

## ANÁLISIS PRELIMINAR DE UN DISEÑO PARA COSECHA DE ENERGÍA BASADO EN FLUTTER QUE INCORPORA ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE PARÁMETRO CONCENTRADO

### PRELIMINARY STUDY OF A FLUTTER-BASED ENERGY HARVESTING DEVICE WITH LUMPED STRUCTURAL PARAMETERS

Martín E. Pérez Segura<sup>a,b</sup>, Emmanuel Beltramo<sup>a,b</sup>, Santiago Ribero<sup>a</sup>, Agustina C. Aichino<sup>a</sup>, Bruno A. Rocca<sup>a,c</sup> y Sergio Preidikman<sup>a,d</sup>

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

<sup>b</sup>*Departamento de Estructuras, FCFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, [depestructuras@fcefy.unc.edu.ar](mailto:depestructuras@fcefy.unc.edu.ar), <http://www.efn.uncor.edu.ar>*

<sup>c</sup>*Geophysical Institute (GFI) and Bergen Offshore Wind Centre (BOW), University of Bergen, Norway.*

<sup>d</sup>*Department of Mechanical Engineering, University of Puerto Rico at Mayagüez, Puerto Rico.*

**Palabras clave:** Cosecha de energía, Piezoelectricidad, Aeroelasticidad, Flutter.

**Resumen.** En las últimas décadas, diversas investigaciones han posicionado a las vibraciones aeroelásticas como una nueva fuente de alimentación para sistemas de pequeña escala. En este trabajo se analiza un cosechador de energía compuesto por múltiples alas piezoeléctricas flexibles y por elementos estructurales de parámetro concentrado. Como parte de los resultados se evalúa si, para cierto intervalo de velocidades del fluido, el dispositivo puede sintonizarse en condición crítica o de *flutter* modificando las propiedades de los elementos de parámetro concentrado. Si lo expuesto resulta factible, la eficiencia del dispositivo mejora ya que se consigue una extracción sostenida de energía para un intervalo de velocidades del aire.

**Keywords:** Energy harvesting, Piezoelectricity, Aeroelasticity, Flutter.

**Abstract.** In this article, an aeroelastic energy harvesting device is analyzed. The device consists not only of a pair of flexible wings with embedded piezoelectric transducers, but also of a set of structural elements with lumped parameters. The study is conducted in order to assess whether the device can be tuned into its critical flutter condition by varying the lumped parameters. If this is in fact possible, the range of air speeds in which the device harvests energy is increased with the consequent improvement in its efficiency.

## 1. INTRODUCCIÓN

Recientemente, la extracción de energía a partir de vibraciones mecánicas de estructuras flexibles ha sido objeto de estudio en numerosas investigaciones (Wei y Jing, 2017). Dentro de éstas, las vibraciones de origen aeroelástico han mostrado un gran potencial para diversas aplicaciones, e incluso han dado lugar al nuevo concepto Cosecha de Energía Aeroelástica (Abdelkefi *et al.*, 2014). Este concepto ha despertado un gran interés en el desarrollo de sistemas no convencionales de generación de energía a pequeña escala, los cuales están constituidos por una red o arreglo de dispositivos (cosechadores de energía) que enfrentan una corriente de aire, con el fin de aprovechar el potencial eólico disponible en zonas urbanas y suburbanas. La idea fundamental de este diseño consiste en hacer uso de mecanismos aeroelásticos para recolectar la energía proveniente de las vibraciones mecánicas inducidas por el viento y, finalmente, transformarla a una forma de energía utilizable.

La mayoría de los diseños conceptuales para los cosechadores de energía explorados están basados en la utilización de una estructura flexible y un sistema de transducción que convierte la energía mecánica asociada a las vibraciones de la estructura a energía eléctrica aprovechable (Erturk *et al.*, 2010; Bryant *et al.*, 2011). Como mecanismo de transducción, los sistemas electromagnéticos (Carneiro *et al.*, 2020), electrostáticos (Khan y Qadir, 2016) o piezoeléctricos (Elahi *et al.*, 2018) suelen ser los más utilizados. Los materiales piezoeléctricos, en particular, proporcionan una gran versatilidad debido a su eficiencia en un amplio rango de frecuencias (Safaei *et al.*, 2019). En cuanto a fenómenos aeroelásticos, el flutter ha sido abordado en numerosos estudios analíticos, numéricos y experimentales, que han permitido entender aspectos importantes del comportamiento electroaero-elástico de un cosechador de energía basado en este fenómeno (Erturk *et al.*, 2010; Bryant y Garcia, 2009; Kwon, 2010). Por otro lado, en la literatura existe un gran número de trabajos científicos orientados al estudio del comportamiento de diferentes modelos de parámetros concentrados basados en perfiles alares soportados por resortes en combinación con un modelo piezoeléctrico para predecir el voltaje generado por el cosechador (Verstraete *et al.*, 2022). En estos trabajos, se ha demostrado que las interacciones aerodinámicas entre los cosechadores de un arreglo tienen una influencia significativa en la respuesta del sistema, y principalmente en la producción de energía (Bryant *et al.*, 2012; Roccia *et al.*, 2020; Beltramo *et al.*, 2020). A pesar de los importantes avances que se han logrado hasta el momento, el final de esta línea de investigación dista de alcanzarse ya que no existen consensos definitivos a los criterios de diseño, ni es posible realizar afirmaciones contundentes sobre la viabilidad de éstos diseños.

En este trabajo se presenta un estudio numérico sobre el comportamiento de un arreglo de cosechadores de energía basado en el fenómeno de flutter que incorpora materiales piezoeléctricos como medio de transformación de energía, y elementos estructurales concentrados (resortes). Este estudio extiende el trabajo de Verstraete *et al.* (2022), que originalmente utiliza un modelo bidimensional, a tres dimensiones. En esta oportunidad, se evalúa si es posible utilizar los parámetros concentrados como variable de ajuste para sintonizar el cosechador haciéndolo alcanzar una condición crítica con distintas velocidades de la corriente libre.

Luego de esta introducción, el artículo presenta el modelo numérico implementado que consiste en: i) un modelo aerodinámico inestacionario basado en el método de red de vórtices (UVLM) que permite captar las interacciones aerodinámicas entre los cosechadores que componen el arreglo basado; ii) un modelo electro-elástico basado en el método de elementos finitos y que incorpora parámetros concentrados; y iii) un modelo de interacción fuerte en el dominio del tiempo que combina los dos anteriores. Seguidamente, se presenta el caso de estudio ana-

lizado, definiendo sus características geométricas y constitutivas. Finalmente, se exponen los resultados de las simulaciones realizadas.

## 2. MODELOS NUMÉRICOS

Para llevar a cabo el estudio se implementaron los siguientes modelos numéricos.

### 2.1. Modelo electroelástico

El modelo electroelástico se sustenta en una formulación lineal de elementos finitos de viga piezoeléctrica que incorpora elementos estructurales de parámetro concentrado. El modelo de viga se basa en las hipótesis de la teoría clásica de Timoshenko e incluye los efectos del alabeo de la sección transversal por torsión pura según la teoría de Saint-Venant. Por su parte, los elementos de parámetro concentrado corresponden a resortes de tipo traslacional y torsional, ambos de comportamiento lineal. Según la Figura 1a, tanto la geometría de sección de la viga como el número de transductores piezoeléctricos son arbitrarios, pero estos últimos sólo pueden adoptar dos posibles orientaciones con relación al sistema de referencia de la sección. Asimismo la cantidad de cosechadores embebidos es arbitraria.

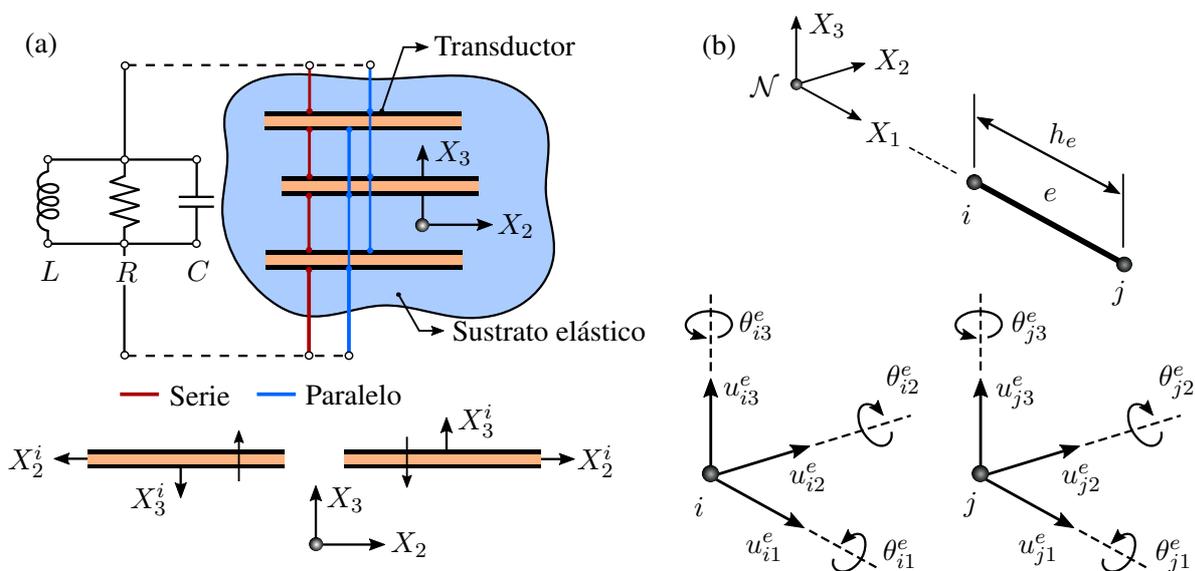


Figura 1: (a) Sección trasversal de un elemento finito de viga, conexiones entre transductores y orientaciones respecto al sistema  $X_2 - X_3$ . (b) Grados de libertad geométricos del elemento finito  $e$ .

El elemento finito posee dos nodos con seis grados de libertad geométricos en cada uno de ellos, tres traslaciones y tres rotaciones, tal como se presenta en la Figura 1b. El desplazamiento del eje elemental y la rotación de la sección transversal se interpolan utilizando las funciones de forma vinculadas propuestas por Oñate (2013) para evitar el bloqueo por corte. De acuerdo a lo expuesto en la Figura 1a, cada cosechador está formado por  $N_t$  transductores conectados en serie o en paralelo y por componentes eléctricos pasivos de parámetro concentrado dispuestos en paralelo. Estos componentes se corresponden con un resistor  $R$ , un inductor  $L$  y un capacitor  $C$ . Los grados de libertad eléctricos del elemento se asocian a los potenciales de los electrodos de cada transductor y su número depende de la cantidad de cosechadores embebidos y del tipo de conexión eléctrica entre los transductores.

Las ecuaciones de movimiento de una estructura piezoeléctrica modelada con elementos finitos de viga, resortes traslacionales y torsionales, y con  $N_c$  cosechadores embebidos se pueden

reducir de orden aplicando el método de descomposición modal. De ello se resulta:

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\eta}}(t) + \mathbf{C}_m \dot{\boldsymbol{\eta}}(t) + \mathbf{K}_m \boldsymbol{\eta}(t) - \sum_{k=1}^{N_c} \boldsymbol{\beta}_k^T \boldsymbol{\varphi}_\alpha^k(t) &= \mathbf{P} [\boldsymbol{\eta}(t), \dot{\boldsymbol{\eta}}(t)] \\ \mathbf{C}_\alpha^k \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_\alpha^k(t) + \mathbf{R}_\alpha^k \dot{\boldsymbol{\varphi}}_\alpha^k(t) + \mathbf{L}_\alpha^k \boldsymbol{\varphi}_\alpha^k(t) &= -\boldsymbol{\beta}_k \boldsymbol{\eta}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$\boldsymbol{\eta}(t)$  denota al vector global de coordenadas modales y  $\boldsymbol{\varphi}_\alpha^k(t)$  al vector de potenciales eléctricos del  $k$ -ésimo circuito. Además, el subíndice  $\alpha$  refiere a una conexión en serie,  $\alpha = S$ , o en paralelo,  $\alpha = P$ , entre transductores.  $\mathbf{C}_m$  es la matriz de amortiguamiento modal,  $\mathbf{K}_m$  la matriz de rigidez modal,  $\boldsymbol{\beta}_k$  la matriz de acoplamiento electromecánico modal y  $\mathbf{P} [\boldsymbol{\eta}(t), \dot{\boldsymbol{\eta}}(t)]$  el vector de cargas aerodinámicas modal.  $\mathbf{C}_\alpha^k$  es la matriz de capacitancia, la cual contempla la capacitancia inherente a los transductores y la externa. En tanto que,  $\mathbf{R}_\alpha^k$  constituye la matriz de resistencia y  $\mathbf{L}_\alpha^k$  la de inductancia. Las dimensiones de las matrices y vectores introducidos con anterioridad son:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta}(t) \in \mathbb{R}^{N_m \times 1}, \boldsymbol{\varphi}_\alpha^k(t) \in \mathbb{R}^{N_p^k \times 1}, \mathbf{P} [\boldsymbol{\eta}(t), \dot{\boldsymbol{\eta}}(t)] \in \mathbb{R}^{N_m \times 1}, \mathbf{C}_m \in \mathbb{R}^{N_m \times N_m}, \\ \mathbf{K}_m \in \mathbb{R}^{N_m \times N_m}, \boldsymbol{\beta}_k \in \mathbb{R}^{N_p^k \times N_m}, \mathbf{C}_\alpha^k \in \mathbb{R}^{N_p^k \times N_p^k}, \mathbf{R}_\alpha^k \in \mathbb{R}^{N_p^k \times N_p^k}, \mathbf{L}_\alpha^k \in \mathbb{R}^{N_p^k \times N_p^k} \end{aligned} \quad (2)$$

$N_m$  especifica el número de modos naturales de vibrar considerados en la reducción de orden y  $N_p^k$  el número de potenciales eléctricos independientes del  $k$ -ésimo circuito.

## 2.2. Modelo aerodinámico

El modelo aerodinámico tiene sus bases en el método de red de vórtices inestacionario y no lineal (NLUVLM, por sus siglas en inglés) cuyos detalles fueron presentados por Pérez Segura et al. (2020). El mismo considera un flujo a elevado número de Reynolds, no viscoso e incompresible (barotrópico), donde se distribuyen singularidades (vórtices). Este tipo de modelos se denominan dominados por vorticidad y permiten captar adecuadamente las cargas de sustentación sobre superficies portantes. Además, permiten simular la interacción aerodinámica entre los cuerpos rígidos y flexibles que componen un sistema. Como contrapartida, el método presenta ciertas limitaciones para la determinación de la resistencia aerodinámicas y para la representación algunos fenómenos de difusión. Las cuerpos sustentadores (partes del sistema sobre los que se calculan cargas aerodinámicas) se representan a partir de su superficie media, mientras que el resto de los cuerpos se describen considerando su superficie exterior. Las estelas de los cuerpos se modelan como sábanas vorticosas libres de fuerza que evolucionan con la velocidad local del flujo. La configuración del modelo para el caso de estudio de un drone cuadricóptero se muestra en la Figura 2.

## 2.3. Modelo de Interacción

El modelo de interacción es el encargado de combinar de forma consistente los modelos anteriores. Como principal característica, es de tipo fuerte ya que, si bien admite el uso de distintos intervalos temporales para la simulación estructural y la aerodinámica, la comunicación entre ambos es bidireccional y fuerza la compatibilidad entre las soluciones en todos los pasos. Este tipo de interacción favorece la estabilidad de la simulación, aunque fija ciertas restricciones a la hora de definir los intervalos de tiempo utilizados. El procedimiento para la transferencia de variables entre los modelos se basa en conceptos cinemáticos y de equilibrio, y garantiza los principios de conservación, dando lugar así a un sistema dinámico global. Para la simulación,

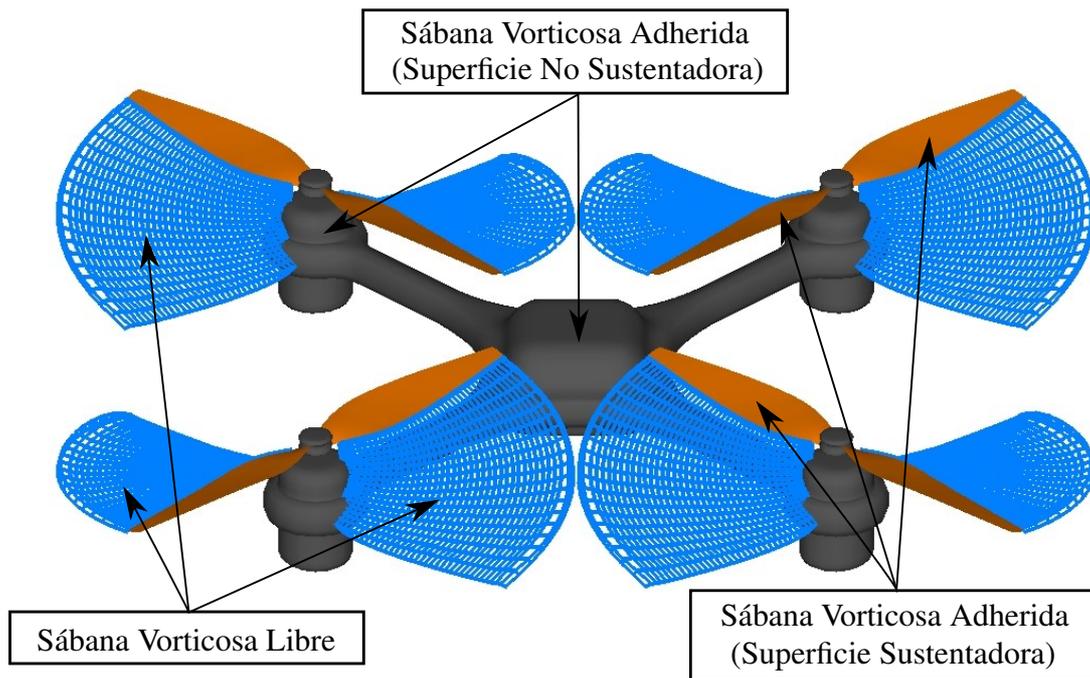


Figura 2: Configuración de los elementos del UVLM

el modelo combinado se divide en una serie de cuerpos (como el representado en la figura) formados por al menos una malla estructural (ME) de elementos finitos, al menos una grilla aerodinámica (MA) del NLUVLM asociada y su(s) estela(s) correspondiente(s). Con este esquema, la transferencia de información se realiza de forma independiente para cada uno de los cuerpos que integra el modelo combinado.

La Figura 3 esquematiza la comunicación entre los modelos dentro de cada cuerpo para un paso aerodinámico, en el cual: i) las cargas aerodinámicas calculadas sobre las grillas aerodinámicas (GA) del NLUVLM se transfieren estáticamente como cargas externas a las mallas estructurales (ME) del FEM; ii) las ecuaciones de gobierno del sistema dinámico resultante se integran en el tiempo con el método predictor corrector de cuarto orden desarrollado por J. W. Hamming; iii) los desplazamientos y velocidades obtenidos son transferidos para actualizar la cinemática de las GA; iii) los pasos anteriores se repiten hasta alcanzar la convergencia.

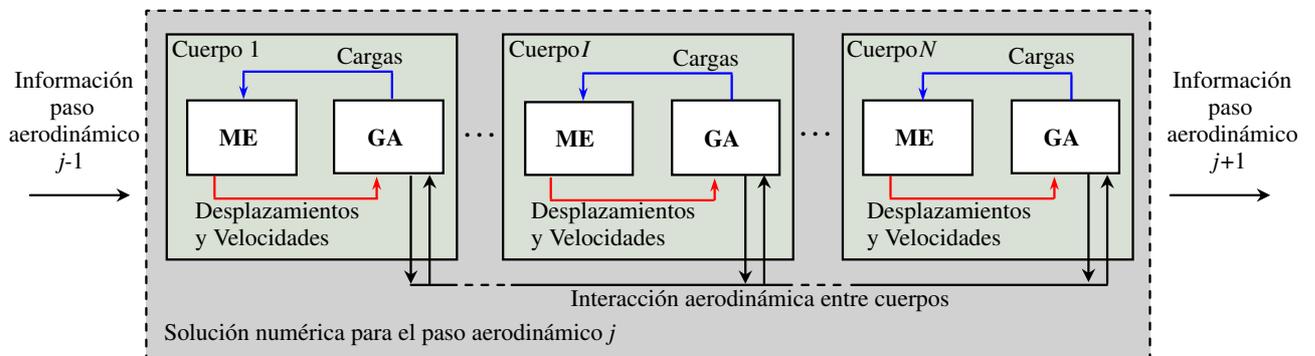


Figura 3: Esquema de interacción entre modelos para cada paso de tiempo.

### 3. EL DISPOSITIVO COSECHADOR

El dispositivo de recolección de energía está compuesto por dos alas multifuncionales dispuestas sobre soportes elásticos, tal como se expone en la Figura 4a. Cada ala se representa por medio de una viga de polietileno que posee una sección transversal rectangular que se mantiene constante en la dirección del eje  $X_2$ . En la misma figura se indica la discretización adoptada para la malla estructural (9 elementos por ala) y la grilla aerodinámica (10 paneles en la dirección de la cuerda y 25 paneles en la dirección de la envergadura). Es importante notar que el elemento finito central posee dos transductores piezoeléctricos PZT-5A dispuestos tal como se indica en la Figura 4b. Además, entre los terminales extremos de estos transductores se conecta un resistor  $R$ , dando origen a un cosechador por ala. Los parámetros que caracterizan la configuración geométrica del dispositivo, la densidad del aire y el paso de tiempo de integración de ambos modelos se sintetizan en la Tabla 1. Las simulaciones se efectuaron considerando los primeros 16 modos de vibrar del dispositivo y adoptando un amortiguamiento estructural nulo.

Parámetro	Elemento Piezoeléctrico	Elementos Estructurales	Unidad
$l$	0.25		m
$d$	0.20		m
$c$	0.05		m
$h$	0.60	1.0	mm
$d$	30	30	mm
$t_p$	0.20	-	mm
$R$	15		$k\Omega$
$\rho$ (Aire)	1.225		$\text{kg/m}^3$
$\Delta t$	$2.5 \times 10^{-4}$		s

Tabla 1: Parámetros utilizados en las simulaciones.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Unidad
$k_t$	4.0	3.0	2.0	Nm
$k_1$	5.0	7.5	10.0	N/m
$k_2$	10.0	10.0	10.0	N/m

Tabla 2: Magnitudes de los parámetros adoptadas para cada caso analizado.

### 4. RESULTADOS

Dado que el objetivo del presente trabajo es evaluar el comportamiento del dispositivo en función de las rigideces de los resortes incorporados en la configuración (ver Figura 4a), se realizaron tres simulaciones modificando únicamente dichos parámetros. En todos los casos, se adoptó una velocidad de la corriente libre de  $31.0 [m/s]$  y se analiza la respuesta del sistema luego de una perturbación inicial, con los datos de la Tabla 1. En cuanto a las rigideces de los resortes, se utilizaron para cada simulación las magnitudes expuestas en la Tabla 2.

Bajo estas condiciones, en la Figura 5 se presentan los diagramas de fase del desplazamiento vertical (según  $X_3$ ) del *Nodo B* (ver Figura 4a) para cada uno de los casos identificados en la Tabla 2. Además, en la Figura 6 se presenta la evolución en el tiempo del voltaje de salida en los transductores piezoeléctricos de cada uno de los cosechadores.

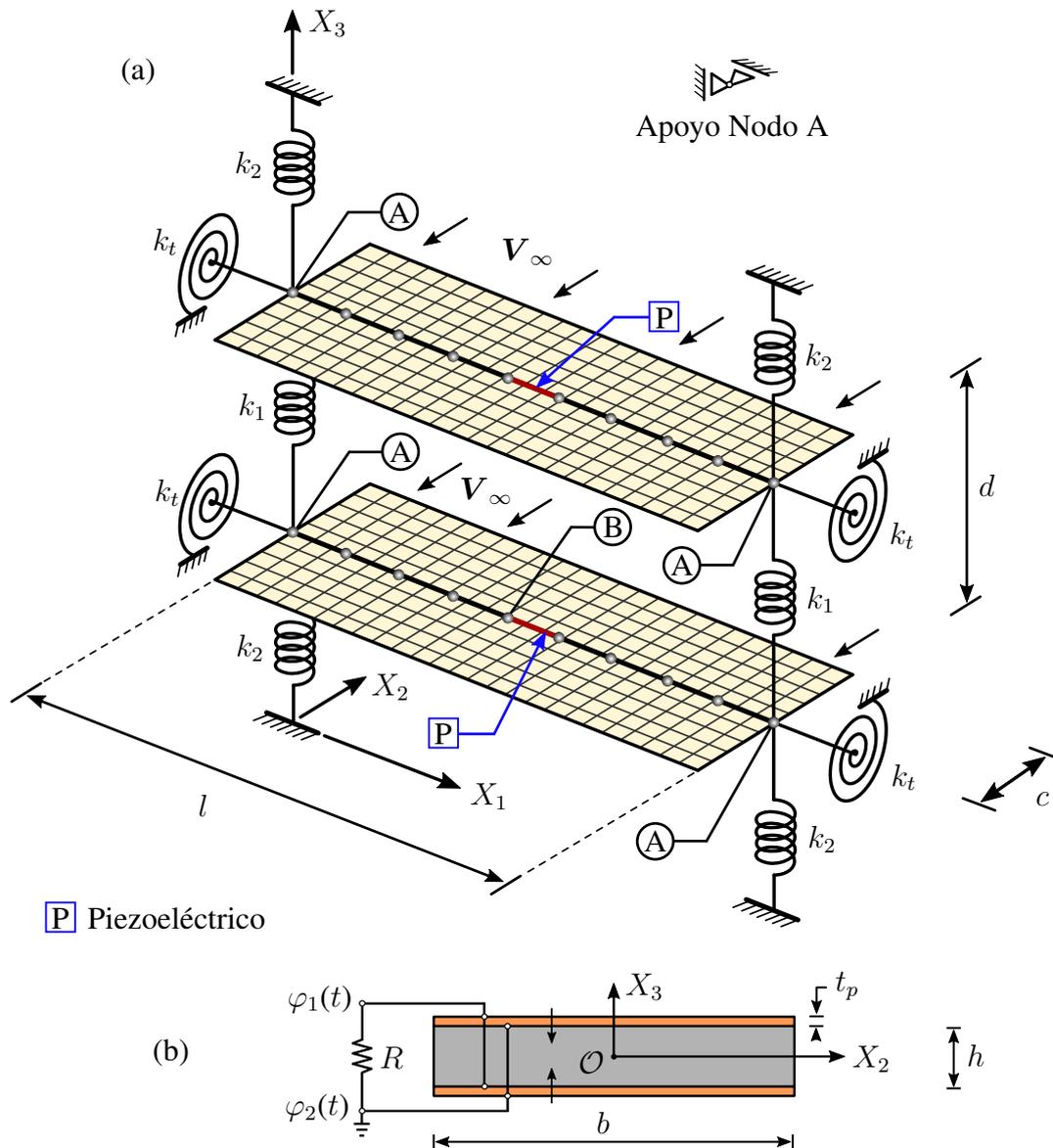


Figura 4: El dispositivo cosechador. (a) Esquema de las grillas aerodinámicas, mallas estructurales y elementos de parámetro concentrado. (b) Sección transversal de los elementos piezoeléctricos.

Los resultados muestran que para el Caso 1 las oscilaciones se atenúan dando lugar a un foco estable en el diagrama de fase, mientras que para el Caso 2 y el Caso 3 se producen oscilaciones de ciclo límite (LCO). Lo propio puede observarse en los gráficos de la Figura 6. Existe, además, una diferencia en la amplitud de los ciclos límite del Caso 2 y del Caso 3, siendo éste último notablemente más reducido.

En cuanto a la influencia de los resortes, los resultados indican que la velocidad de flutter del sistema parecería ser más sensible a la rigidez de los resortes torsionales ( $k_t$ ) ya que, para los casos estudiados, es ésta la que modifica el estado del sistema de pre-crítico a post-crítico. No obstante esto, la rigidez de los resortes traslacionales medios ( $k_1$ ) es la que conecta estructuralmente a los cosechadores y, consecuentemente, influye en la amplitud de los ciclos límite.

Lo anterior no solo sugiere que si el dispositivo en estudio enfrenta una corriente libre de 31.0 [m/s] cosechará una mayor cantidad de energía si su configuración es próxima a la del Caso 2, sino que también muestra que es posible sintonizarlo modificando los parámetros concentrados

si la velocidad cambia. Finalmente, se presenta una visualización de la simulación del Caso 3 luego de transcurridos 2.38[s].

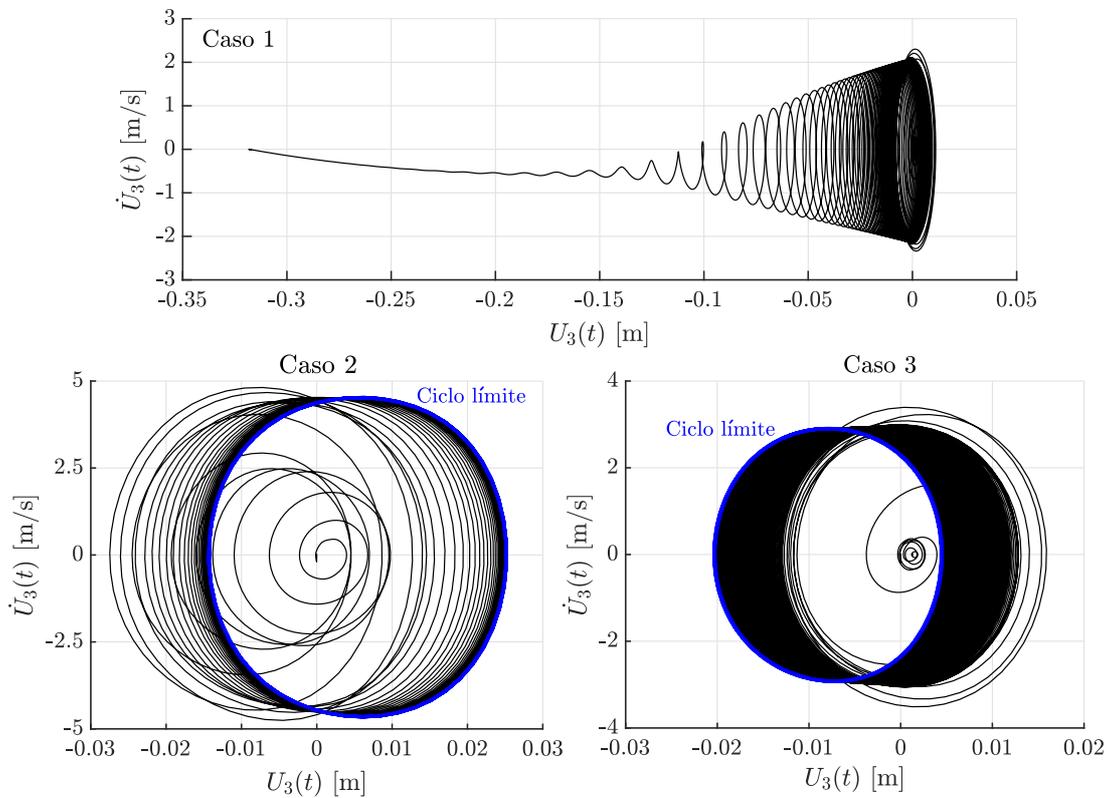


Figura 5: Diagramas de fase desplazamiento vertical del *Nodo B* para el Caso 1, Caso 2 y el Caso 3.

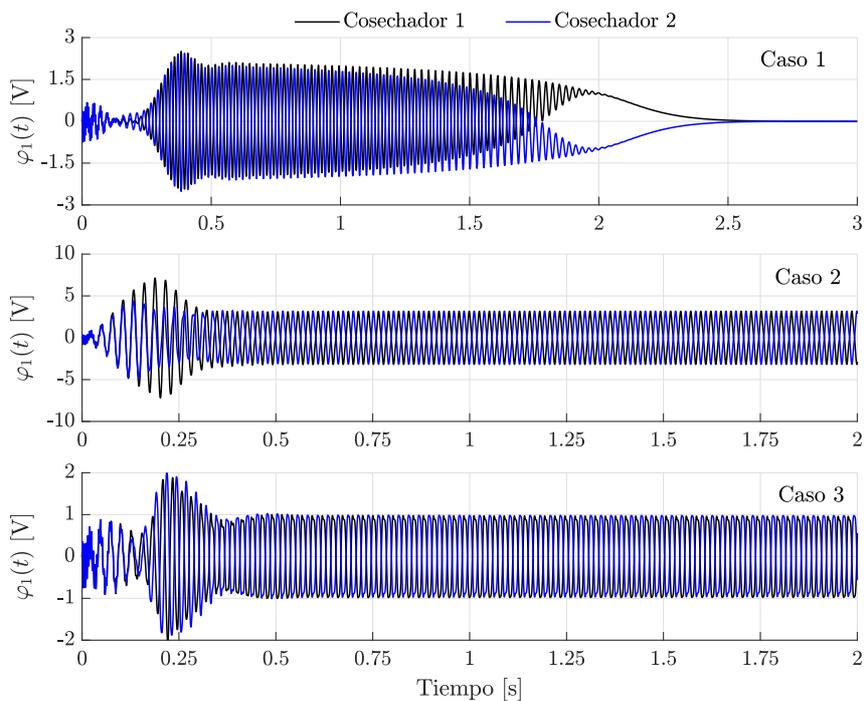


Figura 6: Diagramas de fase desplazamiento vertical del *Nodo B* para el Caso 1, Caso 2 y el Caso 3.

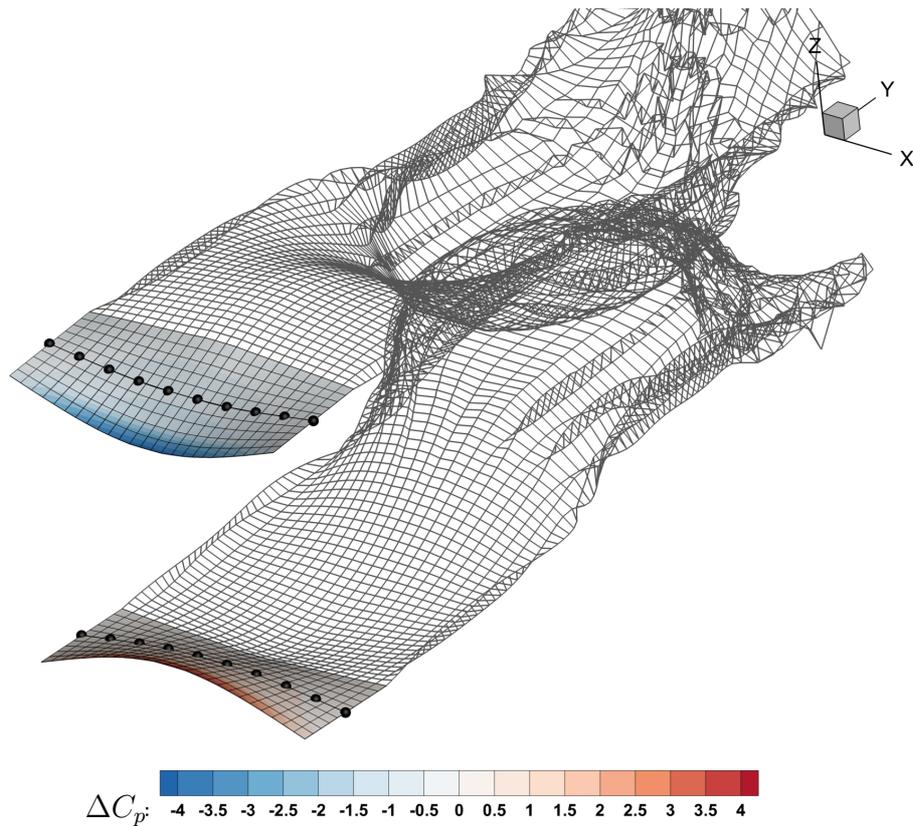


Figura 7: Visualización de la simulación del Caso 3 para  $t = 2.38$  [s].

## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como propósito evaluar la factibilidad de un dispositivo para la cosecha de energía aeroelástica, basado en el fenómeno de flutter, durante su etapa de pre-diseño. El dispositivo consiste en un conjunto de dos cosechadores de energía que incorpora materiales piezoeléctricos como medio de transducción, y elementos estructurales concentrados (resortes). Para el estudio se utilizó un modelo de co-simulación compuesto por: un modelo electroelástico, que se sustenta en elementos finitos de viga lineales; un modelo aerodinámico, que se basa en el método de la red de vórtices inestacionario; y un método de interacción, que permite la transferencia de cargas y de variables cinemáticas entre modelos.

Los resultados obtenidos indican que es posible sintonizar el dispositivo para que alcance un estado post-crítico modificando las rigideces de los resortes incorporados en la configuración. Con esta conclusión, resulta viable suponer un diseño de cosechador adaptativo que asegure maximizar la cosecha para distintos valores de velocidades de viento, e incluso en un rango de velocidad cambiante.

Nuevamente, es conveniente destacar que las investigaciones en esta línea deben continuarse para lograr afianzar los conceptos aquí expuestos y acercarse a la unificación de los criterios de diseño para estos dispositivos. En particular, se proponen como trabajos futuros realizar un estudio de sensibilidad ante los parámetros de rigidez, modificar el esquema de configuración e incorporar modelos no lineales tanto a la estructura flexible como a los elementos de parámetros concentrados.

## REFERENCIAS

- Abdelkefi A., Ghommem M., Nuhait A.O., y Hajj M. Nonlinear analysis and enhancement of wing-based piezoaeroelastic energy harvesters. *Journal of Sound and Vibration*, 333(1):166–177, 2014.
- Beltramo E., Pérez Segura M.E., Roccia B.A., Valdez M.F., Verstraete M.L., y Preidikman S. Constructive aerodynamic interference in a network of weakly coupled flutter-based energy harvesters. *Aerospace*, 7(12):167, 2020.
- Bryant M. y Garcia E. Development of an aeroelastic vibration power harvester. En *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009*, volumen 7288, páginas 409–418. SPIE, 2009.
- Bryant M., Mahtani R.L., y Garcia E. Wake synergies enhance performance in aeroelastic vibration energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(10):1131–1141, 2012.
- Bryant M., Wolff E., y Garcia E. Aeroelastic flutter energy harvester design: the sensitivity of the driving instability to system parameters. *Smart Materials and Structures*, 20(12):125017, 2011.
- Carneiro P., dos Santos M.P.S., Rodrigues A., Ferreira J.A., Simões J.A., Marques A.T., y Kholkin A.L. Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: A review. *Applied Energy*, 260:114191, 2020.
- Elahi H., Eugeni M., y Gaudenzi P. A review on mechanisms for piezoelectric-based energy harvesters. *Energies*, 11(7):1850, 2018.
- Erturk A., Vieira W.G.R., De Marqui C., y Inman D.J. On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems. *Applied physics letters*, 96(18), 2010.
- Khan F.U. y Qadir M.U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26(10):103001, 2016.
- Kwon S.D. A t-shaped piezoelectric cantilever for fluid energy harvesting. *Applied physics letters*, 97(16), 2010.
- Oñate E. *Structural analysis with the finite element method. Linear statics: volume 2: beams, plates and shells*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Pérez Segura M.E., Mook D.T., y Preidikman S. General-purpose object-oriented framework for vorticity-dominated flow simulation. *Journal of Aerospace Information Systems*, 17(10):562–580, 2020.
- Roccia B.A., Verstraete M.L., Ceballos L.R., Balachandran B., y Preidikman S. Computational study on aerodynamically coupled piezoelectric harvesters. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 31(13):1578–1593, 2020.
- Safaei M., Sodano H.A., y Anton S.R. A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008–2018). *Smart materials and structures*, 28(11):113001, 2019.
- Verstraete M.L., Roccia B.A., Ceballos L.R., Beltramo E., y Preidikman S. Análisis inestacionario no-lineal de un arreglo de cosechadores de energía basados en flutter. *Mecánica Computacional*, 39(25):931–941, 2022.
- Wei C. y Jing X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:1–18, 2017.