

ESTUDIOS PARAMÉTRICOS DE UN RECOLECTOR DE ENERGÍA QUE UTILIZA PIEZOELÉCTRICOS DE GEOMETRÍA CIRCULAR

PARAMETRIC STUDIES OF AN ENERGY HARVESTER USING CIRCULAR GEOMETRY PIEZOELECTRICS

Carlos Vera^a, Mariano Febbo^b, Sebastián Machado^a

^aGrupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP), Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca, 11 de Abril 461, B8000, gimap@frbb.utn.edu.ar, <https://www.frbb.utn.edu.ar/>

^bInstituto de Física del Sur (IFISUR), Universidad Nacional del Sur (UNS), CONICET, Av. Alem 1253 B8000 Bahía Blanca, Argentina, ifisur@uns.edu.ar, <http://www.ifisur-conicet.gob.ar/>

Palabras clave: Recolección de energía, piezoelectricidad, vibraciones.

Resumen. En el presente trabajo se exponen resultados experimentales y numéricos que se obtienen sobre un recolector de energía que utiliza piezoeléctricos de geometría circular, conocidos comercialmente como “*buzzer*”. Estos dispositivos permiten una amplia versatilidad para operar ante diferentes fenómenos que son de interés para el campo de la ingeniería. En particular, se incluye a la configuración circular del *buzzer* una masa de oscilación, y se estudia la influencia de su geometría sobre la potencia generada por el dispositivo recolector. Es de destacar que se vincula al *buzzer* mediante empotramiento desde 2 mordazas enfrentadas en paralelo y a una distancia determinada. Esta vinculación permite que gran parte de su circunferencia quede libre de movimiento, lo que genera modos flexionales de vibración no convencionales, no estudiados ni presentes en la literatura. Modelos de simulación por elementos finitos a través de COMSOL se utilizan para el cálculo de la dinámica del recolector, en particular para modos flexionales y generación de voltaje bajo excitación armónica. La verificación se realiza mediante ensayos experimentales con énfasis en frecuencias cercanas a los 150 Hz, valor determinado experimentalmente en pruebas en maquinarias agrícolas de gran porte.

Keywords: Energy harvesting, piezoelectricity, vibration.

Abstract. In this work, experimental and numerical results obtained on an energy harvester that uses circular geometry piezoelectrics, commercially known as “*buzzer*”, are presented. These devices allow a wide versatility to be used for different phenomena that are of interest to the field of engineering. An oscillation mass is included in the circular configuration of the *buzzer*, and the influence of its geometry on the power generated by the harvester is studied. It is noteworthy that the *buzzer* is linked to the structure by embedding from 2 clamps facing each other in parallel and at a certain distance. This connection allows a large part of its circumference to remain free of movement, which generates non-conventional flexural modes of vibration, neither studied nor present in the literature. Finite element simulation models through COMSOL are used to calculate the dynamics of the harvester, for bending modes and for voltage generation under harmonic excitation. The verification is carried out through experimental tests with emphasis on frequencies close to 150 Hz, a value determined experimentally in tests on large agricultural machinery.

1 INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica desde fuentes vibratorias a través del fenómeno piezoeléctrico es un tema que ha cobrado un alto interés en las últimas décadas (Sodano, H. et al. 2004; Anton S. R. and Sodano H. A., 2007), dado que esta energía puede utilizarse como fuente de alimentación para sensores industriales autónomos en el monitoreo de distintas variables de importancia en el campo de la ingeniería. Así, son conocidas las estaciones de sensado para el monitoreo de estructuras de gran envergadura y costoso mantenimiento, como lo son los aerogeneradores (Ramírez, J.M. et al. 2017; Ramírez, J.M. et al. 2018) y puentes (Ali S. F. et al. 2011) entre otros tipos. Un dispositivo de sensado energizado desde una fuente vibratoria presenta la particularidad de ser totalmente autónomo en relación con su alimentación, lo que reduce considerablemente su costo de manutención.

Entre las configuraciones geométricas para recolectores de energía, son ampliamente conocidos los estudios realizados sobre recolectores que tienen como elemento generador de electricidad estructuras del tipo viga, siendo los más destacados los que utilizan vigas en voladizo (cantilever) (Stephen N. G., 2006; Erturk, A., and Inman, D. J., 2008). Sin embargo, en los últimos años se ha incrementado el estudio de recolectores que utilizan piezoeléctricos de geometría circular, conocidos como “*buzzer*”, que son construidos con un material PZT sobre un sustrato metálico de latón, teniendo ambas estructuras la forma de discos (Xu-wei Chen et al. 2012; Palosaari J. et al. 2014; Yangyiwei Yang et al. 2017; Yangyiwei Yang et al. 2018). En general los estudios existentes que utilizan este tipo de material consideran como condición de vínculo una restricción a lo largo de toda la circunferencia. De esta manera los modos de vibración correspondientes a esta condición son los clásicos modos normales de vibración de placas circulares. Además, también es muy común en estos dispositivos, la utilización de una masa de oscilación en el centro del *buzzer* para lograr la sintonización a la frecuencia deseada.

En el presente artículo se analiza la posibilidad de evitar una restricción completa de toda la circunferencia del *buzzer* con el fin de flexibilizar el dispositivo recolector y disminuir así el tamaño de la masa de oscilación. Por lo tanto, la propuesta consiste en restringir el movimiento de éste solo en dos partes de la circunferencia del borde del sustrato de latón, enfrentadas entre sí, lo que permite modificar el modo de vibración del dispositivo. La condición particular de empotramiento para el recolector juega un importante papel en la sintonización del prototipo, y en particular, se destaca que el modo principal de vibración ya no responde a la solución ampliamente conocida en la literatura para los modos de placas de geometría circular (Timoshenko S. P. and Woinowsky-Krieger S., 1959; Reddy J. N., 2006).

Son por ello objetivos del presente trabajo determinar la influencia de la condición de borde y de la geometría de la masa, sobre la generación de voltaje en un dispositivo de generación de energía de configuración circular. La masa de oscilación juega un rol importante en este tipo de dispositivos, porque influye en la respuesta dinámica en la condición resonante. Se pretende reducir el peso de ésta tanto como sea posible, para disminuir así el tamaño del recolector. Los diferentes casos estudiados se realizan para un caso particular de resonancia a frecuencias próximas a los 150 Hz. Es importante mencionar que el interés en utilizar este tipo de materiales está relacionado con el costo del *buzzer*, ya que presenta valores de mercado mucho más económicos que los recolectores que utilizan vigas para idénticos niveles de generación. Por su parte, otra de las ventajas está relacionada con el tamaño del dispositivo, ya que un recolector de configuración circular es en tamaño mucho menor que cualquier otro dispositivo generador fabricado con elementos tipo viga, para la misma frecuencia.

La motivación de este dispositivo de geometría circular está sustentada en el diseño de un recolector de energía para alimentar una estación de sensado autónomo en maquinarias agrícolas. La estación de sensado se propone montar en máquinas cosechadoras para monitorear

posibles escenarios de ignición de desechos de la cosecha (cáscaras de semillas separadas del grano, restos de tallos y hojarasca, etc.) que son fuente de incendio en épocas de trabajo. Todas las pruebas se realizan a la frecuencia de resonancia relevada previamente para una parte de la máquina cosechadora, 150 Hz.

2 MODELO DE RECOLECTOR

En la Fig. 1, se muestra el esquema del prototipo propuesto que consta de un *buzzer*, compuesto por un disco PZT de cerámica sobre un sustrato de latón montado sobre una estructura que lo sujeta formada por dos paralelepípedos metálicos que hacen las veces de mordazas del sustrato.

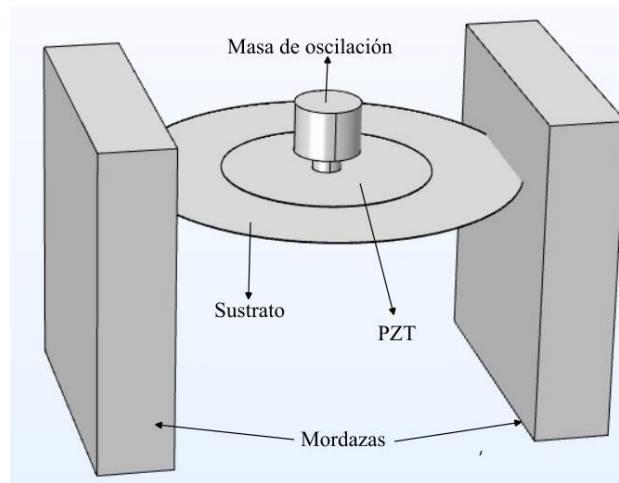


Figura 1: Esquema del recolector y estructura.

Sobre el disco PZT se coloca una masa cilíndrica de acero, llamada masa de oscilación M , con la intención de sintonizar el modo de vibración a la frecuencia de resonancia, 150 Hz, y también para incrementar la deformación del piezoeléctrico y así aumentar la generación de energía (Erturk A. and Inman D. J., 2009; Liping T. and Jianguo W., 2017).

En la Fig. 2 se detallan las dimensiones en corte transversal del *buzzer*, de la masa de oscilación M y del cilindro de contacto entre esta y el PZT. Los parámetros geométricos del dispositivo son el diámetro y el espesor del sustrato de latón (d_s, h_s), diámetro y espesor del PZT (d_b, h_b), diámetro (d_m) y altura (h_m) de la masa de oscilación. Con el objetivo de analizar la generación de energía del recolector a partir de variaciones en su geometría, se estudia la influencia que tiene en la generación la superficie de contacto entre la masa de oscilación y el PZT. Para ello se modifica el área de apoyo de ésta sobre el PZT, situación que se materializa montando la masa de oscilación M sobre cilindros de menor diámetro (d_{mc}) y de altura constante (h_{mc}), siendo el diámetro de este cilindro el que define el área de contacto de la masa sobre el cerámico.

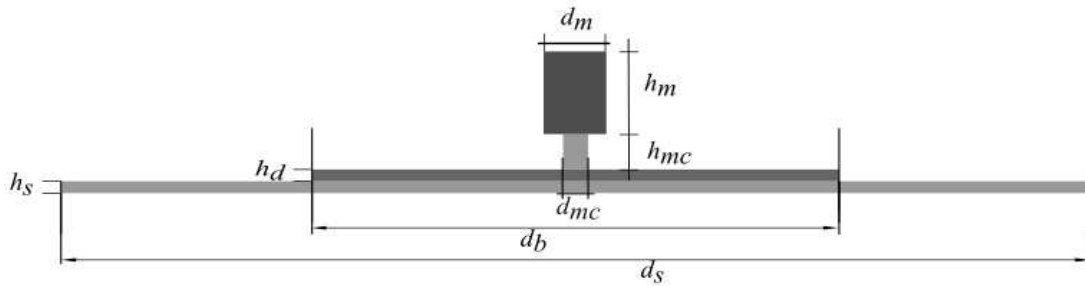


Figura 2: Dimensiones del buzzer y de la masa de oscilación M.

3 DISEÑO DEL RECOLECTOR

El modelo del recolector responde en su formulación a las clásicas ecuaciones constitutivas que relacionan las propiedades mecánicas y eléctricas en materiales piezoeléctricos (Erturk e Inman 2011). Estas quedan determinadas asumiendo como variables mecánicas a \mathbf{T} (tensor de tensión mecánica), \mathbf{S} (tensor de deformación mecánica), y como variables eléctricas a \mathbf{D} (vector de deformación eléctrica) y \mathbf{E} (vector campo eléctrico).

Tomando a (\mathbf{T}, \mathbf{E}) como variables independientes, las ecuaciones constitutivas quedan definidas por (Meitzler A. et al. 1988).

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{D} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{s} & \mathbf{d}^t \\ \mathbf{d} & \boldsymbol{\varepsilon} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{E} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

en la que \mathbf{s} es la matriz de flexibilidad, \mathbf{d} es la matriz de acoplamiento electromecánico y $\boldsymbol{\varepsilon}$ es la matriz de permitividad eléctrica relativa. El material piezoeléctrico utilizado en el buzzer es un PZT – 5H. Dado que los estudios numéricos se realizan con el software COMSOL Multiphysics® software (Version 5.5, COMSOL, Burlington, MA, USA), se calculan las matrices \mathbf{c} = matriz (o tensor) elástico y \mathbf{e} = matriz (o tensor) de acoplamiento electromecánico según las siguientes definiciones

$$\mathbf{c} = \mathbf{s}^{-1} \quad (2)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} \cdot \mathbf{s}^{-1} \quad (3)$$

El valor de cada elemento de estas matrices corresponde a los valores indicados en la literatura para el PZT 5H (Yang et. al. 2018), quedando constituidas como sigue

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} 1680 & 0 & 0 \\ 0 & 1680 & 0 \\ 0 & 0 & 1402 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ m \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 8.23 \cdot 10^{10} & 3.60 \cdot 10^{10} & 3.29 \cdot 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 3.60 \cdot 10^{10} & 8.23 \cdot 10^{10} & 3.29 \cdot 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 3.29 \cdot 10^{10} & 3.29 \cdot 10^{10} & 7.10 \cdot 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.48 \cdot 10^{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.48 \cdot 10^{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.32 \cdot 10^{10} \end{bmatrix} [Pa] \quad (5)$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 3.08 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.08 & 0 & 0 \\ -1.85 & -1.85 & 7.855 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left[\frac{C}{m^2} \right] \quad (6)$$

Las dimensiones del *buzzer* se indican en la Tabla 1

Módulo de Young (Acero)	210 GPa
Densidad (Acero)	7850 kg/m ³
Diámetro sustrato (d_s)	41 mm
Espesor sustrato (h_s)	0.1 mm
Diámetro del cerámico PZT (d_b)	22 mm
Espesor del cerámico PZT (h_b)	0.1 mm

Tabla 1. Valores mecánicos y estructurales del *buzzer*.

La condición de vínculo adoptada y descripta anteriormente para el prototipo se observa en la Fig.1, quedando determinada una distancia entre mordazas de 35.80mm.

La selección de la masa de oscilación es realizada de tal forma de sintonizar el dispositivo recolector en la frecuencia de interés de 150 Hz. Este procedimiento se ejecuta mediante el análisis de frecuencias naturales de COMSOL. Se definen 3 casos de estudio con el fin de analizar la influencia de la geometría de la masa sobre la respuesta dinámica del recolector de energía. En la Tabla 2 se presentan las dimensiones y la masa de los 3 casos analizados.

Caso de estudio	Dimensiones de la masa		Masa
a)	d_m	7mm	2.33 gr
	h_m	7.7 mm	
	d_{mc}	0	
	h_{mc}	0	
b)	d_m	7 mm	1.77 gr
	h_m	5.5 mm	
	d_{mc}	5 mm	
	h_{mc}	2 mm	
c)	d_m	7mm	1.71 gr
	h_m	5.3 mm	
	d_{mc}	3 mm	
	h_{mc}	2 mm	

Tabla 2. Dimensiones de M para cada caso de estudio

El caso a) corresponde a una masa cilíndrica de diámetro constante (d_{mc} y $h_{mc}=0$); mientras que en los casos b) y c) se disminuye el área de contacto entre la masa de oscilación y el *buzzer*. En estos últimos 2 casos se define el diámetro d_{mc} y se ajusta la altura h_m de forma de sintonizar en forma aproximada el dispositivo a una frecuencia de 150 Hz. De esta manera, se observa la disminución de la masa a medida que disminuye el área de contacto entre la ésta y el *buzzer*. Este comportamiento es acorde al objetivo de diseñar un recolector de energía contemplando la menor masa involucrada posible. A modo de ejemplo, en la Fig. 4 se muestra el modo de vibración del dispositivo recolector correspondiente al caso a). Allí se observa al modo flexional del *buzzer* en la condición biempotrado en parte de su circunferencia.

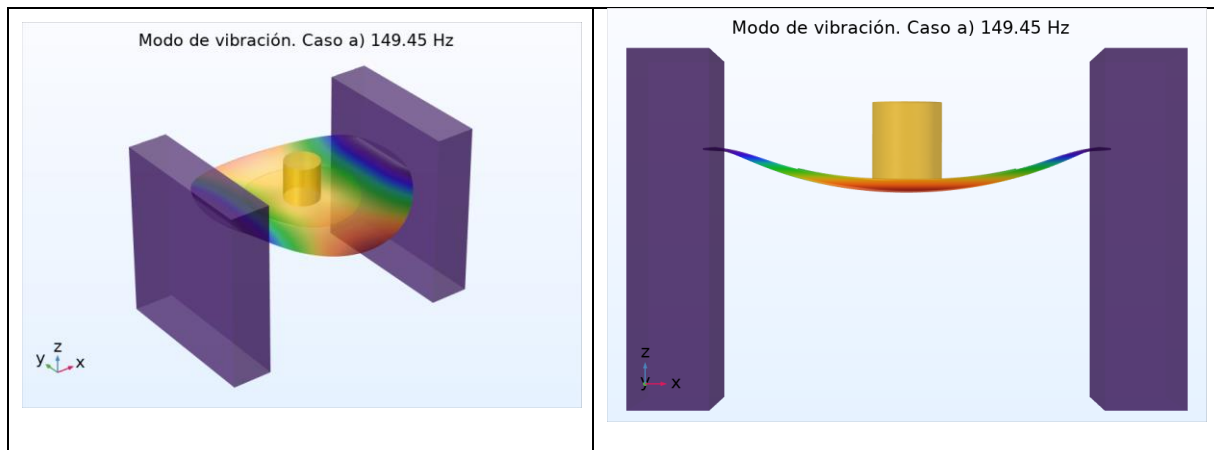


Figura 4: Modo principal y condición de empotramiento en las mordazas.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados numéricos con COMSOL Multiphysics®

Tal lo descrito en la sección anterior la geometría de la masa oscilante juega un rol importante en la respuesta dinámica del recolector. La influencia de la superficie de contacto entre la masa M y el *buzzer*, sobre la generación de energía eléctrica, es estudiada para los 3 casos definidos como a), b) y c) en la sección 3. Para la determinación del voltaje generado se realiza un análisis de respuesta en frecuencia utilizando el programa COMSOL Multiphysics® en el ancho de banda 130 Hz a 170 Hz, sometiendo al dispositivo a una amplitud de excitación de la base de 1G. La carga eléctrica conectada al *buzzer* es de 10 Kohm. Este valor es seleccionado acorde al valor de impedancia característica de una unidad de sensado y transmisión de datos inalámbricos. En las Figs. 5, 6 y 7 se muestra el voltaje generado en función de la frecuencia, para los casos a), b) y c), respectivamente.

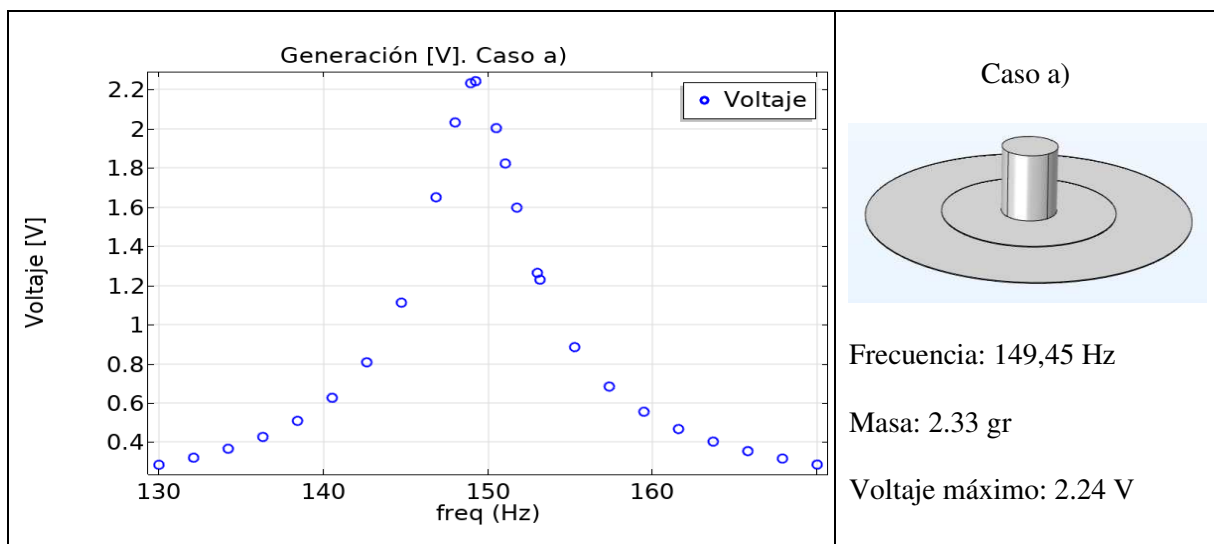


Figura 5. Voltaje generado para el caso de estudio a).

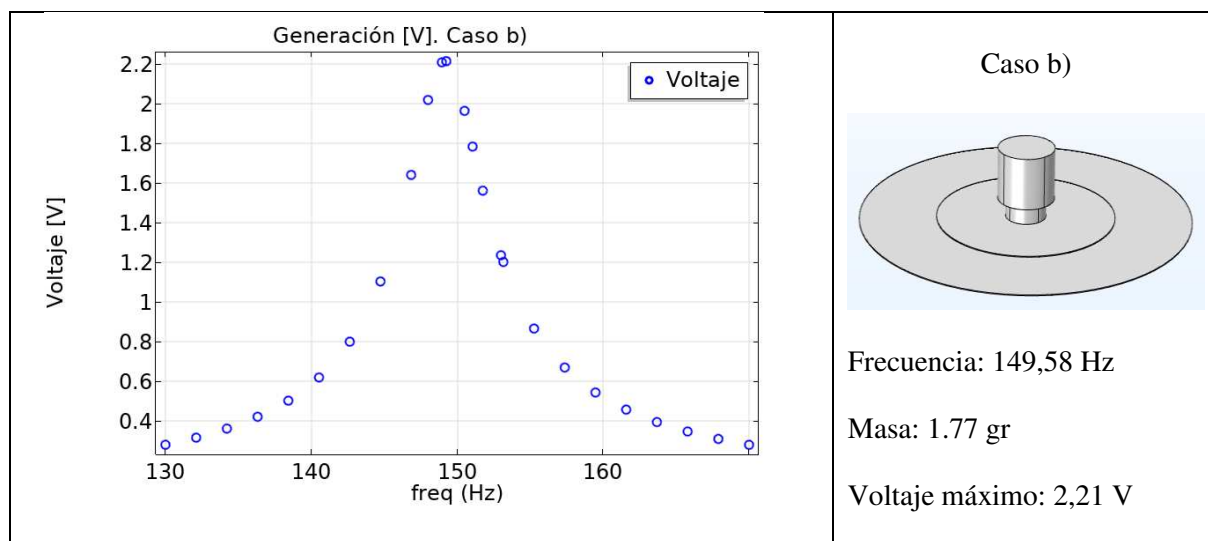


Figura 6. Voltaje generado para el caso de estudio b).

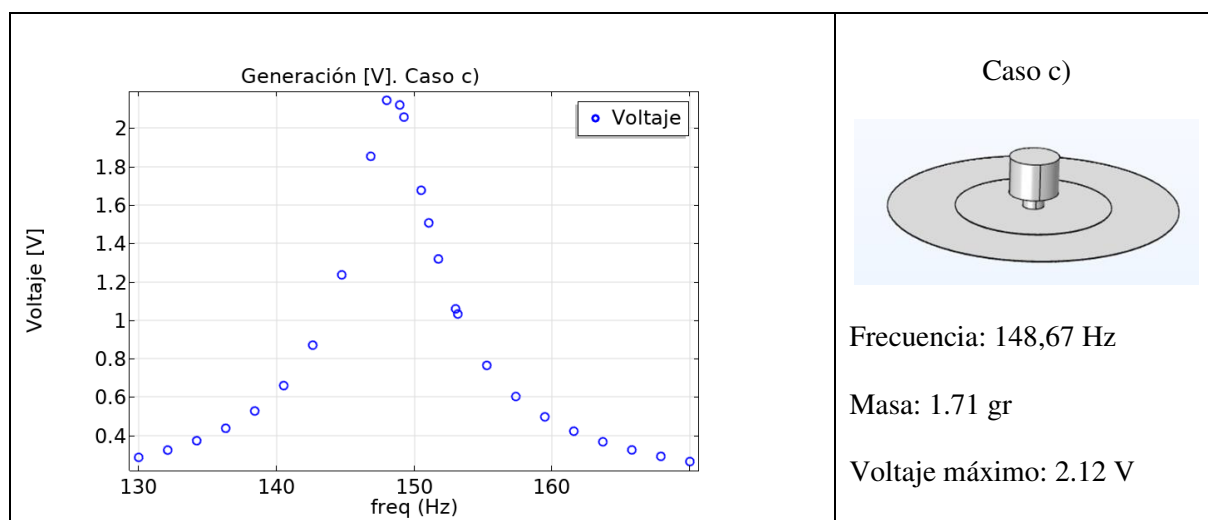


Figura 7. Voltaje generado para el caso de estudio c).

Como puede observarse de las Figs. 5, 6 y 7, en todos los casos de estudio se obtiene una generación de energía por encima de 2 V. Se observa que para el caso a) sin reducción de la superficie de contacto entre el *buzzer* y la masa, la generación es de 2.24 V, la frecuencia de resonancia de 149,45 Hz y el peso de la masa de 2.33 g. En el caso b) se reduce el diámetro de contacto entre la masa y el *buzzer* en 2 mm, ésta disminuye a 1.77 g, y la generación es de 2.21 V para una frecuencia de resonancia a 149,58 Hz. Por último, en el caso c) con una reducción de diámetro de contacto de 4 mm la masa disminuye a 1.71 g y la generación es de 2.12 V para una frecuencia resonante de 148,67 Hz. Se destaca que los valores de generación son similares para los tres casos analizados, con la particularidad que el caso c) presenta la menor superficie de contacto y la menor masa de oscilación. Por lo tanto, el análisis demuestra que a partir de un diseño adecuado de la geometría de la masa de oscilación (superficie de contacto) es posible reducir el peso de esta manteniendo los niveles de generación, lo que es importante dado que este comportamiento permite generadores de menor tamaño.

4.2 Resultados experimentales

Los experimentos consisten en excitar el *buzzer* mediante una aceleración en su base. La señal de entrada se inyecta mediante un generador arbitrario de ondas Rigol DG4062 y posteriormente es amplificada para luego ingresar a un shaker Labworks ET-132. La respuesta es medida por un acelerómetro PCB Piezotronics con una sensibilidad de 98.7 mV/g. La señal de salida es adquirida por una placa National Instruments NI 9234 y postprocesada mediante un código generado en Matlab. La configuración del ensayo se puede observar en la Figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**8a) y el detalle del dispositivo en la Fig. 8b).

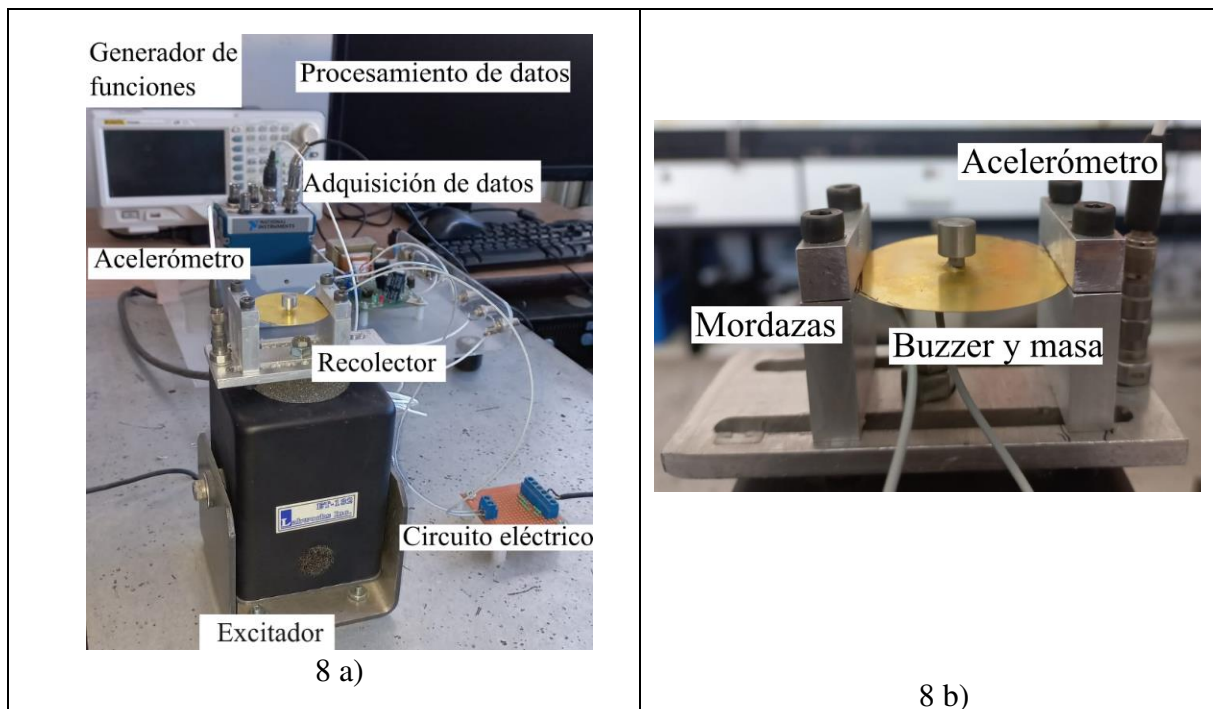


Figura 8. a) Esquema del ensayo de laboratorio. b) Detalle del dispositivo testado.

El procedimiento experimental se realiza mediante el registro de voltaje para diferentes valores de frecuencia de excitación entre 136 Hz y 157 Hz, de tal forma de registrar la generación en el estado de resonancia (modo flexional cercano a los 150 Hz). El prototipo ensayado corresponde al caso c), Fig. 8 b), que presenta la menor masa de oscilación. La aceleración de excitación es de 1 G y la resistencia de carga del circuito eléctrico de 10k Ω .

En la Fig. 9 se muestran los resultados de voltaje en función de la frecuencia de excitación obtenidos de manera experimental, y se comparan con los resultados obtenidos mediante la simulación de COMSOL para el caso c) (ver Fig.7). Se puede apreciar una buena concordancia entre los valores simulados y los experimentales, tanto en resonancia como fuera de ella.

En particular, la prueba realizada con la masa de menor tamaño y menor superficie de contacto indica que el modelo es suficiente para poder desarrollar este tipo de dispositivos, tomando en cuenta que la generación de energía es similar en los 3 casos propuestos.

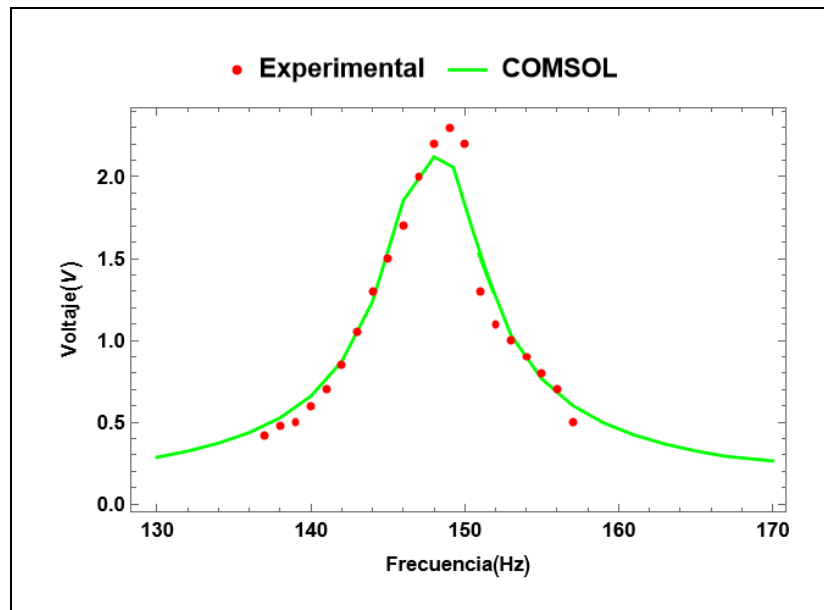


Figura 9. Respuesta en frecuencia experimental y simulada mediante COMSOL para el caso c) de la Fig. 7.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron estudios numéricos y experimentales de un dispositivo recolector de energía que utiliza un piezoeléctrico de geometría circular conocido comercialmente como “*buzzer*”, al que se le agregó una masa de oscilación para mejorar la generación. El *buzzer* se sujeta sobre una estructura a través de 2 mordazas que permiten su empotramiento en porciones de su circunferencia, dejando gran parte del *buzzer* libre de vinculación. La frecuencia de excitación y diseño del dispositivo fue de 150 Hz, valor que se determina de mediciones experimentales en campo sobre una máquina cosechadora comercial.

Los estudios paramétricos se realizaron para analizar la generación de energía eléctrica para 3 valores diferentes de la superficie de contacto entre una masa de oscilación y el PZT. La incorporación de la masa fue determinante para sintonizar el *buzzer* a la frecuencia de resonancia, considerando la rigidez que el empotramiento de cada mordaza le impone al dispositivo.

Se tomaron mediciones de generación eléctrica de manera experimental y también simulaciones numéricas por el método de elementos finitos bajo la plataforma COMSOL Multiphysics, con el objetivo de contrastar ambos resultados. En todos los casos de estudio la excitación armónica fue de 1 G, con una resistencia de 10 Kohm.

Se destaca también que el modo fundamental de vibración del *buzzer* cuando llega a la frecuencia de resonancia no responde a los modos clásicos de vibración de membranas circulares totalmente empotradas, sino más bien a modos locales que tienen que ver con la forma de sujeción del *buzzer* con las mordazas. Esta condición que bien se puede asemejar a una condición de borde biempotrada para el caso de una viga, permite intuir que otras configuraciones de vinculación pueden ser utilizadas para el *buzzer*, más allá de las clásicas condiciones de empotramiento que se estudian para membranas circulares.

Otra mención para destacar es que el voltaje generado en los 3 casos experimentados fue similar y siempre mayor a 2 V, incluso para el caso con el menor valor de la masa.

A futuro, se pretende desarrollar un modelo analítico del prototipo y validar éste con los resultados experimentales y numéricos aquí obtenidos. Este modelo permitirá optimizar otros parámetros como el espesor del PZT, la distancia entre las mordazas y el valor de la masa de oscilación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Facultad Regional Bahía Blanca - Universidad Tecnológica Nacional; a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur y a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires.

REFERENCIAS

- Ali S. F., Friswell M. I. and Adhikari S. Analysis of energy harvesters for highway bridges. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(16):1929–1938, 2011.
- Anton S. R. and Sodano H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). *Smart Materials Structure*. 16:R1-R21, 2007
- Chen X. -R., Yang T. -Q., Wang W. and Yao X. Vibration energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm. *Ceramics International* 38S. S271–S274, 2012.
- Erturk A. and Inman D. J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Materials and Structures*, 18(2), 2009.
- Erturk A. and Inman D. J. Piezoelectric Energy Harvesting. Wiley, Chichester, United Kingdom, 2011.
- Erturk A. and Inman D. J. On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters. *Journal of Intelligent Materials. Syst. Struct. In press*, doi: 10.1177/1045389X07085639, 2008.
- Meitzler A., Tiersten H. F., Warner A. W., Berlincourt D., Couqin G. A. and Welsh F. S. *IEEE standard on piezoelectricity IEEE STD.1988.79638*, 1988.
- Palosaari J., Leinonen M., Juuti J., Hannu J. and Jantunen H. Piezoelectric circular diaphragm with mechanically induced pre-stress for energy harvesting. *Smart Materials Structure*, 23, 085025, 2014.
- Ramírez J.M., Gatti C.D., Machado S.P. and Febbo M. An experimentally validated finite element formulation for modeling 3D rotational energy harvesters. *Engineering Structures*, 153:136-145, 2017.
- Ramírez J.M., Gatti C.D., Machado S.P. and Febbo M. A multi-modal energy harvesting device for low-frequency vibrations. *Extreme Mechanics Letters*, 22:1-7, 2018.
- Reddy J. N. Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells. (Boca Raton, FL: CRC Press), 2006.
- Sodano H. A., Inman D. J. and Park G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. *Shock and Vibration. Dig. 36*, 197:205, 2004.
- Stephen N. G. On energy harvesting from ambient vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 293(1–2), 409–425, doi: 10.1016/j.jsv.2005.10.003, 2006
- Tang L. and Wang J. Size effect of tip mass on performance of cantilevered piezoelectric energy harvester with a dynamic magnifier. *Acta Mechanica*, 228, 3997–4015, 2017.
- Timoshenko S. P. and Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. (New York: McGraw-hill) pp 51–9, 1959.
- Yang Y., Wang S., Stein P., Xu B. -X. and Yang T. Vibration-based energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm: analysis and identification of optimal structural parameters. *Smart Materials Structure*. 26, 2017, 045011 (17pp), 2017.
- Yang Y., Li Y., Guo Y., Xu B. -X and Yang T. Improved vibration-based energy harvesting by annular mass configuration of piezoelectric circular diaphragms. *Smart Materials Structure*. 27, 2018, 035004 (9pp), 2018.