(t) \right)_k = 0,$$

Donde m y m_f son las masas por unidad de longitud del perfil y de su soporte, k_h (k_θ) es la constante elástica asociada al resorte lineal (torsional), d_h (d_θ) es el coeficiente de amortiguamiento asociado al grado de libertad traslacional (rotacional), b es la semicuerda del perfil, I_p es el momento de inercia (máscico) del perfil por unidad de longitud con respecto al punto de referencia (anclaje de los resortes), l es la envergadura del ala 3D, x_θ es la distancia adimensional entre el punto de referencia y el centro de masa, x_s es la distancia adimensional entre el borde de ataque del perfil y el punto de referencia, R es la resistencia de carga, C^{eq} es la capacidad equivalente de la lámina de material piezoeléctrico, y el punto sobre las variables indica derivada con respecto al tiempo. Adicionalmente, $L_a(t)$ es la fuerza de sustentación por unidad de longitud aplicada sobre el punto de referencia, y $M_a(t)$ es el momento aerodinámico por unidad de longitud con respecto al mismo punto. Las cargas $L_a(t)$ y $M_a(t)$ son computadas por medio del modelo aerodinámico descrito más adelante.

El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias mostrado en la ecuación gobierna la evolución temporal del cosechador k . Finalmente, las EdM para los N dispositivos piezoaeroelásticos se obtienen ensamblando las EdM para cada cosechador. Se debe enfatizar que no existe acoplamiento estructural entre los múltiples dispositivos piezoaeroelásticos que componen el arreglo de cosechadores. Sin embargo, ellos están débilmente acoplados a través de las cargas aerodinámicas (lado derecho de la ecuación). Este hecho implica que las EdM resultantes posean una estructura diagonal por bloques. Para una descripción detallada del modelo estructural aquí presentado el lector puede consultar a Rocía et al. (2020).

MODELO AERODINÁMICO

En el contexto del presente trabajo, el MA tiene por propósito principal estimar cargas aerodinámicas capturando la interacción que existe entre los cosechadores que forman parte del dispositivo. Para ello, se adopta una versión bidimensional del ampliamente difundido UVLM, ya que proporciona un balance razonable entre precisión y costo computacional, en relación con otros métodos de la dinámica de fluidos computacional.

Según una de las hipótesis fundamentales del UVLM, el flujo alrededor de los cuerpos sólidos es no viscoso e incompresible. Bajo esta hipótesis, la distribución de vorticidad es suficientemente compacta como para considerar dos zonas bien definidas en el dominio fluido: i) una porción pequeña que incluye el flujo rotacional con vorticidad no nula (capas límites y estelas); y ii) la parte restante del dominio infinito que es irrotacional. Luego, las capas límites y las estelas de los cuerpos se idealizan como dos tipos de sábanas (láminas o superficies) vorticosas: las sábanas adheridas (SVAs) y las sábanas libres (SVLs), ∂F .

Las SVAs modelan las capas límites adyacentes a las superficies sólidas inmersas en el fluido y se mueven siguiendo la dinámica de estas; por lo tanto, a través de ellas se desarrolla un salto finito de presión. Por su parte, las SVLs, que modelan las estelas, ocupan posiciones libres de fuerza en todo momento ya que se trasladan y deforman sin restricciones siguiendo la velocidad local del fluido. Las SVLs son creadas por medio de la convección de vorticidad desde los bordes afilados de los cuerpos, definidos a priori como los puntos donde la separación de flujo tiene lugar. En este trabajo, dado que los cosechadores se asumen delgados, las sábanas vorticosas en ambas superficies del sólido colapsan en una única SVA.

Debido a que el fluido fuera de las capas límites y las estelas se asume incompresible e irrotacional, existe una función potencial de velocidad $\Psi(\mathbf{r}; t)$ que describe el flujo y satisface la ecuación de Laplace (Katz y Plotkin 2004). Esta ecuación se complementa con un conjunto de condiciones de contorno. En primer lugar, el campo de velocidades del fluido $\mathbf{V}(\mathbf{r}; t)$ debe satisfacer en cada instante de tiempo la condición de no penetración sobre las superficies sólidas ∂B . Esta condición se expresa como sigue:

$$(\mathbf{V}(\mathbf{r}; t) - \mathbf{V}_s(\mathbf{r}; t)) \cdot \hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r}; t) = 0 \quad \forall \mathbf{r} \in \partial B, \quad (3)$$

Donde $\hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r}; t)$ es el vector unitario normal a la superficie sólida en la ubicación \mathbf{r} y $\mathbf{V}_s(\mathbf{r}; t)$ es la velocidad de la superficie sólida en el mismo punto. En segundo lugar, el campo de velocidad $\mathbf{V}(\mathbf{r}; t)$ debe satisfacer la condición de regularidad en el infinito, esto es, que las perturbaciones introducidas al flujo por la presencia de los cuerpos sumergidos tiendan a cero, a medida que la distancia a los mismos tiende al infinito. Adicionalmente, la vorticidad debe satisfacer la condición de Kelvin que establece que la circulación alrededor de una curva material que encierra en todo instante a un cuerpo y a sus estelas debe permanecer constante. Para obtener la distribución de presión sobre las superficies sólidas se emplea la ecuación de Bernoulli no estacionaria para flujos incompresibles e irrotacionales (Katz y Plotkin 2004). Finalmente, las cargas aerodinámicas resultantes, $L_a(t)$ y $M_a(t)$ sobre cada cuerpo, se calculan integrando la distribución de presión.

En el UVLM, las SVAs a la superficie de cada cuerpo delgado se discretizan mediante grillas aerodinámicas (GAs), de acuerdo a lo mostrado en la Figura 5: i) la superficie del cuerpo B_m se divide en un número N_m de elementos rectos de longitud Δs_i ; ii) en cada elemento se coloca un vórtice puntual de intensidad $\Delta \Gamma_i$ y un punto de control, a una distancia de un cuarto y tres cuartos de la longitud del elemento medidas desde su borde de ataque, respectivamente; iii) en cada paso de tiempo k , se coloca sobre la extensión del borde de fuga un vórtice adicional de intensidad $\Delta \Gamma_k^{F_m}$ que, en este trabajo, modela la separación de flujo.

En virtud de la discretización, la condición de no penetración sobre el cuerpo B_m sólo puede satisfacerse en un número finito N_m de puntos de control. Luego, al imponer la condición de no penetración en todos los puntos de control del dominio y la condición de Kelvin para cada cuerpo y su estela, se obtiene el siguiente sistema algebraico de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} [A_{ij}^{11}] & \cdots & [A_{ij}^{1N}] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [A_{ij}^{N1}] & \cdots & [A_{ij}^{NN}] \\ [1]_i & [0] & [0]_N \\ [0]_i & \ddots & [0]_N \\ [0]_i & [0] & [1]_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta\Gamma_j^1\} \\ \vdots \\ \{\Delta\Gamma_j^N\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{RHS_i^1\} \\ \vdots \\ \{RHS_i^N\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Donde $[A_{ij}^{lm}] \in \mathbf{R}^{N_l \times N_m + 1}$ y cada uno de sus elementos A_{ij}^{lm} es el coeficiente de influencia aerodinámica del vórtice puntual j de intensidad $\Delta\Gamma_j^m$ adherido al cuerpo B_m sobre el punto de control i en la superficie del cuerpo B_l ; $\{\Delta\Gamma_j^m\} \in \mathbf{R}^{N_m + 1 \times 1}$; y $[0]_m \in \mathbf{R}^{1 \times N_m + 1}$, $[1]_m \in \mathbf{R}^{1 \times N_m + 1}$ son filas con ceros y unos respectivamente. Además, $\{RHS_i^k\} \in \mathbf{R}^{N_l \times 1}$ y cada uno de sus elementos es $RHS_i^k = (\mathbf{V}_s - \mathbf{V}_\infty - \mathbf{V}_{\partial F})_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_i^k$, siendo $\mathbf{V}_{\partial F}$ la velocidad sobre el punto de control i del cuerpo k asociada a la vorticidad de las estelas ∂F . Finalmente, las últimas N ecuaciones en corresponden a la imposición de la condición de Kelvin para cada cuerpo. Todas las velocidades asociadas a vorticidad se calculan a partir de la versión bidimensional de la ecuación de Biot-Savart (Katz y Plotkin, 2004) y se utiliza un método de regularización (Krasny, 1987) para suavizar posibles singularidades.

En la ecuación se distinguen dos tipos de acoplamiento aerodinámico entre los cosechadores, que se representan en la Figura 5: i) el acoplamiento cuasiestacionario capturado por las matrices o bloques fuera de la diagonal $[A_{ij}^{lm}]$ con $l \neq m$, que surge de la influencia de la SVA del cuerpo B_m sobre cuerpo B_l ; ii) el acoplamiento no estacionario, incluido en los términos RHS_i^k que surge de la influencia de la estela de un cuerpo B_m sobre otro cuerpo B_l .

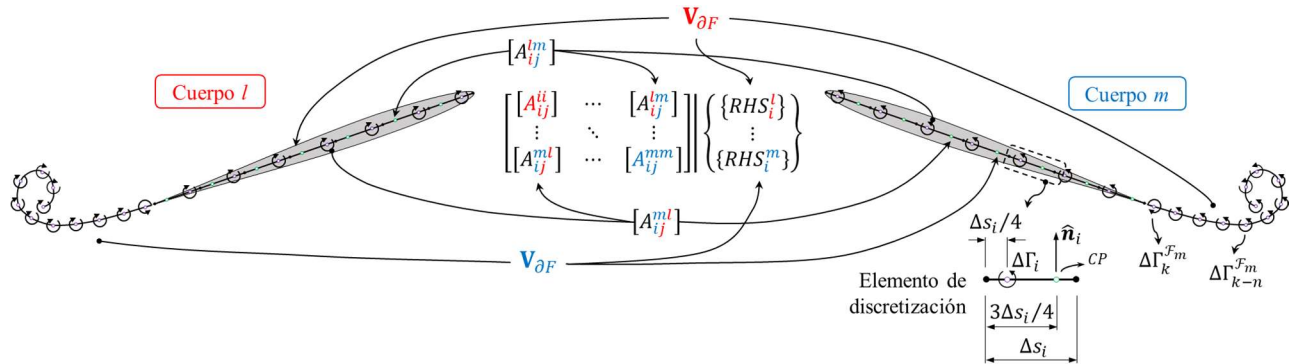


Figura 5: Representación esquemática de la discretización, y de la interacción aerodinámica entre dos cuerpos y su correspondencia con la matriz de interacción aerodinámica y el lado derecho de la ecuación.

INTERACCIÓN ENTRE MODELOS

La aplicación de una estrategia de co-simulación (Roccia et al., 2017; Verstraete et al., 2019) permite la implementación de un enfoque particionado que divide el sistema dinámico en dos subsistemas representados por modelos distintos y con entornos de simulación propios: el MPE y el MA. En este sentido, la interacción entre ambos modelos es una pieza fundamental para la simulación piezoaeroelástica ya que combina la respuesta del MPE con las cargas aerodinámicas provenientes del MA.

A pesar de que ambos modelos son independientes, el acoplamiento entre ellos se caracteriza como fuerte dado que, a medida que la solución avanza en el tiempo, la interacción bidireccional se realiza con un paso de tiempo que

es compartido por ambos entornos de simulación. La Figura 6 esquematiza el intercambio de información a nivel global para el paso de tiempo j . El MA acopla aerodinámicamente los cosechadores entre sí, dado que las cargas aerodinámicas sobre un cosechador no solo dependen de su propia SVA y SVL, sino que también de todas las SVAs y SVLs del arreglo. Las cargas estimadas son transferidas al MPE que, luego de la integración de las EdM, actualiza las posiciones, velocidades y aceleraciones de los cosechadores.

En el esquema propuesto, el proceso de interacción se simplifica debido a que la estructura que representa a cada cosechador se supone rígida. La Figura 7 muestra el procedimiento para calcular la solución en el paso de tiempo j correspondiente al cosechador k del arreglo, donde tienen lugar a las siguientes etapas: i) La configuración de las SVLs de los cosechadores es actualizada y, una vez alcanzada la posición actual, las SVLs permanecen inalteradas hasta finalizar el paso de tiempo. ii) Considerando la posición actualizada de las SVLs, el MA es utilizado para estimar las cargas aerodinámicas sobre los puntos de control de cada cosechador en su posición actual. iii) Las cargas aerodinámicas se convierten en un sistema mecánico equivalente de cargas generalizadas ($L_a(t)$ y $M_a(t)$) sobre el punto de referencia del MPE. iv) Las cargas generalizadas son incorporadas en las EdM para, luego de la integración numérica, obtener los desplazamientos y velocidades del punto de referencia. v) A partir de las coordenadas generalizadas, se actualizan las posiciones de los nodos y las velocidades de los puntos de control bajo la hipótesis de cuerpo rígido. vi) Los pasos ii, iii, iv y v se repiten iterativamente, manteniendo inalteradas las SVLs, hasta alcanzar la convergencia. vii) Luego de alcanzada la convergencia, los valores finales de posición y velocidades sobre la GA se almacenan como estado inicial para dar lugar al paso siguiente $j+1$.

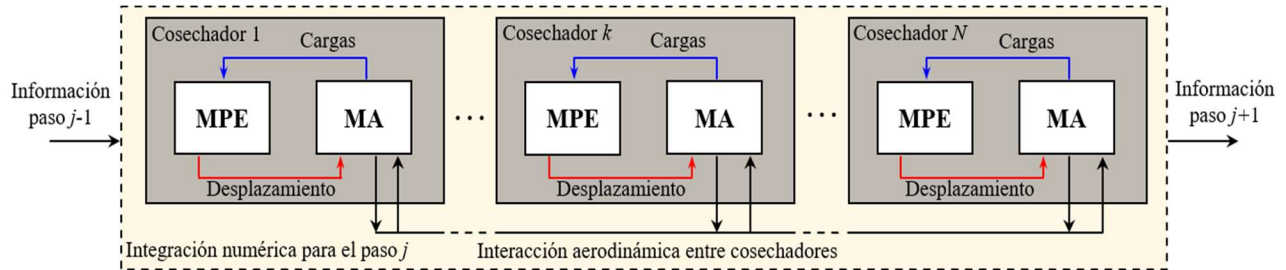


Figura 6: Esquema de la interacción global entre modelos en el paso de tiempo j .

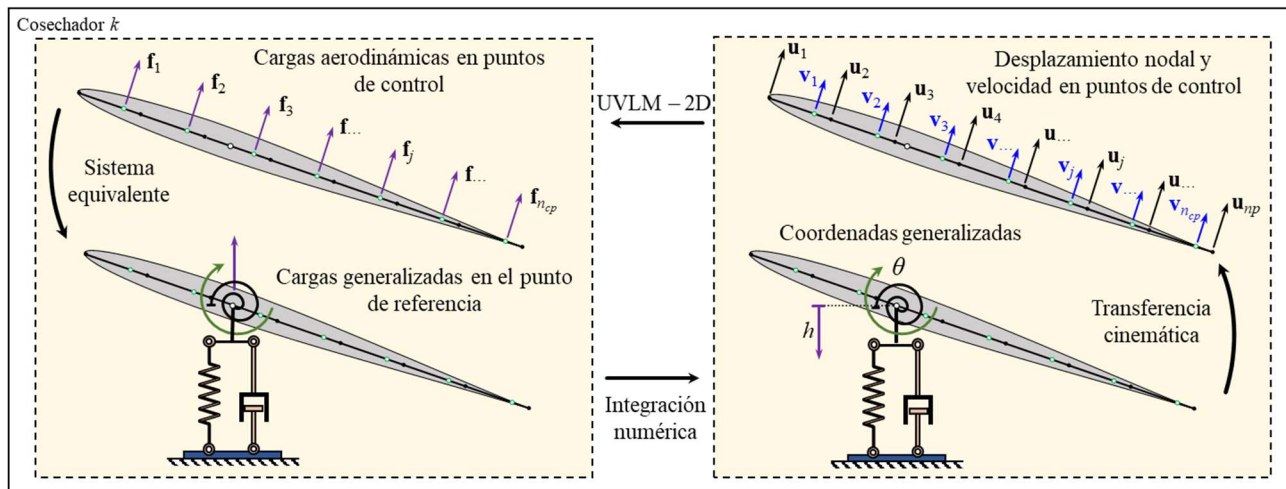


Figura 7: Esquema del intercambio de información para el cosechador k en el paso de tiempo j .

RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección se presenta una serie de resultados numéricos obtenidos por medio de la implementación computacional del modelo piezoaeroelástico introducido anteriormente. Primero, se presentan resultados concernientes a la verificación y validación de la plataforma de co-simulación utilizada. Luego, se utiliza la herramienta numérica desarrollada para estudiar el comportamiento aeroelástico y la potencia de salida del sistema propuesto (Figura 2).

Verificación de la plataforma de co-simulación

El modelo numérico presentado en este trabajo ha sido verificado utilizando los resultados experimentales y numéricos reportados por Erturk et al. (2010) para un cosechador aislado. Para su estudio experimental, Erturk y colaboradores utilizaron un perfil alar soportado por vigas de acero y láminas piezoeléctricas PZT-5A. Este estudio fue complementado por un modelo analítico bidimensional de parámetros concentrados que les permitió predecir la velocidad de flutter y la potencia generada por el cosechador.

Los parámetros del modelo piezoaeroelástico propuesto por Erturk et al. se listan en la Tabla 1. La velocidad de flutter obtenida V_F , para una discretización de 30 vórtices sobre el perfil alar, es de 9.451 m/s. Si bien el valor de V_F obtenido por medio de simulaciones numéricas es levemente menor al valor analítico de 9.56 m/s reportado por Erturk et al. (2010), el error relativo es solo del 1.14%. Se debe mencionar que la discretización utilizada para la SVA proviene de un estudio de convergencia realizado con antelación, el cual muestra que la utilización de mallas aerodinámicas cada vez más densas permiten reducir este error sustancialmente (Roccia et al., 2020). Por otro lado, la V_F experimental reportada por Erturk et al. es de 9.3 m/s, lo cual representa una excelente correspondencia con el valor predicho numéricamente (error relativo del 1.6%). Más detalles sobre el proceso de verificación y validación de la plataforma numérica utilizada se pueden encontrar en Roccia et al. (2020).

Estudio del diseño conceptual

En esta subsección se presentan resultados numéricos que tienen como objetivo revelar ciertas características del comportamiento piezoaeroelástico del diseño conceptual propuesto en el presente trabajo (Figura 2). En las simulaciones se utilizaron los parámetros geométricos y propiedades piezoelásticas expuestas en la Tabla 1 para cada cosechador del arreglo. Adicionalmente, se debe destacar que el número de vórtices usados en la discretización de cada perfil aerodinámico se redujo de 30 a 15 con el objetivo de disminuir el costo computacional. A pesar de reducción en la densidad de la malla, la fidelidad de la solución numérica obtenida no se ve sensiblemente afectada, por lo que se obtiene una excelente relación entre tiempo de cómputo y precisión.

Tabla 1: Parámetros del sistema.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
m	1.779 kg/m	l	0.5 m	d_h	9.6110×10^{-1} Ns/m ²
m_f	2.8425 kg/m	λ	1.55 mN/V	d_θ	1.32504×10^{-2} Ns
I_p	7.06445×10^{-3} kg m	k_h	4.6808×10^3 N/m ²	R	100 k Ω
b	0.125 m	k_θ	1.67540 N	C^{eq}	120 nF
x_θ	0.260				

Roccia et al. (2020) han mostrado que la separación entre los cosechadores en un arreglo tiene una fuerte influencia sobre la velocidad de flutter del sistema, como así también, en el comportamiento postcrítico del mismo. En este sentido, un estudio detallado del diseño conceptual aquí propuesto debe involucrar necesariamente configuraciones con diferentes separaciones entre cosechadores. Sin embargo, en esta primera etapa se adoptó como caso de estudio un arreglo de cosechadores separados a una distancia de 4 semicuerdas (ver Figura 8(a)). Para esta configuración se determinó que la velocidad de flutter es $V_F = 8.75$ m/s. Asimismo, se analizó el efecto de diferentes condiciones iniciales (CIs) en la condición de flutter, siempre considerando una perturbación de 5° en el grado de libertad $\theta(t)$ de cada cosechador (ver Figura 8(b)). En todos los casos, se encontró que los cosechadores se sincronizan para alcanzar una misma forma de vibrar (modo de flutter) que resulta antisimétrica (ver Figura 9).

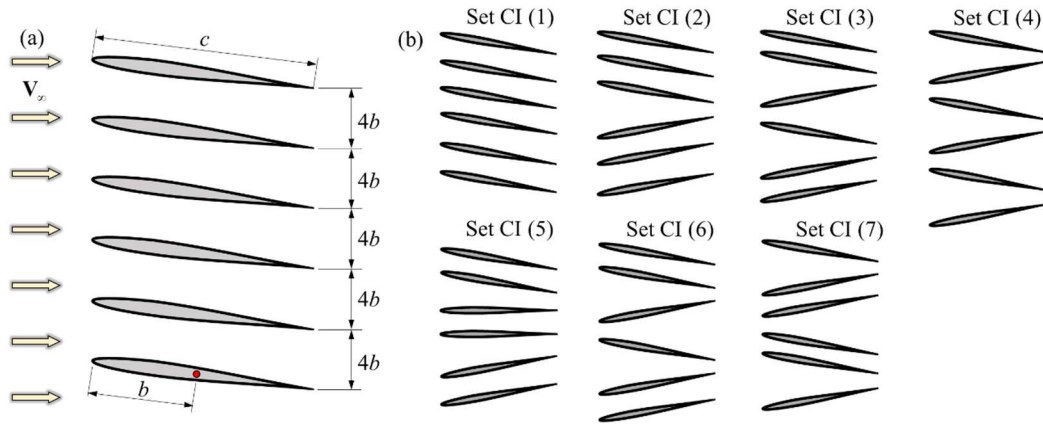


Figura 8: (a) Arreglo de 6 cosechadores de energía, (b) diferentes condiciones iniciales consideradas.

Por debajo de la velocidad V_F todas las respuestas en el tiempo se amortiguan, y como consecuencia de ello no se puede extraer energía de manera sostenida. A modo de ejemplo en la Figura 10(a) se incluye la respuesta temporal del cosechador 1 (identificado en la Figura 9) para $V_\infty = 8.7$ m/s donde se puede ver que las respuestas de todos sus grados de libertad (h , θ , V), y por ende la potencia generada, decaen en el tiempo. En este caso, la potencia eléctrica instantánea

$P(t)$ de cada cosechador se computa como $P(t) = V^2(t) / R$.

Para velocidades superiores a la velocidad de flutter (estado postcrítico), el sistema alcanza un estado de vibraciones autosostenidas en el que se puede extraer energía de la corriente de aire. La Figura 10(b) muestra la respuesta temporal de los grados de libertad y la potencia generada por el cosechador 1 para una velocidad de corriente libre de $V_\infty = 9$ m/s. En flutter, la solución bifurca de un foco estable a una oscilación de ciclo límite (LCO); fenómeno conocido como bifurcación de Hopf. Una vez superada la velocidad de flutter, la forma y amplitud de las LCOs dependen de la velocidad de corriente libre. En la Figura 11(a) se presenta el diagrama de bifurcación que muestra la amplitud de la LCO asociado al desplazamiento traslacional $h(t)$ del cosechador 1. Para este caso, la amplitud de la LCO se ha calculado utilizando el procedimiento descrito en Rocca et al. (2020). Cuando V_∞ se incrementa levemente por encima de V_F , la amplitud de vibración de $h(t)$ cambia drásticamente y alcanza un máximo a $V_\infty = 9$ m/s. Esta pronunciada pendiente obtenida en el diagrama de bifurcación se atribuye a la no-linealidad débil introducida las cargas aerodinámicas. Por último, resulta importante mencionar que las amplitudes asociadas a los grados de libertad de cabeceo, $\theta(t)$, y voltaje, $V(t)$ tienen un comportamiento cualitativo similar al de $h(t)$.



Figura 9: Forma de vibrar de los cosechadores durante el inicio del flutter ($V_\infty = 8.75$ m/s) y evolución de las estelas (SVLs).

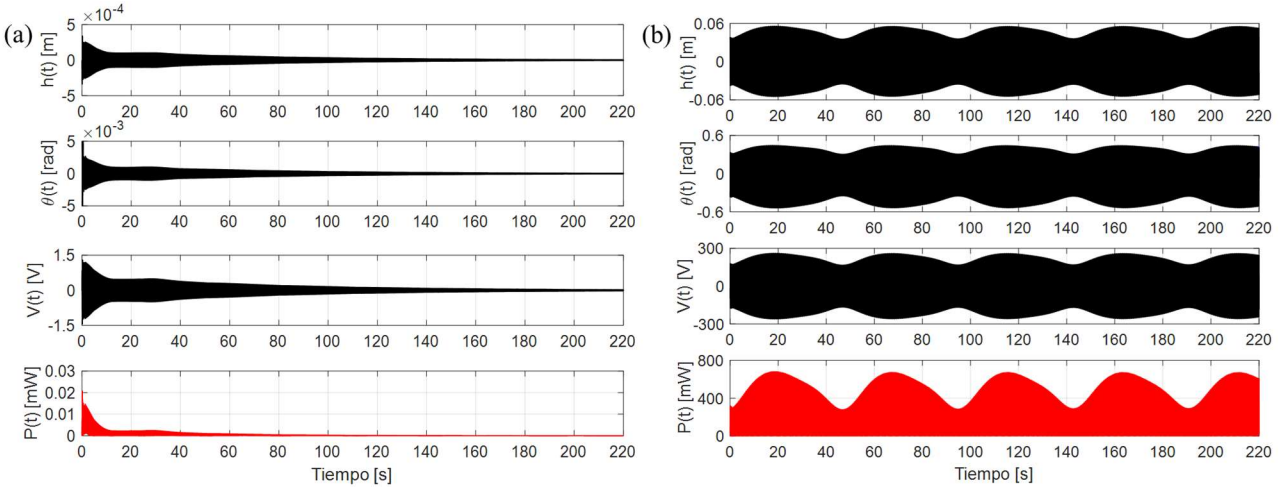


Figura 10: Respuesta del cosechador 1 (a) velocidad subcrítica $V_\infty = 8.7$ m/s, (b) velocidad supercrítica $V_\infty = 9.0$ m/s.

En la Figura 11(b) se presenta la potencia media, P_m , generada por el cosechador 1 en función de la velocidad de corriente libre. En este caso, la potencia media se calcula como

$$P_m(t) = \frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} P(t) dt. \quad (5)$$

Siendo t_i un tiempo de referencia, en el que se considera que la solución ha alcanzado el estado estacionario, y T indica el período de la señal considerado como el tiempo transcurrido entre dos picos sucesivos.

La Figura 11(b) muestra que es posible extraer potencia eléctrica para valores de V_∞ superiores a V_F . En este caso se encuentra que la potencia máxima que genera el cosechador 1 es de 270.66 mW. Teniendo en cuenta que cada uno de los cosechadores genera la misma potencia media, el arreglo de 6 cosechadores produce una potencia media de $P_{m,max} = 1.624$ W a una velocidad próxima a $V_\infty = 8.9$ m/s. Es interesante destacar que la velocidad de flutter para el sistema de 6 cosechadores es un 7,4% menor que la velocidad de flutter para un cosechador aislado. Este hecho permite inferir que, dada la marcada influencia de la interacción aerodinámica entre los cosechadores sobre la velocidad de flutter, la distancia de separación entre ellos alterará el valor de la velocidad crítica. En este sentido, la distancia entre cosechadores puede ser ajustada con el objetivo de inducir vibraciones autosostenidas para distintos valores de V_∞ y, por lo tanto, generar energía en un amplio rango de escenarios.

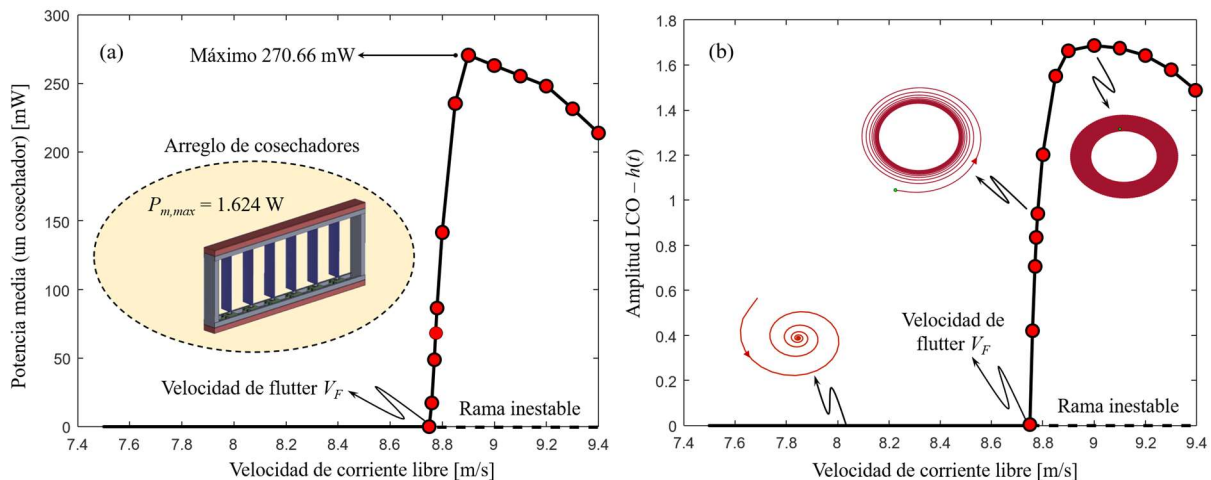


Figura 11: (a) Potencia media en el cosechador inferior en función de V_∞ , (b) amplitud de LCO de $h(t)$ para el cosechador 1 en función de V_∞ .

CONCLUSIONES

El presente esfuerzo tuvo como motivación principal explorar el potencial de la cosecha de energía basada en la respuesta no lineal de un arreglo de cosechadores piezoaeroelásticos. Tal necesidad se origina en una nueva perspectiva que pone a los fenómenos aeroelásticos asociados con no linealidades estructurales y/o aerodinámicas en el centro de las investigaciones relacionadas con fuentes alternativas de generación de energía, especialmente para sistemas de pequeña escala cuyos consumos de energía varían en la escala de microvatios y milivatios.

En este sentido, se propuso un concepto de diseño novedoso para un dispositivo adaptativo de cosecha de energía eólica utilizando materiales piezoeléctricos, basado en el fenómeno aeroelástico de flutter. El sistema consta de una serie de cosechadores conformados por alas multifuncionales de gran alargamiento con la posibilidad de servocontrolar sus posiciones relativas, proporcionando así la versatilidad para operar eficientemente bajo múltiples condiciones externas. Adicionalmente, se presentó un modelo computacional, basado en el paradigma de co-simulación multifísica, para evaluar numéricamente la respuesta del sistema. Este análisis se realizó combinando un modelo estructural de parámetros concentrados con una versión bidimensional del Método de Red Vórtice No-lineal e Inestacionario.

En primera instancia, la correcta implementación y el funcionamiento del modelo computacional fueron verificados reproduciendo estudios reportados por otros investigadores. Esta instancia de verificación y validación consistió en obtener la velocidad de flutter para un cosechador aislado y compararla con resultados analíticos y experimentales publicados en la literatura. Las predicciones obtenidas con el método propuesto mostraron estar en concordancia, exhibiendo errores menores al 2%, con aquellas utilizadas como referencia.

En cuanto al análisis del concepto aquí presentado, se adoptó como caso de estudio una configuración de seis cosechadores separados a una distancia de 4 semicuerdas, a la cual se aplicaron varias alternativas de condiciones iniciales. Se encontró que, independientemente de las condiciones iniciales impuestas al arreglo, cuando la corriente alcanza la velocidad crítica los cosechadores se sincronizan en un modo de flutter antisimétrico. En relación a la velocidad de flutter del sistema, se encontró que ésta es inferior a la velocidad de un cosechador aislado, lo que se atribuye a la marcada influencia de la interacción aerodinámica entre los cosechadores que, a su vez depende de la distancia de separación entre ellos. De este modo, se confirmó que, controlando inteligentemente la distancia entre cosechadores, el sistema puede adaptarse para recolectar energía de manera sostenida para distintas velocidades de la corriente libre.

El comportamiento postcrítico del dispositivo está caracterizado por una bifurcación de Hopf. Una vez superada la velocidad de flutter, la respuesta dinámica del sistema exhibe LCOs cuya amplitud y frecuencia dependen de la velocidad de la corriente libre. Para valores crecientes de esta velocidad, las amplitudes de las LCO crecen con una pendiente pronunciada hasta alcanzar un punto máximo y luego decaen levemente. Algo cualitativamente similar ocurre con la potencia eléctrica media obtenida por el dispositivo, ya que luego de un crecimiento brusco alcanza un valor máximo. En este caso, el máximo de potencia media representa la condición de operación óptima del sistema.

Las conclusiones del presente artículo resultan prometedoras en la búsqueda de soluciones innovadoras relacionadas a la cosecha de energía en pequeña escala. En efecto, la combinación de nuevas tecnologías estructurales con métodos de diseño y análisis aeroelástico pueden originar la sinergia necesaria para crear una nueva generación de cosechadores de energía, que puedan integrarse a distintas infraestructuras, con gran eficiencia energética, más amigables con el medio ambiente, intensificando su efectividad y capacidad a través de la consolidación del tamaño y del peso de la estructura sin sacrificar los requerimientos de performance.

Por último, existen numerosos aspectos que no fueron explorados en el presente esfuerzo y representan líneas de trabajo interesantes para futuros desarrollos, a saber: evaluar mediante técnicas de optimización otras distribuciones en la posición relativa y el número de cosechadores, incorporar dispositivos mecánicos y/o electromecánicos que acoplen de manera estructural los cosechadores, analizar mecanismos alternativos y/o complementarios que permitan incrementar el volumen de energía cosechada, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más profundo y sincero agradecimiento a nuestro mentor, maestro y querido amigo, el profesor Dean T. Mook, quien falleció el 19 de junio de 2020, por su apoyo, contribuciones a nuestra educación, amistad y por darnos a todos nosotros la oportunidad de trabajar en este maravilloso tema. El profesor Mook hizo importantes contribuciones al desarrollo de la mecánica aplicada en nuestro país a través de interacciones personales con muchos colegas y estudiantes argentinos. Hemos tenido la suerte de tener al Dr. Mook en nuestras vidas; trabajar con él y aprender de él, así como de poder transmitir sus enseñanzas a través de nuestra propia investigación y la tutoría de otros. Se le extrañará más de lo que las palabras puedan expresar.

REFERENCIAS

- Abdelkefi, A., Vasconcellos, R., Marques, F. D., & Hajj, M. R. (2012). "Bifurcation analysis of an aeroelastic system with concentrated nonlinearities". *Nonlinear Dynamics*, 69(1–2), 57–70. <https://doi.org/10.1007/s11071-011-0245-6>
- Afonso, F., Vale, J., Oliveira, É., Lau, F., & Suleman, A. (2017). "A review on non-linear aeroelasticity of high aspect-ratio wings". *Progress in Aerospace Sciences*, 89, 40–57. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.12.004>
- Batra, A. K., & Alomari, A. (2017). *Power Harvesting via Smart Materials*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/3.2268643>
- Carneiro, P., Soares dos Santos, M. P., Rodrigues, A., Ferreira, J. A. F., Simões, J. A. O., Marques, A. T., & Kholkin, A. L. (2020). "Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: a review". *Applied Energy*, 260, 114191. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114191>
- Daqaq, M. F., Masana, R., Erturk, A., & Dane Quinn, D. (2014). "On the Role of Nonlinearities in Vibratory Energy harvesting: a critical review and discussion". *Applied Mechanics Reviews*, 66(4). <https://doi.org/10.1115/1.4026278>
- Elahi, H., Eugeni, M., & Gaudenzi, P. (2018). "A review on mechanisms for piezoelectric-based energy harvesters". *Energies*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/en11071850>
- Erturk, A., Vieira, W. G. R., De Marqui, C., & Inman, D. J. (2010). "On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems". *Applied Physics Letters*, 96(18). <https://doi.org/10.1063/1.3427405>
- Eskandary, K., Dardel, M., Pashaei, M. H., & Kani, A. M. (2011). "Effects of aeroelastic nonlinearity on flutter and limit cycle oscillations of high-aspect-ratio wings". *Applied Mechanics and Materials*, 110–116, 4297–4306. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.4297>
- Gendelman, O. V. (2011). "Targeted energy transfer in systems with external and self-excitation". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 225(9), 2007–2043. <https://doi.org/10.1177/0954406211413976>
- Gilliatt, H. C., Strganac, T. W., & Kurdila, A. J. (2003). "An investigation of internal resonance in aeroelastic systems". *Nonlinear Dynamics*, 31(1), 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1022174909705>
- Gorini, R., Gielen, D., Wagner, N., & Gallina, G. (2019). "Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects". *IRENA*.
- Hodges, D. H., & Pierce, G. A. (2011). *Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511997112>
- Katz and, J., & Plotkin, A. (2004). "Low-speed aerodynamics, second edition". *Journal of Fluids Engineering*, 126(2), 293–294. <https://doi.org/10.1115/1.1669432>
- Khan, F. U., & Qadir, M. U. (2016). "State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26(10), 103001. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/10/103001>

- Krasny, R. (1987). "Computation of vortex sheet roll-up in the trefftz plane". *Journal of Fluid Mechanics*, 184. <https://doi.org/10.1017/S0022112087002830>
- McCarthy, J. M., Watkins, S., Deivasigamani, A., & John, S. J. (2016). "Fluttering energy harvesters in the wind: a review". *Journal of Sound and Vibration*, 361, 355–377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.09.043>
- Roccia, B. A., Preidikman, S., & Balachandran, B. (2017). "Computational dynamics of flapping wings in hover flight: a co-simulation strategy". *AIAA Journal*, 55(6), 1806–1822. <https://doi.org/10.2514/1.J055137>
- Roccia, B. A., Verstraete, M. L., Ceballos, L. R., Balachandran, B., & Preidikman, S. (2020). "Computational study on aerodynamically coupled piezoelectric harvesters". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 31(13), 1578–1593. <https://doi.org/10.1177/1045389X20930093>
- Safaei, M., Sodano, H. A., & Anton, S. R. (2019). "A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008-2018)". *Smart Materials and Structures*, 28(11). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab36e4>
- Verstraete, M. L., Roccia, B. A., Ceballos, L. R., & Preidikman, S. (2018). "Modelo aero-electro-elástico para un arreglo de cosechadores de energía". *Mecánica Computacional*, XXXVI, 2013–2022.
- Verstraete, Marcos L., Roccia, B. A., Mook, D. T., & Preidikman, S. (2019). "A co-simulation methodology to simulate the nonlinear aeroelastic behavior of a folding-wing concept in different flight configurations". *Nonlinear Dynamics*, 98(2), 907–927. <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05234-9>
- Wang, J., Geng, L., Ding, L., Zhu, H., & Yurchenko, D. (2020). "The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations". *Applied Energy*, 267, 114902.