

COSECHA DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES AMBIENTALES

Mariano Febbo^a, Francisco Iaconis^a y Santiago Maiz^b

^a*Instituto de Física del Sur y Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur, Avda. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, mfebbo@uns.edu.ar <http://www.uns.edu.ar>*

^b*Instituto de Mecánica Aplicada y Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Avda. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, smaiz@uns.edu.ar <http://www.uns.edu.ar>*

Palabras Clave: cosecha de energía, viga piezoeléctrica, fuentes ambientales.

Resumen. En este trabajo se presentan los resultados experimentales y el modelo analítico de un dispositivo de cosecha de energía a partir de la vibración del ambiente. La cosecha de energía se realiza a partir de un piezocerámico especialmente diseñado como harvester (cosechador) adosado a una viga excitada armónicamente. El diseño del dispositivo se realiza de manera que ambas primeras frecuencias naturales, del harvester y la viga, sean aproximadamente iguales. De esta manera se pretende con ello una alternativa y mejora en la recolección de energía respecto de aquellos dispositivos que adosan al harvester directamente a la fuente de excitación. Respecto del modelo mecánico considerado, la viga se modela como un sistema elástico lineal de un número finito de modos, al igual que el harvester. Se presentan, asimismo, las ecuaciones del circuito eléctrico equivalente que modela la generación de voltaje en el harvester y su acoplamiento con las ecuaciones mecánicas. Los resultados experimentales que se obtienen demuestran que el modelo lineal propuesto, considerando un único modo en el desplazamiento tanto de la viga como del harvester, predice correctamente el voltaje generado por harvester para todo el rango de frecuencias considerado. Respecto de las ventajas de considerar este dispositivo como alternativa frente a otros, puede decirse que la generación de voltaje es considerable para una ancha región de frecuencias que comprende las dos primeras frecuencias naturales del harvester y la viga.

1. INTRODUCCION

La demanda energética creciente junto a la finitud de las fuentes no-renovables de energía, han impulsado en los últimos años a la comunidad científica a enfocarse en el desarrollo y estudio de viabilidad de nuevas fuentes de energía, limpias y renovables. Una de las posibles alternativas de solución a esta problemática son las llamadas técnicas de cosecha de energía [Priya y Inman \(2009\)](#) (Energy Harvesting en inglés). Éstas permiten una recolección de energía residual a partir de fuentes ambientales limpias y libres (luz, vibraciones, gradiente térmico). Entre ellas, el uso de energía mecánica en forma de vibraciones es una opción muy conveniente debido a que no depende del nivel de luz solar [Priya \(2007\)](#), [Anton y Sodano \(2007\)](#).

Los dispositivos piezoeléctricos recolectores de energía producen carga eléctrica debido a la deformación mecánica de su superficie. La forma de captar energía de estos dispositivos es adosándolo a una fuente mecánica que consta comunmente de un sistema oscilante masa-resorte-amortiguador. Entonces, la energía cinética generada por la fuente es convertida en carga eléctrica que es recolectada en forma de corriente eléctrica a través de una resistencia externa. La mayoría de los sistemas de este tipo trabajan en resonancia, lo cual implica que existe un pico en la amplitud de desplazamiento donde el sistema entrega la mayor parte de su energía. Se dice entonces que el sistema de harvesting es resonante a diferencia de los no-resonantes comunemente constituidos por sistemas no-lineales, en donde el sistema trabaja en una región fuera de la resonancia, dominada por otra clase de fenómenos diámicos [Arrieta et al. \(2010\)](#), [Erturk y Inman \(2011\)](#) (ciclos límites de gran amplitud, subresonancias, caos). En cuanto a los antecedentes en el tema, citaremos sólo los más relevantes. En sistemas resonantes lineales, podemos citar el trabajo pionero de Stephen [Stephen \(2006\)](#) donde se analiza la conversión de la energía de vibración de un sistema masa-resorte-amortiguador (lineal) a energía eléctrica a través de un acoplamiento electrodinámico. Una revisión sobre la utilización de materiales piezoeléctricos como sistemas generadores de energía en el régimen resonante, se puede ver en el review de Beeby et. al., [Beeby et al. \(2006\)](#). Recientemente, Lee y colaboradores, [Lee et al. \(2006\)](#) estudiaron un sistema robusto de generación de energía a través de un piezoeléctrico, en donde se diseñó la forma del mismo para maximizar la potencia eléctrica en una banda ancha de frecuencias. Tang y Zuo [Tang y Zuo \(2011\)](#) propusieron mejorar la generación de energía respecto de un sistema de un grado de libertad masa-resorte-amortiguador, utilizando un sistema de dos masas. Una comparación entre distintos sistemas vibratorios generadores de energía se puede ver en Lefeuvre, et. al. [Lefeuvre et al. \(2006\)](#).

La idea fundamental de este trabajo es presentar una alternativa a los sistemas tradicionales de recolección de energía que consisten en situar al recolector directamente sobre la fuente de vibración (maquina vibrante, estructura vibrante, etc.) Esto se realizará utilizando una segunda viga (de acero) sobre la cual se adosará el recolector y que será excitada por la fuente. De esta manera, haciendo coincidir aproximadamente la frecuencia de resonancia del 'harvester' (viga piezoeléctrica) con la de la viga de acero (base) se pretende incrementar la generación de voltaje y ensanchar la región en donde el harvester genera su máximo voltaje en contraste con el que se obtendría de excitar solo el harvester.

El trabajo se divide de la siguiente manera. En una primera sección se presenta el modelo matemático para el sistema recolector consistente en la viga de base, el harvester y el circuito eléctrico que representa el harvester. En una segunda sección se muestran los resultados numéricos que resultan de resolver el modelo, los experimentos realizados y la comparación entre ellos. Como principal variable a testear se elige el voltaje generado en el harvester en función de la frecuencia de excitación. Por último se brindan las conclusiones.

2. MODELO MATEMATICO

El esquema del modelo usado para representar el experimento puede verse en la figura 1.

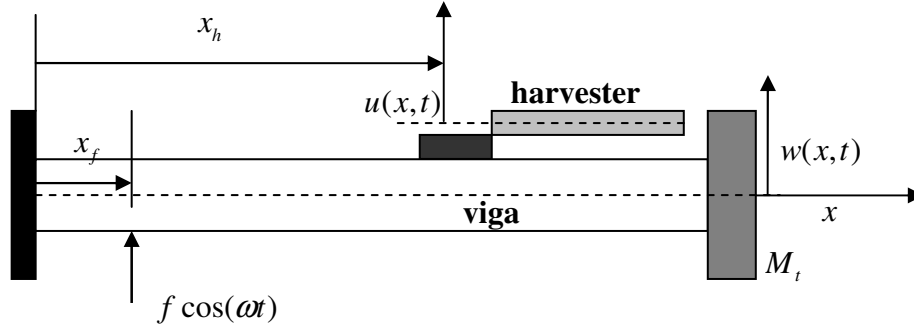


Figura 1: Diagrama esquemático del sistema en estudio.

Este consiste en una viga de acero, en adelante viga, excitada armónicamente con una fuerza $f \cos(\omega t)$ en la posición $x = x_f$ a la cual se le adosa una viga piezoeléctrica en $x = x_h$, en adelante harvester. La viga tiene adosada en la punta una masa M_t .

El modelo que se empleará para el harvester es una viga de dos capas (bimorfa) de material piezoeléctrico PZT-5A fabricado por la empresa Piezo Systems, Inc. (modelo Q220-A4-203YB) conectada en paralelo (parallel connection). Las magnitudes geométricas de interés pueden verse en la figura 2

Las ecuaciones que modelan el sistema son:

- Para la viga:

$$E_b I_b \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho_b A_b \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_b \frac{\partial w}{\partial t} = -M_h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \delta(x - x_h) - M_t \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \delta(x - L_b) + f e^{j\omega t} \delta(x - x_f) \quad (1)$$

donde E_b e I_b son el modulo de Young de la viga y el momento de inercia de la viga respectivamente, ρ_b y A_b la densidad y el area de la sección transversal. Los demás parámetros que aparecen en la ecuación son M_h , masa del harvester, M_t masa adosada en la punta de la viga, c_b la constante de amortiguamiento viscoso de la viga.

- Para el harvester

$$E_h I_h \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m_h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_h \frac{\partial u}{\partial t} + k_v (H(x) - H(x - L_h)) = -m_h \frac{\partial^2 w(x_h, t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

donde, en este caso, E_h e I_h son el modulo de Young del harvester y la sección transversal del harvester respectivamente, m_h la masa por unidad de longitud del harvester y c_h la constante de amortiguamiento viscoso del harvester. $H(x)$ es la función de Heaviside y L_h es la longitud del harvester. La constante k_v representa la constante de acoplamiento piezoeléctrica que viene dada, función de los parámetros del harvester utilizado, por:

$$k_v = \frac{\bar{e}_{31} b}{h_p} \left(\frac{h_s^2}{4} - \left(h_p + \frac{h_s}{2} \right)^2 \right) \quad (3)$$

en la ecuación 3 \bar{e}_{31} es una constante piezoeléctrica que esta dada, en función de la constante piezoeléctrica más comunmente usada d_{31} como $\bar{e}_{31} = d_{31}c_{11}^E$, donde c_{11}^E es el modulo de Young del material piezoeléctrico a campo eléctrico \mathbf{E} constante.

Dado que el harvester esta compuesto por tres capas (ver figura 2), dos de material piezoeléctrico y una capa de bronce (subestructura), el producto de $E_h I_h$ viene dado por Erturk y Inman (2009):

$$E_h I_h = \frac{2b}{3} \left(\frac{Y_s h_s^3}{8} + c_{11}^E \left(\left(h_p + \frac{h_s}{2} \right)^3 - \frac{h_s^3}{8} \right) \right) \quad (4)$$

donde Y_s es el módulo de Young de la subestructura. Por otro lado, m_h está dada por

$$m_h = b(\rho_s h_s + 2\rho_p h_p) \quad (5)$$

donde ρ_s y ρ_p son las densidades de masa de la subestructura y del piezo respectivamente.

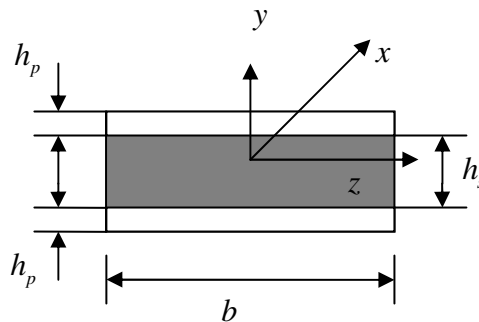


Figura 2: Estructura del recolector piezoeléctrico (harvester).

- Para el circuito eléctrico: El circuito eléctrico que representa el harvester elegido se puede modelar como se ve en la figura 3. Aplicando las leyes de Kirchoff, la ecuación diferencial que da el voltaje $v(t)$ generado en sobre la resistencia de carga R_l es:

$$C_p \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{2R_l} = i_p(t) \quad (6)$$

donde C_p es la capacitancia eléctrica del piezoeléctrico que esta dada por:

$$C_p = \frac{\epsilon_{33}^S b L_h}{h_p} \quad (7)$$

donde ϵ_{33}^S es la permitividad eléctrica del piezoeléctrico a deformación (strain) constante.

2.1. Expresión para el voltaje generado por el harvester

Para resolver las ecuaciones planteadas anteriormente, se proponen soluciones en forma de expansiones en formas modales:

$$w(x, t) = \sum_{r=1}^N \phi_r^b(x) \eta_r(t) \quad (8)$$

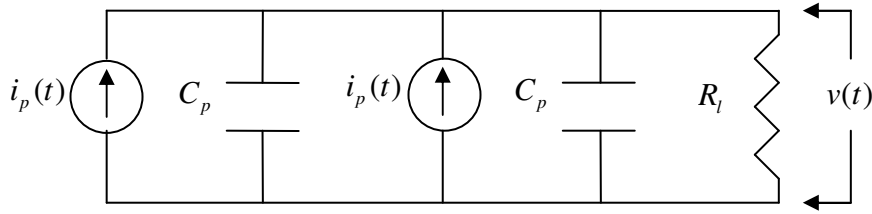


Figura 3: Diagrama del circuito eléctrico.

$$u(x, t) = \sum_{r=1}^N \phi_r^h(x) q_r(t) \tag{9}$$

donde $\phi_r^d(x)$ se refieren a las formas modales de una viga cantilever y vienen dadas por:

$$\phi_r^d(x) = \sqrt{\frac{1}{m_d L_d}} \left(\cosh\left(\frac{\lambda_r x}{L_d}\right) - \cos\left(\frac{\lambda_r x}{L_d}\right) - \sigma_r \left(\sinh\left(\frac{\lambda_r x}{L_d}\right) - \sin\left(\frac{\lambda_r x}{L_d}\right) \right) \right) \tag{10}$$

aquí, el superíndice $d = b$ corresponde a la viga y $d = h$ al harvester y σ_r viene dado por

$$\sigma_r = \frac{\sinh(\lambda_r) - \sin(\lambda_r)}{\cosh(\lambda_r) + \cos(\lambda_r)} \tag{11}$$

Los distintos valores de λ_r se obtienen de resolver la ecuación trascendente: $1 + \cos(\lambda_r) \cosh(\lambda_r) = 0$ correspondientes a los r coeficientes de frecuencia.

Luego de sustituir 8 y 9 en las ecuaciones 1 y 2 respectivamente y aplicando las ecuaciones de ortogonalidad:

$$\int_0^{L_d} \phi_r^d \phi_s^d dx = \frac{\delta_{rs}^d}{m_d}; \int_0^{L_d} \phi_r^d \frac{d^4 \phi_s^d}{dx^4} dx = \frac{\lambda_r^4}{m_d L_d^4} \tag{12}$$

donde nuevamente, el superíndice $d = b$ corresponde a la viga y $d = h$ al harvester. Luego, las ecuaciones para la viga y para el haverster en coordenadas normales vienen dadas por:

$$\ddot{\eta}_r(t) + 2\xi_r^b \omega_r^b \dot{\eta}_r(t) + (\omega_r^b)^2 \eta_r(t) = M_t \phi_r^b(L_b) \sum_{s=1}^N \phi_s^b(L_b) \ddot{\eta}_s(t) + f e^{j\omega t} \phi_r^b(x_f) \tag{13}$$

para la viga, donde $2\xi_r^b \omega_r^b = \frac{c_b}{m_b}$, $\omega_r^b = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{E_b I_b}{m_b L_b^4}}$ y para el harvester

$$\ddot{q}_r(t) + 2\xi_r^h \omega_r^h \dot{q}_r(t) + (\omega_r^h)^2 q_r(t) - \chi_r v(t) = f_r \tag{14}$$

donde $2\xi_r^h \omega_r^h = \frac{c_h}{m_h}$, $\omega_r^h = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{E_h I_h}{m_h L_h^4}}$. Las expresiones para χ_r y para f_r vienen dadas por

$$\chi_r = k_v \frac{d\phi_r^h}{dx} \Big|_{x=L_h} \tag{15}$$

y

$$f_r = -m_h \frac{\partial^2 w(x_h, t)}{\partial t^2} \int_0^{L_h} \phi_r^h(x) dx \tag{16}$$

En la ecuación para el circuito eléctrico, la ecuación para $i_p(t)$ viene dada por:

$$i_p(t) = -\bar{\epsilon}_{31} \left(\frac{h_p + h_s}{2} \right) b \int_0^{L_h} \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx \quad (17)$$

Introduciendo la expresión de $w(x, t)$ de la ecuación 8, $i_p(t)$ resulta

$$i_p(t) = \sum_{r=1}^N \kappa_r q_r(t) \quad (18)$$

donde

$$\kappa_r = -\bar{\epsilon}_{31} \left(\frac{h_p + h_s}{2} \right) b \frac{d\phi_r^h(x)}{dx} \Big|_{x=L_h} \quad (19)$$

Ahora suponemos $\eta(t) = \bar{\eta}e^{j\omega t}$; $q(t) = \bar{q}e^{j\omega t}$ y $v(t) = \bar{v}e^{j\omega t}$ y reemplazamos estas expresiones en 13, 14 y 6. Finalmente, luego de una sencilla manipulación algebraica, las siguientes expresiones para el voltaje \bar{v} y la coordenada normal del desplazamiento del harvester \bar{q} :

$$\bar{v} = \frac{j\omega \sum_{r=1}^N \frac{\kappa_r f_r}{((\omega_r^b)^2 - \omega^2 + 2j\omega\xi_r^h \omega_r^h)}}{\frac{1}{2R_l} + j\omega C_p - j\omega \sum_{r=1}^N \frac{\kappa_r \chi_r}{((\omega_r^b)^2 - \omega^2 + 2j\omega\xi_r^h \omega_r^h)}} \quad (20)$$

En la expresión de f_r debemos calcular $w(x_h, t) = \sum_{r=1}^N \phi_r^b(x_h) \bar{\eta} e^{j\omega t}$ donde $\bar{\eta}$ se obtuvo a partir de resolver la ecuación 13 resultando:

$$\bar{\eta} = (-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} f \phi^b(x_f) \quad (21)$$

con las matrices \mathbf{M} , \mathbf{C} y \mathbf{K} definidas como:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{I} + M_t \phi^b(L_b)(\phi^b(L_b))^T]; \quad \mathbf{C} = \text{diag}[2\xi_r^b \omega_r^b]; \quad \mathbf{K} = \text{diag}[(\omega_r^b)^2] \quad (22)$$

y $\phi^b(x_f) = [\phi_1^b(x_f) \phi_2^b(x_f) \dots \phi_n^b(x_f)]^T$. Finalmente, la expresión para el desplazamiento del harvester queda dado por $u(x, t) = \sum_{r=1}^N \phi_r^h(x) \bar{q} e^{j\omega t}$ donde

$$\bar{q} = f_r - \chi_r \left[\frac{j\omega \sum_{r=1}^N \frac{\kappa_r f_r}{((\omega_r^b)^2 - \omega^2 + 2j\omega\xi_r^h \omega_r^h)}}{\frac{1}{2R_l} + j\omega C_p - j\omega \sum_{r=1}^N \frac{\kappa_r \chi_r}{((\omega_r^b)^2 - \omega^2 + 2j\omega\xi_r^h \omega_r^h)}} \right] \quad (23)$$

3. EXPERIMENTOS Y DISCUSION DE RESULTADOS

En esta sección presentaremos los resultados experimentales y la comparación con los resultados numéricos del modelo analítico. Las curvas que presentaremos serán las mediciones de voltaje en función de la frecuencia junto con las predicciones del modelo analítico derivado en este trabajo.

En la tabla 1 se presentan los valores de los parámetros geométricos y físicos de la viga (de acero) y del harvester de material piezoeléctrico PZT-5A (modelo Q220-A4-203YB Piezo Systems, Inc.) bimorfo en conexión paralelo. Adicionalmente la permitividad del vacío fue tomada como $\epsilon_0 = 8,854 \text{pFm}^{-1}$.

Las imágenes del sistema experimental utilizado pueden verse en la figuras 4 (a,b). La viga de acero es excitada electromagnéticamente con una bobina con núcleo de hierro en el extremo

Tabla 1: Parámetros geométricos y físicos de la viga de base y de la viga piezoeléctrica bimorfa usada para los experimentos

Param. geom.	piezo	subestr. (bronce)	viga (acero)	Param. mat.	piezo	subestr.	viga
Longitud, L (mm)	37	37	75.2	Densidad, ρ (kgm^{-3})	7800	9000	7850
Ancho, b (mm)	6.3	6.3	18.7	Mod. Young, E (GPa)	66	105	200
Espesor, b (mm)	0.26	0.14	3.5	Cte. Piezo, d_{31} (pm V^{-1})	-190	–	–
Masa M_t , (kg)	–	–	0.0334	Permitiv. ϵ_{33}^S (pFm^{-1})	1500 ϵ_0	–	–

libre de la viga. Los valores de voltaje son registrados en un osciloscopio con memoria digital (flash) marca GwInstek GDS-1152A y la excitación periódica (senoidal) de frecuencia variable es generada mediante un generador de funciones RIGOL DG 2041 A (function/arbitrary waveform generator). Para determinar los amortiguamientos modales se registran los valores de desplazamiento tanto de la viga como del harvester a través de un proxímetro marca ProVibtech.

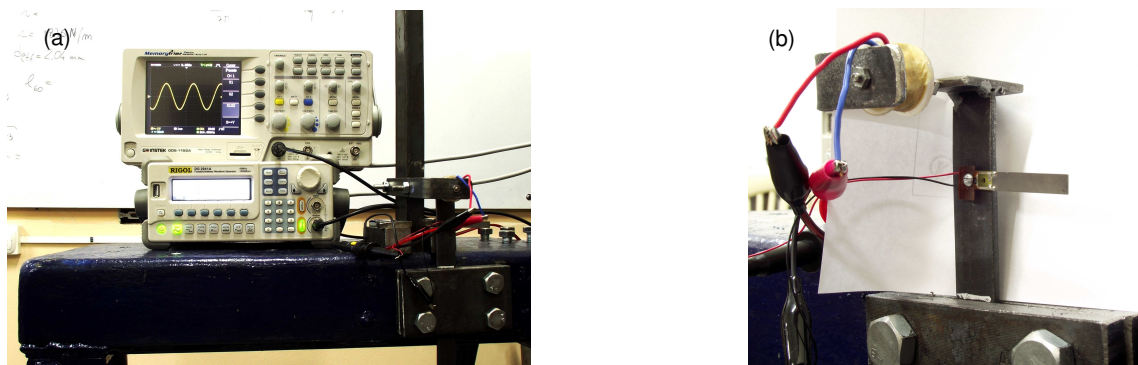


Figura 4: (a) Sistema experimental montado. (b) Imagen detallada de la viga con el harvester adosado.

3.1. Validación de los resultados analíticos

Para la validación de los resultados analíticos usaremos las expresiones de voltaje (20) y desplazamiento (21), considerando un único modo $N = 1$. Dado que se pretende estudiar al sistema en cercanías de resonancia, una medición adecuada del amortiguamiento modal (modal damping) tanto del harvester ξ^h como de la viga ξ^b es de vital importancia. Usualmente, esto se lleva a cabo de una de dos maneras diferentes. La primera es realizando un barrido en frecuencia para cada uno de los sistemas considerados por separado (desacoplados) y ajustando el valor del amortiguamiento de la curva de respuesta en frecuencia (CRF) para cada sistema. Otra manera, que es la que empleamos en este trabajo, consiste en excitar al sistema con un impacto y dejarlo relajar midiendo el amortiguamiento modal a partir de lo que se conoce como decremento logarítmico.

En la figura 5 se puede observar la medición correspondiente a la viga de acero, obtenida con el proxímetro, a la cual se le ha quitado el harvester. A partir de la aplicación de la ecuación del

decremento logarítmico

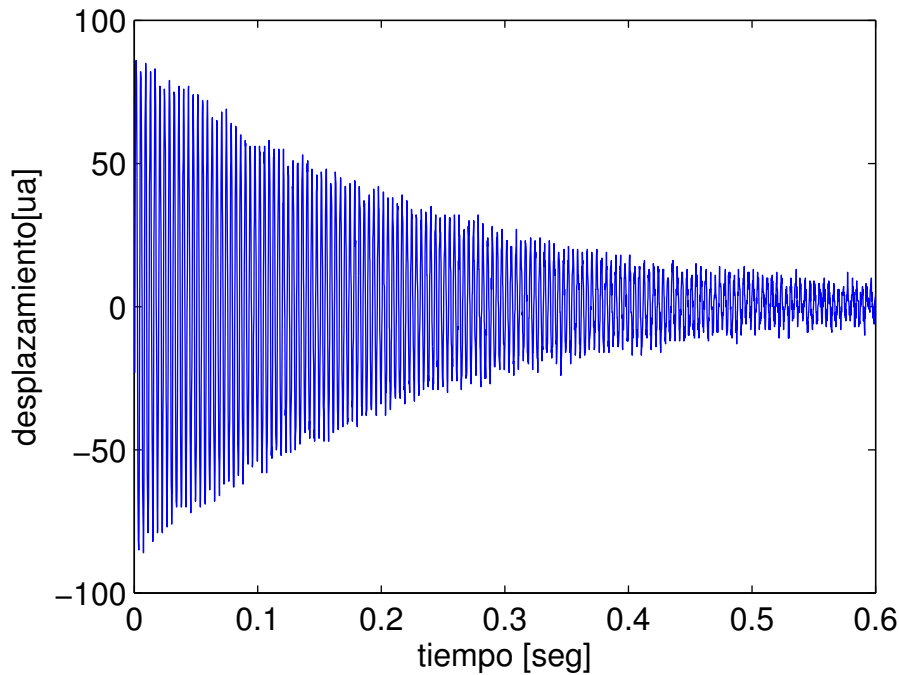


Figura 5: Resultados experimentales del desplazamiento de la viga sin el harvester adosado después de haberle aplicado un impacto

$$\xi^b = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{x(t)}{x(t+T)} \right) \quad (24)$$

donde $x(t)$ es la amplitud a tiempo t y $x(t+T)$ es la amplitud después de un período, es posible obtener un valor de $\xi^b = 0,013 \pm 0,0074$. La obtención de este valor final, es el resultado del promedio de una gran cantidad valores de desplazamiento.

Para medir el amortiguamiento modal del harvester, la técnica es similar aunque el procedimiento es diferente. Esta vez se obtiene el valor de ξ^h ajustando los datos experimentales con los obtenidos numericamente a partir de las ecuaciones 14 y 6 mediante un algoritmo de cuadrados mínimos no lineales. El harvester es excitado con un impacto y el desplazamiento es registrado mediante el proxímometro. Los resultados del ajuste dan un valor de $\xi^h = 0,031 \pm 0,008$ y las graficas de las mediciones del desplazamiento y del ajuste son los que se muestran en la figura 6.

Una vez determinados los valores de los amortiguamientos modales los otros valores a determinar son las primeras frecuencias de resonancia tanto de la viga como del harvester. En este caso, las frecuencias naturales que resultan de los valores de la tabla 1 dan: $f_1^h = 223,1\text{Hz}$ para el harvester y $f_1^b = 322,5\text{Hz}$ para la viga. Como veremos posteriormente, estos valores difieren respecto de los valores de resonancia que se observan en la curva obtenida experimentalmente para el voltaje. La explicación de esta discrepancia radica en el hecho de que los empotramientos a los se ve sometido el sistema, perfectos en cuanto al modelado, no lo son tal en el experimento. Así para una longitud de la viga de $L = 75,2\text{mm}$ se obtiene $f_1^b = 322,5\text{Hz}$.

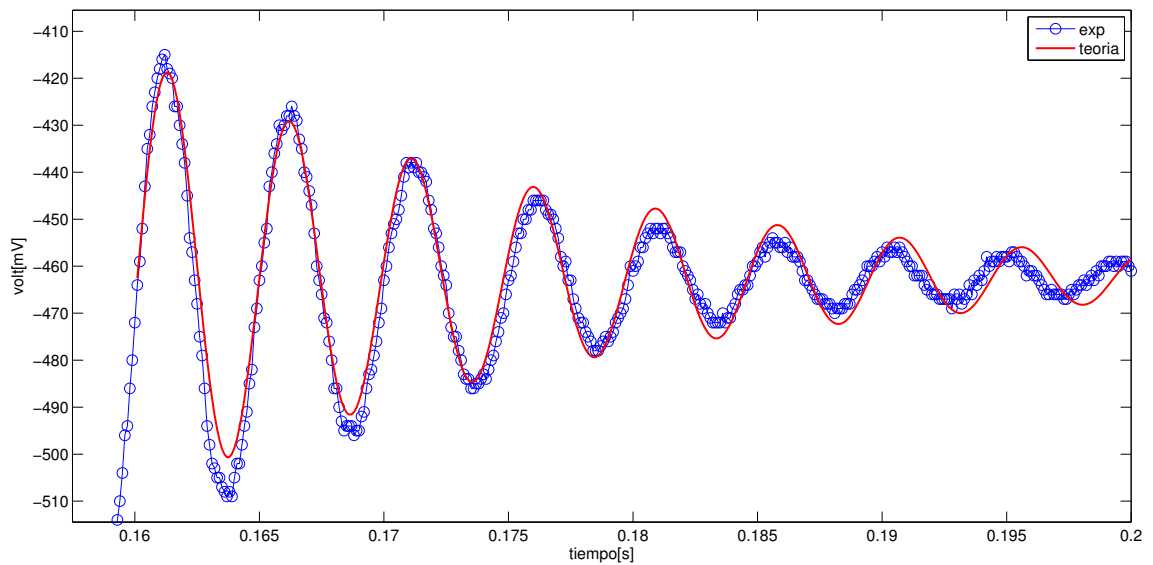


Figura 6: Medición (círculos) y ajuste (línea) de la amplitud de desplazamiento del harvester después de una excitación de impacto

Tan solo bastaría un empotramiento imperfecto que de una longitud efectiva de $L = 86,2\text{mm}$ para explicar la discrepancia observada en el caso de la viga, que representa una diferencia por debajo de un 12 % y aun menor en el caso del harvester, en donde la diferencia es de $\sim 2\%$. De esta manera, se tomaron como valores experimentales de las frecuencias naturales del harvester y de la viga los picos de resonancia en la curva de voltaje vs. frecuencia (fig. 7).

Finalmente, en la figura 7 se presenta la curva de voltaje generado por el harvester en función de la frecuencia de excitación. Los valores experimentales del voltaje están representados con círculos+línea sólida (azul on-line) y los obtenidos mediante la resolución numérica del modelo analítico con línea sólida (rojo on-line). En el modelo, se han introducido los valores de frecuencia naturales de la viga y del harvester de la forma mencionada anteriormente y como valores de amortiguamiento modal $\xi^h = 0,039$ y $\xi^b = 0,012$ ambos muy cerca de los obtenidos experimentalmente y que están contenidos dentro del error experimental de las respectivas mediciones. Como se puede observar, el acuerdo es excelente para todo el rango de frecuencias considerado, convalidando el modelo analítico propuesto.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan las ecuaciones y los resultados experimentales que se obtienen al ensayar una viga elástica de acero a la cual se le adosa una viga piezoeléctrica (harvester) de fabricación comercial, con el fin de generar energía eléctrica. Respecto del modelo mecánico considerado, la viga se modela como un sistema elástico lineal de un número finito de modos, al igual que el harvester. Asimismo, se presentan las ecuaciones del circuito eléctrico equivalente que modela la generación de voltaje en el harvester y su acoplamiento con las ecuaciones mecánicas. Los experimentos efectuados demuestran que el modelo lineal propuesto, considerando un único modo en el desplazamiento tanto de la viga como del harvester, predice correctamente el voltaje generado por harvester para todo el rango de frecuencias considerado.

La propuesta de considerar a una viga como sistema de base sobre el cual se adosa el har-

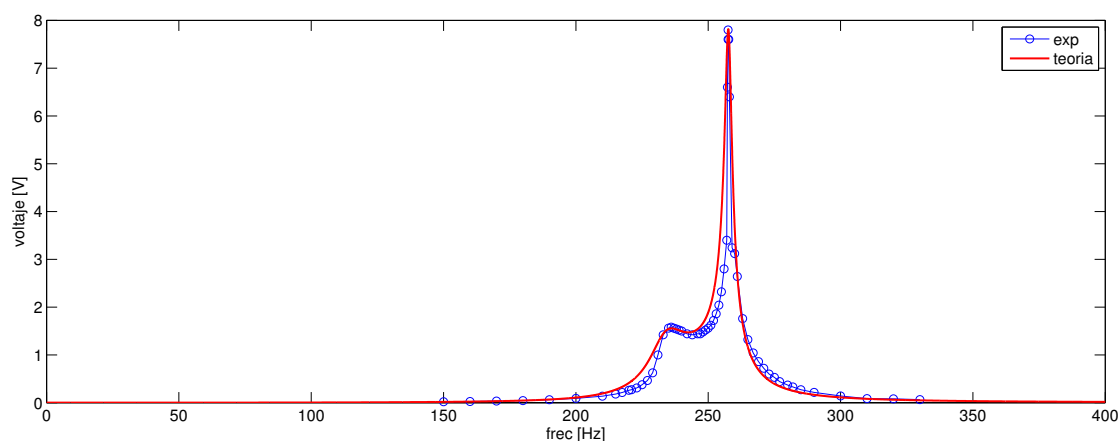


Figura 7: Mediciones (círculos) y resultados numéricos del modelo analítico presentado (línea) del voltaje generado por el harvester en función de la frecuencia.

vester consiste en presentar una alternativa a los sistemas tradicionales de recolección de energía que sitúan al recolector directamente sobre la fuente de vibración. Con el fin de obtener una posible ventaja frente a la alternativa más común, el diseño del dispositivo se realiza de manera que ambas primeras frecuencias naturales, del harvester y la viga, sean aproximadamente iguales. De esta manera, la hipótesis planteada es la de mejorar la recolección de energía maximizando la generación de voltaje para la frecuencia de resonancia del harvester y ensanchado el ancho de la región de máxima generación. A partir de los experimentos realizados es posible confirmar esta hipótesis y presentar este sistema como alternativa ventajosa en la generación de energía eléctrica utilizando vigas piezoeléctricas.

AGRADECIMIENTOS

M. Febbo desea agradecer el apoyo económico del CONICET, de la Agencia Nacional de Promoción Científica (ANPCyT) (proyecto PICT 2008 N^00423) y de la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de Universidad Nacional del Sur por el departamento de Física (PGI 24/F050). S. Maiz a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de Universidad Nacional del Sur por el Departamento de Ingeniería. Los autores agradecen la colaboración en el ensayo experimental de Gabriel Leguizamón Técnico del Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la UNS y del Ing. Javier A. Yagüe.

REFERENCIAS

- Anton S.R. y Sodano H.A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). *Smart Mater. Struct.*, 16:R1–R21, 2007.
- Arrieta A.F., Hagedorn P., Erturk A., y Inman D.J. A piezoelectric bistable plate for nonlinear broadband energy harvesting. *Applied Physics Letters*, 97:104102, 2010.
- Beeby S.P., J. T.M., y White N.M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Meas. Sci. Technol.*, 17:R175–R195, 2006.
- Erturk A. y Inman D.J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Mater. Struct.*, 18:025009, 2009.
- Erturk A. y Inman D.J. Broadband piezoelectric powergeneration on high-energy orbits of the

- bistable duffing oscillator with electromechanical coupling. *Journal of Sound and Vibration*, 330:2339–2353, 2011.
- Lee S., Youn B.D., y Jung B.C. Robust segment-type energy harvester and its application to a wireless sensor. *Smart Mater. Struct.*, 293:409–425, 2006.
- Lefeuvre E., Badel A., Richard C., Petit L., y Guyomar D. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sensors and Actuators A*, 126:495–416, 2006.
- Priya S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. *Journal of Electroceramics*, 19:165–182, 2007.
- Priya S. y Inman D.J.e. *Energy Harvesting Technologies*. Springer, NY. USA, 2009.
- Stephen N.G. On energy harvesting vibration from ambient vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 293:409–425, 2006.
- Tang X. y Zuo L. Enhanced vibration energy harvesting using dual-mass systems. *Journal of Sound and Vibration*, 330:5199–5209, 2011.