

COSECHA PIEZOAEROELÁSTICA DE ENERGÍA BASADA EN FLUTTER: UNA HERRAMIENTA DE CO-SIMULACIÓN

PIEZOAEROELASTIC ENERGY HARVESTING BASED ON FLUTTER: A CO-SIMULATION TOOL

Emmanuel Beltramo^{a,b}, Martín E. Pérez Segura^{a,b}, Santiago Ribero^a, Agostina C. Aichino^a, Bruno A. Rocca^{a,c} y Sergio Preidikman^{a,d}

^a*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) - CONICET, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina.*

^b*Departamento de Estructuras, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, depestructuras@fcefy.unc.edu.ar, <http://www.fcefy.unc.edu.ar>*

^c*Geophysical Institute (GFI) and Bergen Offshore Wind Centre (BOW), University of Bergen, Norway.*

^d*Department of Mechanical Engineering, University of Puerto Rico at Mayagüez, Puerto Rico.*

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

Resumen. Recientemente, la comunidad científica comenzó a explorar la posibilidad de recolectar energía del aire a partir de mecanismos no convencionales de naturaleza aeroelástica, tal como es el *flutter*. La búsqueda de fuentes alternativas está motivada por la necesidad de alimentar a dispositivos electrónicos de baja potencia. En este trabajo, se exponen las características más importantes de una herramienta computacional basada en una estrategia de co-simulación. En este sentido, se detallan los modelos involucrados, el método de intercambio de información entre modelos y el esquema de integración numérica. Con el propósito de mostrar su utilidad, se evalúa el comportamiento de un cosechador piezoaeroelástico de dimensiones reducidas. Para ello, se lo expone ante un flujo de aire y se cuantifica la energía recolectada variando cierto parámetro eléctrico del cosechador.

Keywords: Energy harvesting, Piezoelectricity, Aeroelasticity, Flutter.

Abstract. This article presents a computational framework based on a co-simulation strategy developed for studying non-conventional flutter-based energy harvesting devices. The developed numerical models are described, along with the method implemented for the communication between models and the numerical integration scheme. In order to demonstrate its capabilities, a study of a small scale piezo-aeroelastic harvester is performed, where the harvester is exposed to a free air stream and the output power is measured for different electrical parameters.

1. INTRODUCCIÓN

El término cosecha aeroelástica de energía refiere al proceso de conversión de la energía eólica disponible en el medio ambiente en electricidad a través de mecanismos no convencionales (Safaei et al., 2019).

En las últimas dos décadas, el desarrollo de dispositivos remotos de baja potencia, portables y de dimensiones reducidas junto a la contaminación ambiental, causada en mayor medida por el aumento en el consumo de energías no renovables, han fomentado la búsqueda de fuentes no convencionales de energía. Es bien sabido que el viento es un recurso natural renovable e inagotable que esta presente en todas partes, características que lo han posicionado como una fuente natural por excelencia. Tradicionalmente, la conversión de la energía cinética del viento en electricidad se ha llevado a cabo por medio de mecanismos convencionales, tales como las turbinas eólicas. Sin embargo, en los últimos tiempos los investigadores comenzaron a evaluar nuevos métodos para extraer energía del aire, incluyendo mecanismos no convencionales de naturaleza aeroelástica. En este sentido, centraron su atención en las vibraciones mecánicas inducidas por el flujo de fluidos, consideradas como una de las fuentes de energía más promisorias para sistemas de pequeña escala. Esto se debe a que tales vibraciones se pueden obtener de la interacción fluido-estructura utilizando generadores de energía inmersos en diversas condiciones de flujo natural (Li et al., 2016; Wang et al., 2020). El *flutter* es uno de los fenómenos aeroelásticos que se puede considerar para explorar la recolección de energía basada en vibraciones. Se caracteriza por oscilaciones periódicas y auto sostenidas, lo que favorece potencialmente una extracción continua de energía del fluido (Abdelkefi, 2016).

La transformación de las vibraciones mecánicas en energía eléctrica se puede llevar a cabo a través de los siguientes tres mecanismos de transducción: electrostático, electromagnético y piezoeléctrico. A pesar de ello, la piezoelectricidad ha recibido especial atención en comparación con los otros mecanismos. Sus principales ventajas se atribuyen a su facilidad de aplicación, eficiencia en un amplio rango de frecuencias y a su gran densidad de potencia (Erturk y Inman, 2011).

A pesar de los numerosos avances alcanzados en este campo, aún existen barreras técnicas que deben ser sorteadas, en particular, para evaluar la viabilidad de esta nueva tecnología. Este aspecto motiva y justifica el desarrollo de modelos numéricos tanto para investigar el comportamiento de los generadores piezoeléctricos de energía como para elaborar criterios de diseño para su construcción (Verstraete et al., 2022).

En este trabajo se exponen los aspectos más importantes de una herramienta computacional que permite investigar, a través de simulaciones numéricas, la respuesta de cosechadores piezoeléctricos alimentados por medio de vibraciones mecánicas de origen aeroelástico, en especial, basadas en el fenómeno aeroelástico *flutter*. Dada la naturaleza multifísica del problema abordado, el desarrollo de esta herramienta se apoya en una estrategia de co-simulación, lo que implica la participación de los siguientes tres subsistemas: *i*) un modelo electroelástico basado en un elemento finito de viga lineal, *ii*) un modelo aerodinámico que se sustenta en el método de la red de vórtices inestacionario y no lineal y, *iii*) un método de interacción bidireccional entre los modelos anteriores para transferir la solución computada por cada uno de ellos.

Luego de esta sección introductoria, en la Sección 2 se presentan las características fundamentales de los modelos involucrados y del método de interacción. En la Sección 3, se detalla el esquema numérico implementado, mientras que en la Sección 4 se aborda un caso de estudio donde se investiga el comportamiento electroelástico de un generador piezoaeroelástico de energía. Por último, en la Sección 5 se enuncian las conclusiones más importantes del trabajo.

2. MODELOS

En esta sección se describen resumidamente los modelos involucrados en la herramienta y el método de comunicación entre ellos.

2.1. Modelo electroelástico

El modelo electroelástico consiste en una formulación lineal de elementos finitos de viga piezoeléctrica que 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. De acuerdo a 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. También la cantidad de cosechadores embebidos es arbitraria.

El elemento posee dos nodos con seis grados de libertad geométricos en cada uno de ellos, tres traslaciones y tres giros, tal como se observa en la Figura 1b. Los campos cinemáticos fundamentales, desplazamientos y rotaciones infinitesimales, 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 con N_c cosechadores embebidos cuyo orden se reduce aplicando el método de descomposición modal se pueden expresar de la siguiente manera:

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

$$\mathbf{C}_\alpha^k \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_\alpha^k(t) + \mathbf{R}_\alpha^k \dot{\boldsymbol{\varphi}}_\alpha^k(t) + \mathbf{L}_\alpha^k \boldsymbol{\varphi}_\alpha^k(t) = -\boldsymbol{\beta}_k \boldsymbol{\eta}(t)$$

$\boldsymbol{\eta}(t)$ 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 α 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}_α^k es la matriz de capacitancia, la cual contempla la capacitancia inherente a los transductores y la externa. En tanto que, \mathbf{R}_α^k constituye la matriz de resistencia y \mathbf{L}_α^k la de inductancia. Las dimensiones de las matrices y vectores introducidos con anterioridad son:

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

$$\mathbf{K}_m \in \mathbb{R}^{N_m \times N_m}, \boldsymbol{\beta}_k \in \mathbb{R}^{N_p^k \times N_m}, \mathbf{C}_\alpha^k \in \mathbb{R}^{N_p^k \times N_p^k}, \mathbf{R}_\alpha^k \in \mathbb{R}^{N_p^k \times N_p^k}, \mathbf{L}_\alpha^k \in \mathbb{R}^{N_p^k \times N_p^k}$$

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.

Para mayores detalles del modelo electroelástico el lector puede dirigirse al trabajo de Beltramo (2023).

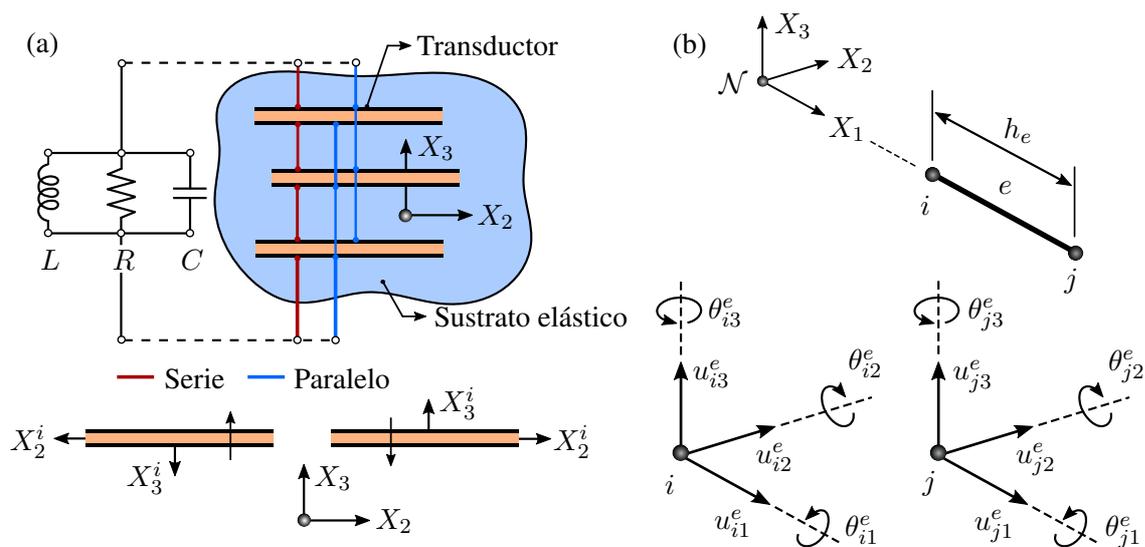


Figura 1: (a) Sección transversal de un elemento finito de viga. Conexiones entre transductores y orientaciones posibles respecto al sistema $X_2 - X_3$. (b) Grados de libertad geométricos del elemento finito e .

2.2. Modelo aerodinámico

El modelo aerodinámico tiene como finalidad estimar las cargas actuantes sobre las superficies portantes. En este trabajo se optó por una versión tridimensional del método de la red de vórtices inestacionario y no lineal (*Unsteady Vortex-Lattice Method*, UVLM) ya que proporciona un excelente balance entre precisión y costo computacional.

Según los fundamentos del UVLM, el flujo alrededor de los cuerpos sumergidos en el seno de un fluido es incompresible y se caracteriza por un elevado número de Reynolds. Bajo estas hipótesis, la distribución de vorticidad es suficientemente compacta como para dividir al dominio fluido en dos regiones bien definidas: una región pequeña de flujo rotacional con vorticidad no nula asociada a las estelas y a las capas límites, y el resto del dominio infinito que se considera irrotacional. En virtud de lo expuesto, las primeras de ellas se idealizan por medio de dos tipos de sábanas vorticosas: las adheridas (SVAs) y las libres (SVLs).

Las SVAs modelan las capas límites adyacentes a las superficies sólidas inmersas en el fluido y se mueven siguiendo la dinámica de éstas, en consecuencia se desarrolla un salto finito de presión a través de ellas. Por su parte, las SVLs modelan las estelas y ocupan posiciones libres de fuerza ya que éstas se trasladan y se deforman sin restricciones siguiendo la velocidad local del fluido. Debido a que fuera de las capas límites y las estelas el flujo es irrotacional, existe una función potencial que describe el flujo y satisface la ecuación de Laplace. Dicha ecuación se complementa con las siguientes condiciones de contorno, a saber: *i*) la condición de no penetración sobre las superficies sólidas; *ii*) la condición de regularidad en el infinito, esto requiere que las perturbaciones producidas por la presencia y el movimiento del sólido inmerso decaigan a medida que uno se aleje del cuerpo, y *iii*) las leyes de conservación de vorticidad de Helmholtz y Kelvin (Preidikman, 1998).

En el UVLM, las SVAs a las superficies de los cuerpos delgados se sustituyen por redes de segmentos vorticosos que dan origen a las grillas aerodinámicas. De acuerdo a lo mostrado en la Figura 2, cada panel de la grilla posee en su centroide un punto de control (PC) y un versor normal saliente $\hat{\mathbf{n}}_j(t)$. Asimismo, está rodeado por cuatro segmentos vorticosos que forman un lazo alrededor del mismo, donde la circulación $\Gamma_j(t)$ asociada a cada uno de ellos es la incógnita a determinar. Sin embargo, para satisfacer el teorema de conservación de la circulación se

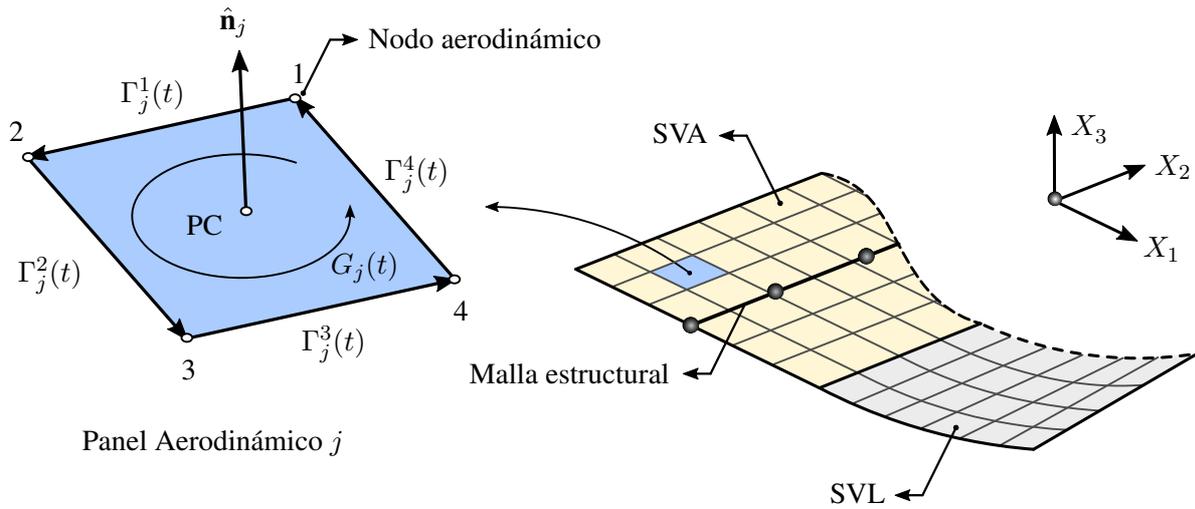


Figura 2: Detalle de un panel de la grilla aerodinámica. Representación esquemática de la sábana vorticososa adherida (SVA) y de la sábana vorticososa libre (SVL).

supone que cada panel está encerrado por un anillo vorticoso de intensidad $G_j(t)$. De esta manera, la intensidad de cada segmento recto se puede obtener por medio de la suma vectorial de las circulaciones de los anillos adyacentes. Posteriormente, al imponer la condición de no penetración en cada uno de los puntos de control de las grillas se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas de la forma (Katz y Plotkin, 2001):

$$\sum_{j=1}^{N_P} a_{ij}(t) G_j(t) = - [\mathbf{V}_W^i(\mathbf{X}, t) - \mathbf{V}_S^i(\mathbf{X}, t) + \mathbf{V}_\infty] \cdot \hat{\mathbf{n}}_i(t) \quad \text{Para } i = 1, \dots, N_p \quad (3)$$

donde N_P es el número de paneles o elementos de la grilla aerodinámica, $a_{ij}(t)$ los coeficientes de influencia aerodinámicos, $\mathbf{V}_S^i(\mathbf{X}, t)$ es la velocidad en el punto de control que induce el movimiento del sólido, $\mathbf{V}_W^i(\mathbf{X}, t)$ es la velocidad inducida por las SVLs en el punto de control del i -ésimo panel y \mathbf{V}_∞ es la velocidad de la corriente libre. Luego, para obtener la distribución de presión sobre las superficies sólidas, y por ende las cargas aerodinámicas, se emplea la ecuación de Bernoulli no estacionaria para flujos incompresibles e irrotacionales (Preidikman, 1998).

Finalmente, se ejecuta el proceso de convección de vorticidad, el cual consiste en actualizar la posición de los segmentos vorticosos que integran las SVLs a partir del desplazamiento de sus nodos empleando la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t)\Delta t, \quad (4)$$

donde $\mathbf{v}(t)$ denota la velocidad local de la partícula que se ubica sobre el nodo a desplazar y Δt es el paso de tiempo aerodinámico.

2.3. Método de interacción entre el modelo electroelástico y el modelo aerodinámico

El método de interacción debe permitir: *i*) la transferencia de las variables cinemáticas desde los nodos de la malla de elementos finitos hacia los nodos y los puntos de control de las grillas aerodinámicas y, *ii*) la transferencia de cargas desde los puntos de control de las grillas aerodinámicas hacia los nodos de la malla de elementos finitos. Ambos procesos de comunicación se basan en una relación cinemática que vincula puntos de la grilla aerodinámica con puntos de la malla estructural, garantizando la conservación de la energía.

Para aplicar la estrategia de interacción adoptada en este trabajo se necesita asociar a cada punto arbitrario de la grilla aerodinámica, ya sea un nodo o un punto de control, con un elemento finito de la malla estructural. La asociación se determina uniendo mediante un vector el punto en consideración con un punto situado sobre el eje de la viga o eje elástico. La particularidad de esta unión es que este vector debe estar contenido en un plano que interseque perpendicularmente al eje elástico.

Según lo expuesto por Beltramo (2023), el vector desplazamiento $\mathbf{U}_k(X_i, X_{1,A}, t)$ de un punto arbitrario k de la grilla aerodinámica se relaciona con el vector de coordenadas modales $\boldsymbol{\eta}_l(t)$ del elemento finito l asociado por medio de la siguiente transformación lineal:

$$\mathbf{U}_k(X_i, X_{1,A}, t) = \mathbf{G}_{kl}(X_i, X_{1,A}) \boldsymbol{\eta}_l(t), \quad (5)$$

donde $\mathbf{G}_{kl}(X_i, X_{1,A})$ es la matriz de interpolación, X_i ($i = 1, 2, 3$) son los ejes coordenados del sistema de referencia global y $X_{1,A}$ es la coordenada local de un punto ubicado sobre el eje elemental. Luego, derivando con respecto al tiempo la ecuación (5) se obtiene la expresión para la velocidad. Por otro lado, la transformación lineal que permite transferir la fuerza aerodinámica $\mathbf{F}_k(t)$ aplicada en el punto de control k hacia los nodos estructurales del elemento finito l asociado está dada por:

$$\mathbf{P}_l(X_i, X_{1,A}, t) = \mathbf{G}_{kl}^T(X_i, X_{1,A}) \mathbf{F}_k(t), \quad (6)$$

donde $\mathbf{P}_l(X_i, X_{1,A}, t)$ es el vector elemental de cargas. La ecuación (6) fue obtenida exigiendo que el trabajo virtual desarrollado por las cargas aerodinámicas y por las fuerzas y momentos nodales sea el mismo. Se debe notar que la matriz de interpolación se utiliza tanto para transferir variables cinemáticas como fuerzas.

3. ESQUEMA NUMÉRICO DE CO-SIMULACIÓN

La implementación de un enfoque de co-simulación permite particionar al sistema electro-aeroelástico en dos subsistemas que son representados por modelos diferentes con entornos de simulación propios, el modelo electroelástico y el modelo aerodinámico. A pesar de la independencia entre modelos el acoplamiento entre ellos es de tipo fuerte, lo cual se debe a la existencia de un intercambio bidireccional de información y a que el paso de tiempo, que permite el avance temporal de la solución, es único y compartido por ambos entornos de simulación.

El esquema numérico seguido para computar la solución del paso de tiempo $t + \Delta t$ se sintetiza en los siguientes pasos: *i*) se actualiza la configuración de las SVLs y se mantienen inalteradas hasta finalizar el paso de tiempo actual; *ii*) se estiman las cargas aerodinámicas en los puntos de control usando el modelo aerodinámico; *iii*) se transfieren las cargas a los nodos estructurales a través del método de interacción; *iv*) se integran las ecuaciones de movimiento utilizando el método predictor-corrector de Hamming de cuarto orden obteniendo el vector de coordenadas modales, su derivada temporal y el vector de potenciales; *v*) se actualiza la posición de las SVAs y se computa la velocidad de los puntos de control; *vi*) se repiten los pasos *ii*) a *v*) hasta alcanzar la convergencia. Para mayores detalles diríjase a los trabajos de (Preidikman, 1998; Beltramo, 2023).

4. CASO DE ESTUDIO

4.1. Descripción del caso

El cosechador aeroelástico que se investiga se modela por tres vigas que se disponen en forma de T y por una placa plana sobre la cual se computan cargas aerodinámicas. Es importante

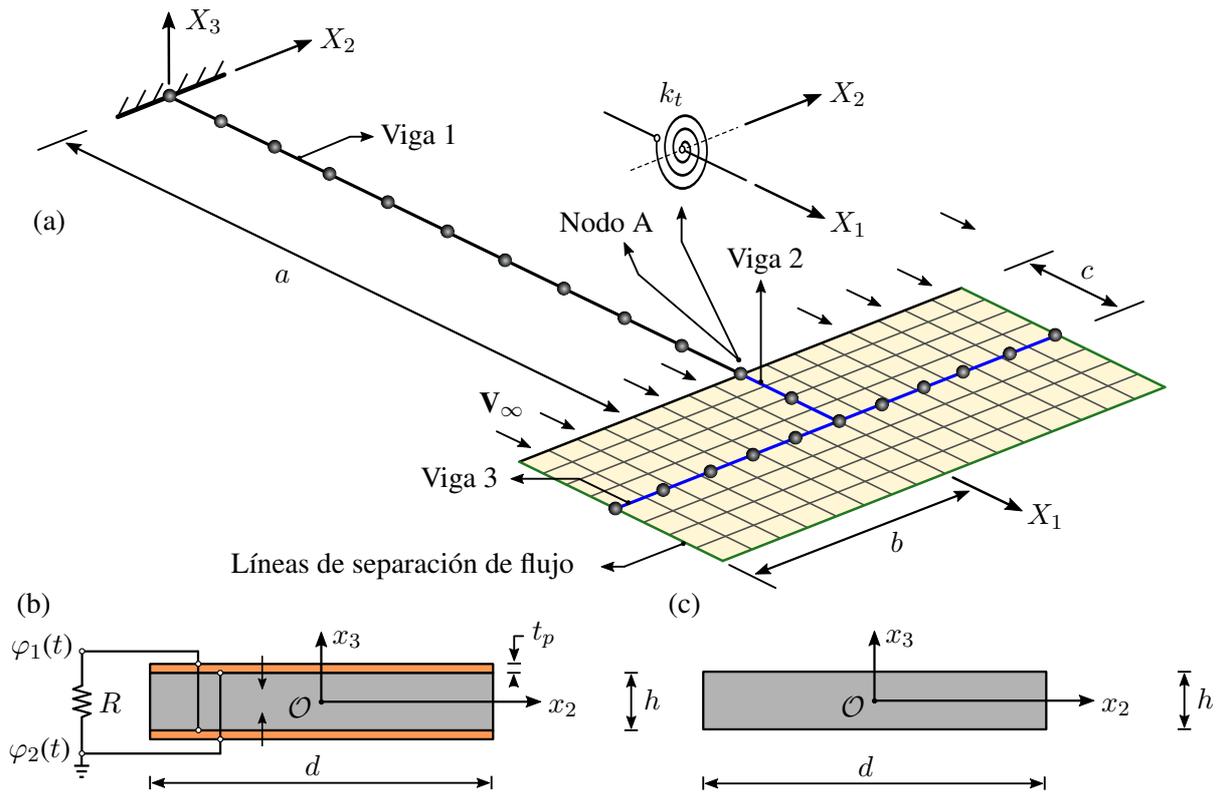


Figura 3: (a) Modelo numérico del cosechador aeroelástico de energía: malla de elementos finitos y grilla aerodinámica. (b) Sección transversal con piezocerámicos PZT-5A. (c) Sección transversal sin piezocerámicos.

observar que el nodo final de la viga 1 y el nodo el inicial de la viga 2 comparten sus grados de libertad con excepción del giro alrededor del eje X_2 , el cual se restringe por medio de un resorte torsional lineal k_t de parámetro concentrado incorporado *ad-hoc* en el modelo. En la Figura 3a se indica la discretización adoptada y los diversos parámetros geométricos que definen su configuración. Las tres vigas presentan una sección transversal rectangular de aluminio 2024-T4 que se mantiene constante en la dirección de sus ejes. En la zona del empotramiento, los primeros cinco elementos finitos poseen dos transductores piezocerámicos PZT-5A cuya disposición se indica en la Figura 3b. Asimismo, los electrodos de estos transductores se encuentran conectados en paralelo y sus terminales extremos se conectan un resistor, dando origen a un único cosechador. Las magnitudes de los parámetros geométricos, la densidad del aire y el paso de

Parámetro	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Unidad
a		0.3		m
b		0.1		m
c		0.05		m
k_t		2.5		Nm
h	0.6	1	1	mm
d	30	30	30	mm
t_p	0.2	-	-	mm
ρ (Aire)	1.225			kg/m^3
Δt	2.5×10^{-4}			s

Tabla 1: Magnitudes adoptadas por los parámetros geométricos del modelo.

tiempo de integración usado en ambos modelos se sintetizan en la Tabla 1. Las simulaciones se efectúan considerando los primeros 10 modos de vibración de la estructura y adoptando un amortiguamiento estructural nulo.

4.2. Resultados

En primer lugar, se determinó la velocidad de *flutter* del cosechador en condición de cortocircuito, es decir, cuando la resistencia tiende a cero. Se realizaron simulaciones para diferentes velocidades del aire y se analizó la respuesta del cosechador en términos de dos variables cinemáticas, $u_3(t)$ y $\theta_2(t)$. La primera variable se corresponde con el desplazamiento en dirección X_3 del nodo A y la segunda con el giro en dirección X_2 del mismo nodo pero medido sobre la viga 1. De las simulaciones se deduce que la estabilidad del sistema cambia de asintóticamente estable a marginalmente estable cuando la velocidad del aire alcanza los $37.796 [m/s]$. En esta condición, todos los grados de libertad del sistema oscilan con la misma frecuencia describiendo un ciclo límite. Lo mencionado se puede observar en la Figura 4a, donde se presenta el diagrama de fase para ambas variables en condición crítica. Asimismo, en la Figura 4b se grafica el resultado de aplicar la Transformada Rápida de Fourier sobre dichas variables cinemáticas. De ello se obtiene que la frecuencia de flutter es igual a $128.68 [rad/s]$.

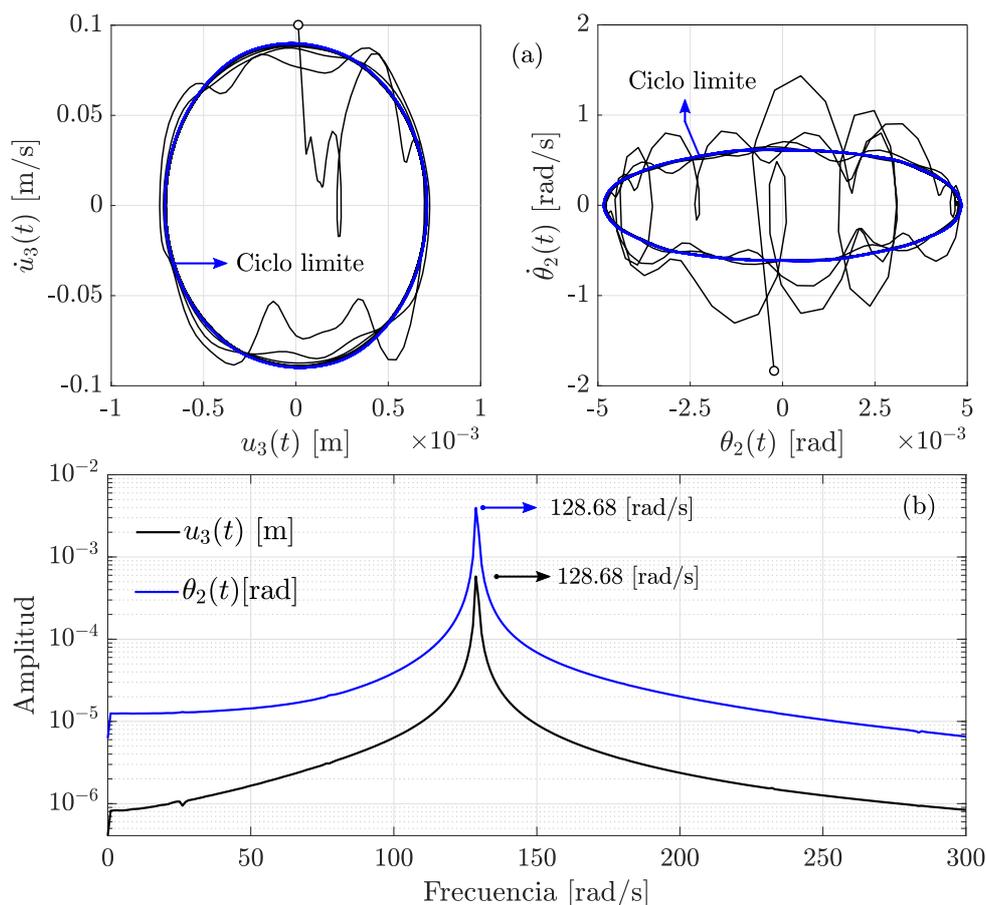


Figura 4: (a) Diagrama de fase de las variables $u_3(t)$ y $\theta_2(t)$ para una velocidad de $37.796 [m/s]$. (c) Transformada Rápida de Fourier aplicada sobre las mismas variables a la misma velocidad.

Por otro lado, en la Figura 5 se expone el resultado de evaluar el desempeño del cosechador en condición poscrítica, en particular, para una velocidad del aire igual a $38.8 [m/s]$. En color

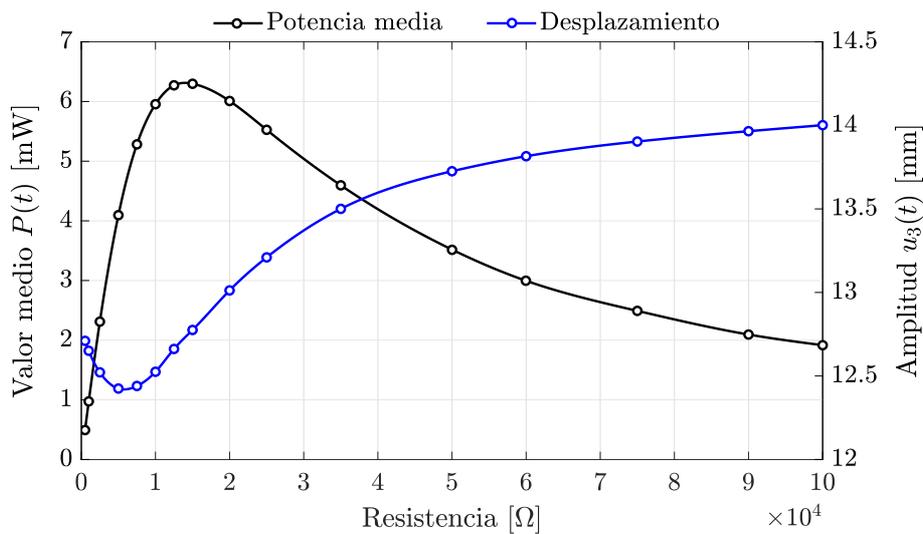


Figura 5: Evolución de la potencia media cosechada y de la amplitud del desplazamiento $u_3(t)$ en función de la resistencia eléctrica para una velocidad poscrítica igual a $38.8 [m/s]$.

negro, se grafica la evolución de la potencia media en función de la resistencia. Se observa un crecimiento de la potencia a medida que aumenta el valor de R , alcanzando un máximo de $6.3 [mW]$ para $R = 15 [k\Omega]$. Luego de ello, decrece a un ritmo prácticamente hiperbólico ya que el voltaje continúa creciendo pero muy lentamente y la potencia es inversamente proporcional a la resistencia. Además, se presenta la evolución de la amplitud del desplazamiento $u_3(t)$ en términos de R . Se puede advertir que la amplitud se reduce hasta alcanzar un mínimo, luego comienza a crecer tendiendo hacia un valor asintótico. Uno puede notar que, cualitativamente, el comportamiento de esta curva es opuesto al que muestra la potencia media. Pese a ello, la amplitud mínima no ocurre para el mismo valor de resistencia que maximiza la potencia media. En este caso, la amplitud mínima es de $12.42 [mm]$ y se produce para $R = 5 [k\Omega]$.

En la Figura 6 se muestra la configuración que adopta la estructura y la estela vorticosa para un cierto instante de la simulación cuando la velocidad del aire de $38.8 [m/s]$.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como propósito describir las características más relevantes de una herramienta numérica de co-simulación para el estudio de cosechadores piezoaeroelásticos de energía. Se presentó una breve descripción de los modelos involucrados: el modelo electroelástico, que se sustenta en elementos finitos de viga lineales, y el modelo aerodinámico, que se basa en el método de la red de vórtices inestacionario y no lineal. Además, se detalló el método de interacción, el cual permite la transferencia de cargas y de variables cinemáticas entre modelos. Por último, se efectuó una síntesis del esquema numérico seguido en la solución del problema electroaeroelástico.

Por otro lado, se mostró la capacidad de la herramienta a través de un caso de estudio. Se consideró una estructura de pequeñas dimensiones con un cosechador piezoeléctrico embebido. Como parte de los resultados, se estimó la velocidad de *flutter* de cortocircuito y se hizo un análisis del desempeño del cosechador para una velocidad poscrítica de $38.8 [m/s]$. La potencia media máxima cosechada es de $6.3 [mW]$ y se obtuvo con una resistencia igual a $15 [k\Omega]$. Asimismo, se analizó la incidencia de la resistencia eléctrica en la amplitud de oscilación de determina variable cinemática.

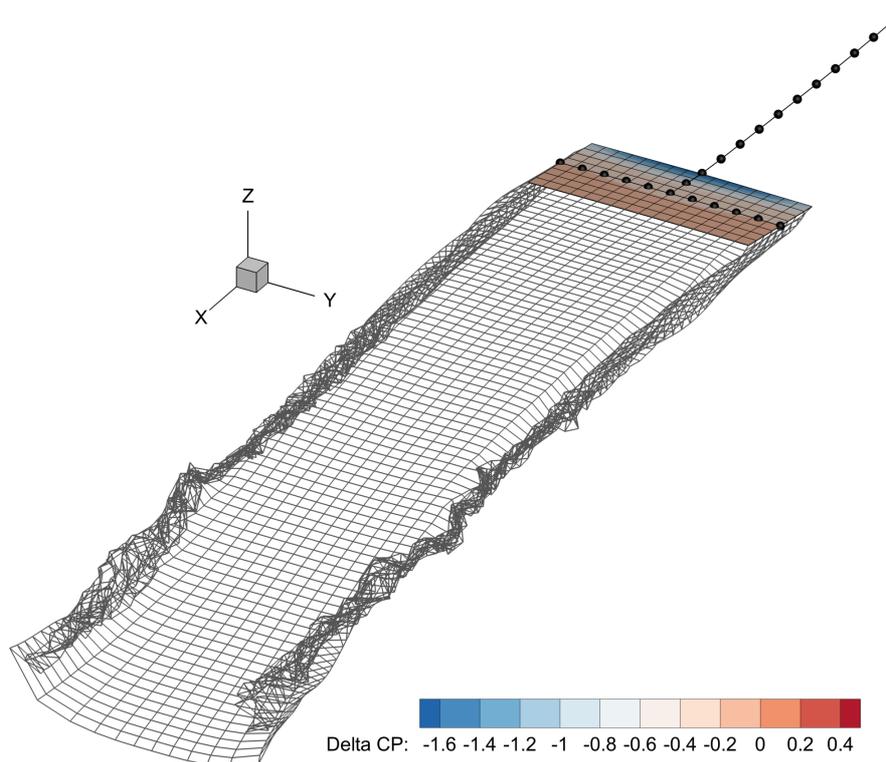


Figura 6: Configuración adoptada por la malla estructural, la grilla aerodinámica y la estela para un cierto instante cuando la velocidad del flujo es de 38.8 [m/s] .

REFERENCIAS

- Abdelkefi A. Aeroelastic energy harvesting: A review. *International Journal of Engineering Science*, 100:112–135, 2016.
- Beltramo E. *Una herramienta de co-simulación para el estudio de cosechadores piezoaeroelásticos de energía basados en flutter*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba, 2023.
- Erturk A. y Inman D.J. *Piezoelectric energy harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.
- Katz J. y Plotkin A. *Low-speed aerodynamics*, volumen 13. Cambridge university press, 2001.
- Li D., Wu Y., Da Ronch A., y Xiang J. Energy harvesting by means of flow-induced vibrations on aerospace vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 86:28–62, 2016.
- Oñate E. *Structural analysis with the finite element method. Linear statics: volume 2: beams, plates and shells*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Preidikman S. *Numerical simulations of interactions among aerodynamics, structural dynamics, and control systems*. Tesis de Doctorado, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- 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., Rocca 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.
- Wang J., Geng L., Ding L., Zhu H., y Yurchenko D. The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations. *Applied Energy*, 267:114902, 2020.