

RECOLECTOR PIEZOELECTRICO PARA UNIDAD DE SENSADO AUTONOMO DE FUEGO

PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER FOR AN AUTONOMOUS FIRE SENSOR

Mariano Febbo^{a,b} y Sebastián Machado^{b,c}

^a *Instituto de Física del Sur (IFISUR), Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur (UNS), Avda. Alem 1253, B8000CPB- Bahía Blanca, Argentina, mfebbo@uns.edu.ar, <http://www.uns.edu.ar>*

^b *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

^c *Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca (CIC), 11 de Abril 461, 8000 Bahía Blanca, Argentina, smachado@frbb.utn.edu.ar, <http://www.frbb.utn.edu.ar>*

Palabras Clave: Sensor de llama, buzzer, recolector de energía piezoeléctrico.

Resumen. En este trabajo se presenta un recolector de energía piezoeléctrico para una unidad de sensado autónomo de fuego. El diseño del mismo se basa en un buzzer piezoeléctrico, de menor costo que las láminas piezoeléctricas del tipo MFC, cuyas características mecánicas se asumen alrededor de la frecuencia de la fuente de vibración, entre 150 y 160 Hz. Para identificar las constantes piezoeléctricas de forma de modelar en 3D el recolector se utiliza un modelo unidimensional analítico de una viga cantiléver junto con ensayos experimentales. El dispositivo propuesto tiene la ventaja de ser de menor tamaño, no debe pegarse a la estructura de base y tiene una generación del mismo orden de magnitud, comparado con una viga cantiléver. A partir de la construcción de un sensor de llama, se midieron la tensión y corriente requerida para su correcto funcionamiento. Los resultados muestran que el recolector presentado es apto como fuente de energía de un sensor autónomo de llama.

Keywords: Flame detector, Buzzer, Piezoelectric Energy Harvester

Abstract. In this work, a piezoelectric energy harvester for an autonomous fire sensing unit is presented. Its design is based on a piezoelectric buzzer, of lower cost than the MFC-type piezoelectric sheets, whose mechanical characteristics are assumed around the frequency of the vibration source, between 150 and 160 Hz. To identify the piezoelectric constants in order to model the harvester in 3D, an analytical one-dimensional model of a cantilever beam together with experimental tests is used. The results show that the harvester has comparative advantages over other simpler designs, and its suitability as an energy source for an autonomous flame sensor is demonstrated. The proposed device has the advantage of being smaller in size, it does not have to be glued to the base structure and it has a generation of the same order of magnitude, compared to a cantilever beam. From the construction of a flame sensor, the voltage and current required for its correct operation were measured. The results show that the harvester presented is suitable as a source of energy for an autonomous flame sensor.

1 INTRODUCCIÓN

Debido a la dependencia de la generación de energía en los combustibles fósiles y su carácter de recurso no-renovable, existe una gran demanda de fuentes de energía limpias y amigables con el medio ambiente (Fu et al. 2021). La captación de energía o técnica conocida como “energy harvesting” en inglés, es una de las alternativas más prometedoras al uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica (Anton et al. 2007). La energía obtenida a partir de las vibraciones mecánicas es una de las principales soluciones para aprovechar la energía cinética del movimiento del ambiente cuando se necesita alimentar eléctricamente dispositivos electrónicos de pequeña potencia (Beeby et al. 2006). Estos dispositivos son particularmente atractivos para sistemas de monitorización, transmisión y sensores alimentados en tiempo real (Harb, 2011), desde redes de monitoreo inalámbricas para tubos que transportan fluidos (Ashraf Virk et al. 2022), hasta aplicaciones en vías de ferrocarril (Qi et al. 2022). Existen diferentes mecanismos para realizar la conversión mecánica a eléctrica utilizando esta técnica: mecanismos de transducción electrostáticos (Peano y Tambosso, 2005), electromagnéticos (Saravia et al. 2017), magnetorestrictivos (Mori et al. 2015), triboeléctricos (Fan et al. 2016) o piezoeléctricos (Gatti et al. 2018).

De todos ellos, la conversión piezoeléctrica ha ganado mucho interés por su fácil implementación, alta durabilidad y buena potencia eléctrica de salida (Pradeesh et al. 2022). Erturk e Inman han realizado contribuciones fundamentales desarrollando un marco teórico para estudiar los recolectores de energía piezoeléctrica (REP) (Erturk y Inman, 2009) que se puede encontrar en un sin número de aplicaciones desde entonces (Ramírez et al. 2019; Shahab et al. 2018).

En este trabajo se utilizan buzzers piezoeléctricos para construir recolectores de energía. Su principal ventaja reside en su bajo costo comparados con piezoeléctricos comerciales (de fibras compuestas y de láminas de cerámica) que puede rondar varios órdenes de magnitud de diferencia. La utilización de buzzers como generadores de energía no es nueva (Bassari et al. 2016). Sin embargo, no son muchas las aplicaciones en las que se los utiliza y la bibliografía sobre el tema es escasa comparada con la utilización de los otros tipos mencionados (Yang et al. 2018). De esta manera, se pretende utilizarlos en un diseño nuevo para recolectar la energía vibratoria de una fuente de entre 150 y 160 Hz con el fin de generar la energía suficiente para alimentar un sensor autónomo de llama. Se utilizará un modelo unidimensional y experimentos para determinar las constantes materiales del buzzer, de forma de poder utilizarlas luego en un modelo tridimensional de elementos finitos (COMSOL) con el objetivo de predecir la generación de energía del recolector propuesto, cuya compleja geometría dificulta su modelado analítico convencional.

El artículo está organizado de la siguiente manera. Después de la introducción, se presenta un modelo matemático unidimensional de un recolector de energía basado en una viga cantiléver en la Sección 2, diseñado para resonar a la frecuencia propuesta. Junto con ello, también se presenta el modelado tridimensional de la viga piezoeléctrica con el buzzer utilizando el programa COMSOL. La Sección 3 trata en una primera parte sobre la identificación de parámetros que serán luego utilizados en el modelo 3D y en una segunda se presenta el tipo de recolector propuesto basado en un buzzer. A continuación, se muestran los resultados numéricos y experimentales de la generación de energía para el nuevo tipo de recolector y, en función de los requerimientos de un sensor de llama real, se demuestra la aptitud del recolector como fuente de alimentación. Finalmente, la Sección 4 presenta las conclusiones.

2 DESCRIPCION DEL RECOLECTOR DE ENERGIA

El modelo de recolección de energía consiste en la clásica viga cantiléver donde la estructura se encuentra en la condición empotrada-libre. La misma consiste principalmente de una viga portante de acero con una lámina de material piezoeléctrico PZT 5H ubicada en la región cercana al empotramiento. Mediante la deformación del material PZT se transforma la energía mecánica en energía eléctrica como se puede observar en la [Figura 1](#). Además, se incorpora una masa puntual en el extremo libre con el fin de incrementar la deformación de la viga cuando se encuentra en un estado dinámico de resonancia.

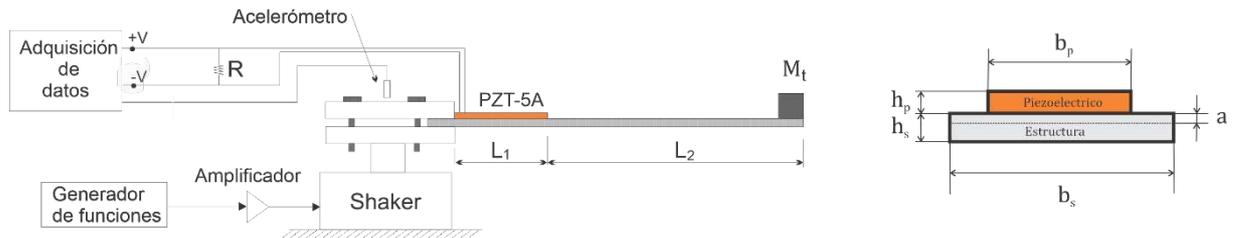


Figura 1: Esquema del sistema de recolección de energía

El modelo matemático del recolector de energía se basa en la teoría de Bernoulli-Euler donde $w(x,t)$ es la deflexión transversal de la viga desde el punto de equilibrio. En cuanto al modelo eléctrico se considera el campo eléctrico lineal y uniforme a través del espesor del piezoeléctrico. El modelo propuesto es resuelto a partir del método de balance armónico utilizando los ensayos experimentales para realizar una identificación del amortiguamiento estructural y de las constantes piezoeléctricas.

En la [Figura 1](#) se muestra que la longitud de la viga compuesta es $L_1 + L_2$, donde la lámina piezocerámica se encuentra sobre la longitud L_1 y en el extremo libre de la viga se coloca una masa M_t . Todo el sistema es excitado por la base mediante la función determinista $g(t)$ que intenta imitar la fuente de excitación de la cual se pretende recolectar energía. Las ecuaciones diferenciales ordinarias de movimiento se pueden obtener mediante el análisis modal convencional ([Anton et. al. 2007](#)).

$$\begin{aligned} \ddot{q}_j + 2\zeta_j\omega_j\dot{q}_j + \omega_j^2q_j - \theta_jv &= \Gamma_j\ddot{g} \\ C\dot{v} + R^{-1}v + \theta_j\dot{q}_j &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde q_j representa los desplazamientos temporales generalizados y v el voltaje a través del elemento piezoeléctrico. Además, R es la resistencia de la carga, C la capacidad del piezoeléctrico, ζ_j el amortiguamiento modal asociado, ω_j frecuencia natural del sistema, θ_j el acoplamiento electromecánico y Γ_j el acoplamiento modal. Procediendo a normalizar los modos $\phi_j(x)$ con respecto a la masa, se definen las siguientes relaciones:

$$\rho A_1 \int_0^{L_1} \phi_{j,1}(x)\phi_{n,1}(x) dx + \rho A_2 \int_{L_1}^{L_1+L_2} \phi_{j,2}(x)\phi_{n,2}(x) dx + \phi_{j,2}(L_1+L_2)M_t \phi_{n,2}(L_1+L_2) = \begin{cases} 0 & \text{for } j \neq n. \\ 1 & \text{for } j = n. \end{cases} \quad (2)$$

La viga es discretizada en dos tramos para considerar el cambio seccional introducido por el material piezoeléctrico. Los términos de la Ec. (1) son definidos de la siguiente manera:

$$\omega_j^2 = EI_1 \int_0^{L_1} (\phi_{j,1}''(x))^2 dx + EI_2 \int_{L_1}^{L_1+L_2} (\phi_{j,2}''(x))^2 dx, \quad (3)$$

$$\theta_j = \frac{1}{4} \frac{d_{31}}{E_p} b_p (2a + h_p) \phi_{j,1}'(L_1), \quad (4)$$

$$\Gamma_j = a_c \left[\rho A_1 \int_0^{L_1} \phi_{j,1}(x) dx + \rho A_2 \int_{L_1}^{L_1+L_2} \phi_{j,2}(x) dx + M_t \phi_{j,2}(L_1 + L_2) \right], \quad (5)$$

donde d_{31} es la constante piezoeléctrica, a_c la amplitud de aceleración en G y las características seccionales son calculadas mediante: $EI_1 = b_p E_p (a^2 h_p + h_p^2 a + h_p^3/3) + b_s E_s (a^2 h_s - h_s^2 a + h_s^3/3)$, $EI_2 = E_s b_s h_s^3/12$, $\rho A_1 = b_p h_p \rho_p + b_s h_s \rho_s$, $\rho A_2 = b_s h_s \rho_s$, $a = (b_s E_s h_s^2 - b_p E_p h_p^2) / (2b_p E_p h_p + 2b_s E_s h_s)$.

Aplicando el método de balance armónico a las Ecs. (1) se obtiene la siguiente expresión para el voltaje:

$$V = \frac{\Gamma_j \theta_j R \Omega}{\sqrt{(\omega_j^2 - \Omega^2 - 2CR\zeta_j \omega_j \Omega^2)^2 + [2\Omega \omega_j \zeta_j + R\Omega(\theta_j^2 + C\omega_j^2 - C\Omega^2)]^2}} \quad (6)$$

La respuesta dinámica de generación de voltaje obtenida con el modelo matemático unidimensional (Ec. 6) es comparada con la simulación numérica de un modelo tridimensional desarrollado en COMSOL Multiphysics. A partir de la configuración del sistema presentada anteriormente se definen los parámetros geométricos y físicos del dispositivo, ver [Tabla 1](#).

Acero (viga portante)		Elemento Piezoeléctrico		Latón	
Young, E_s	210 GPa	Young, E_p	67 GPa	Young, E	106 GPa
Densidad, ρ_s	7850 kg/m ³	Densidad, ρ_p	8550 kg/m ³	Densidad, ρ	7500 kg/m ³
L_1	22 mm	Piezoelec. d_{31}	-125 pm/V	L	30 mm
L_2	48 mm	Capacitancia	52 nF	r (radio)	15 mm
b_s (ancho)	30 mm	diámetro	22 mm	h (espesor)	0.1 mm
h_s (espesor)	1 mm	h_p (espesor)	0.1 mm		
M_t	1.7 gr				

Tabla 1: Parámetros geométricos y físicos del dispositivo propuesto.

De esta manera, las dimensiones del dispositivo fueron seleccionadas para obtener una frecuencia natural de 150 Hz, cuyo valor se determinó para que caiga dentro del rango frecuencia de la fuente (entre 150 y 160 Hz) de manera de hacerlo resonante.

En la Figura 2 se muestra el modelo computacional tridimensional donde en color amarillo se incluye una lámina de latón muy delgada en comparación con el espesor de la viga. De esta manera, la inclusión del latón es una de las diferencias entre ambos modelos, debido a que en el modelo matemático unidimensional dicho material es despreciado por simplicidad. La otra diferencia se encuentra en la geometría del material cerámico, donde en el modelo matemático la geometría circunferencial es aproximada por una rectangular ($b_p = 0.017$ mm), manteniendo la superficie del piezoeléctrico y ajustando la longitud de este con respecto a su diámetro ($L_1 = 22$ mm).

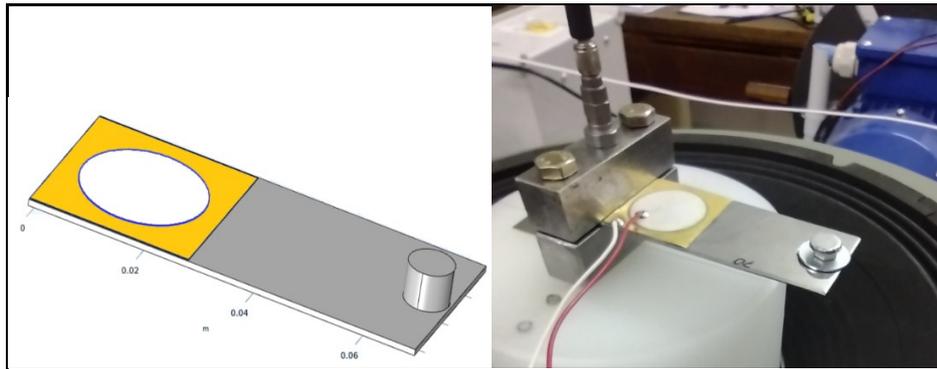


Figura 2: Modelo computacional de COMSOL y foto del ensayo experimental.

En el caso del modelo tridimensional, el material piezoeléctrico es ortótropo y es necesario definir las matrices para considerar las propiedades eléctricas y mecánicas de este. Por lo tanto, la selección de los coeficientes que conforman la matriz de permitividad relativa ε^s (o constante dieléctrica) y la matriz de rigidez C^E (definida a campo eléctrico constante) corresponden a valores conocidos para el material PZT 5H (Yang et. al. 2018).

$$\varepsilon^s = \begin{bmatrix} 1680 & 0 & 0 \\ 0 & 1680 & 0 \\ 0 & 0 & 1402 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C^E = \begin{bmatrix} 8.23 & 3.60 & 3.29 & 0 & 0 & 0 \\ 3.60 & 8.23 & 3.29 & 0 & 0 & 0 \\ 3.29 & 3.29 & 7.10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.48 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.32 \end{bmatrix} [10^{10} Pa] \quad (8)$$

En el caso de la matriz de acoplamiento electromecánico e , los coeficientes son ajustados de acuerdo con los resultados experimentales de generación de voltaje.

En los ensayos experimentales la viga cantiléver se somete a diferentes condiciones de excitación para determinar su respuesta en resonancia. La viga es montada sobre un shaker Labworks ET-132, cuya aceleración es generada a través de un generador Rigol DG 4062 y luego amplificada. 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 NI 9234 y postprocesada mediante un código en Matlab. En los ensayos se realiza un barrido en frecuencia con una señal senoidal, registrando el voltaje en función de la aceleración de la base (en unidades de $g = 9.80 \text{ m/s}^2$). El rango de frecuencias es de 130 a 170 Hz, para observar el pico de generación del primer modo flexional en 150 Hz. La resistencia de carga es de 10 k Ω de forma de simular en forma aproximada, la impedancia de una unidad de sensado de llama.

3 RESULTADOS

3.1 Calibración del modelo computacional

Se presentan los resultados experimentales y su comparación con los cálculos numéricos por el modelo analítico (unidimensional) y un modelo 3D de elementos finitos (COMSOL).

El primer paso consiste en identificar algunos parámetros de la viga compuesta formada por la lámina piezoeléctrica (buzzer PZT-5H). En la Figura 3 se muestra la respuesta en frecuencia de generación de voltaje correspondiente a los valores experimentales y los valores numéricos del modelo analítico (Ec 6). Los valores de acoplamiento electromecánico d_{31} y el valor de amortiguamiento modal ζ son determinados por medio del modelo tipo viga unidimensional (Ec. 6). En este caso, el valor de amortiguamiento modal es ajustado con la amplitud de generación de voltaje en resonancia, el cual resulta ser de $\zeta = 0,004$. El valor de acoplamiento identificado fuera de resonancia para la constante piezoeléctrica d_{31} es de $d_{31} = -125$ pm/V. Con estos valores, se alcanza una buena concordancia entre ambas curvas como muestra la Figura 3.

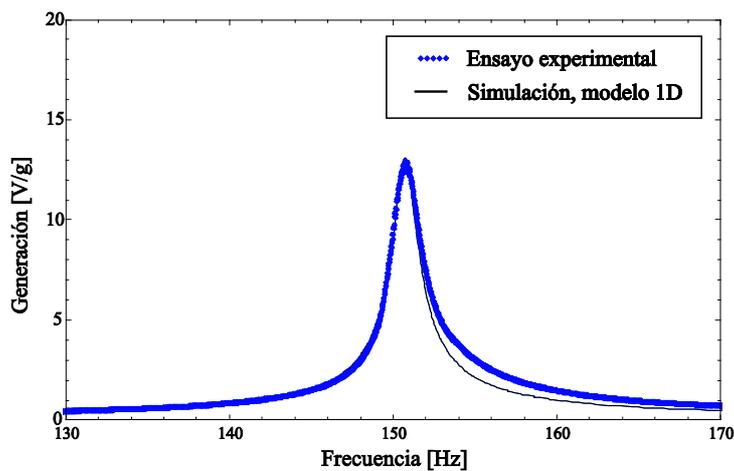


Figura 3: Respuesta en frecuencia de voltaje del modelo viga y experimental.

A partir de este primer ajuste de los parámetros involucrados, se define la matriz de acoplamiento electromecánico $e = d C^E$, que es incorporada en COMSOL Multiphysics.

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 5.16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.16 & 0 & 0 \\ -3.7 & -3.7 & 15.71 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ m^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

El amortiguamiento modal identificado en el paso anterior es considerado en el modelo 3D utilizando modelo de amortiguamiento proporcional de Rayleigh, definiendo una combinación lineal de las matrices de masa y rigidez de la siguiente forma:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (10)$$

Los coeficientes α y β se calculan mediante la siguiente expresión (He and Fu 2001):

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2\omega_0} & \frac{\omega_0}{2} \\ \frac{1}{2\omega_1} & \frac{\omega_1}{2} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \zeta \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (11)$$

siendo ω_0 y ω_1 las frecuencias naturales no amortiguadas del primer y segundo modo. De esta manera, en función de los valores de frecuencias calculados $\omega_0 = 942$ (150 Hz) y $\omega_1 = 5974$ (951 Hz), los valores introducidos en COMSOL son $\alpha = 6.51$ y $\beta = 1.15 \cdot 10^{-6}$.

En la Figura 4 se muestra la respuesta en frecuencia obtenida con el modelo 3D de COMSOL considerando los parámetros previamente identificados y los resultados obtenidos mediante la Ec. (6), correspondiente al modelo analítico tipo viga. Se observa una buena predicción de

generación de energía del modelo 3D, tanto en la condición de resonancia como fuera de ella, para los valores identificados.

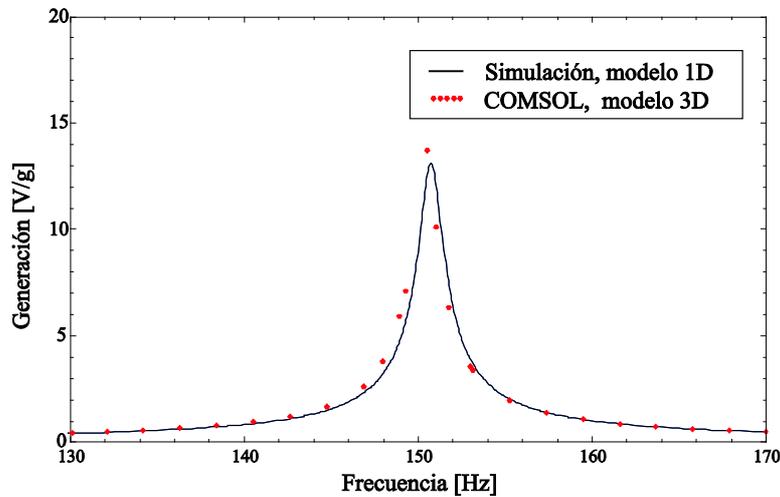


Figura 4: Respuesta en frecuencia de voltaje del modelo 3D de COMSOL y el modelo viga con los valores del buzzer identificados experimentalmente.

3.2 Recolector propuesto

A partir de definir las constantes eléctricas y mecánicas del material piezoeléctrico, es posible diseñar un recolector de energía utilizando el software COMSOL. En aplicaciones existentes (Bassari et al 2016, Yang et. al, 2018), el disco piezoeléctrico “buzzer” es restringido en su circunferencia externa y debido a sus pequeñas dimensiones el mismo presenta frecuencias de resonancia superiores a 500 Hz. Dado que para la aplicación propuesta la frecuencia debe bajar hasta los 150 Hz, se propone para ello una nueva condición de vínculo del disco buzzer sujetado en dos extremos mediante dos varillas de 3 mm de diámetro (Figura 5). De esta manera, se obtiene una frecuencia natural del modo flexional de 300 Hz. Para bajar aún más la frecuencia, se adosa una masa especialmente diseñada de 13 gr ubicada en el centro del buzzer, la cual permite sintonizar el dispositivo en una frecuencia cercana a 153 Hz y a su vez incrementar la deformación en el material piezoeléctrico, aumentando la generación de energía. En la Figura 5 se muestran las dimensiones del dispositivo propuesto. En la Figura 6 se observa el modo de vibración flexional representado por un disco circular restringido en dos extremos a través de tornillos al piso. En la Figura 7 se muestra la respuesta en frecuencia de generación de voltaje obtenida con el modelo 3D, realizando un barrido de excitación entre 130 y 170 Hz. Se observa un pico de voltaje de 15 volts para una aceleración de 1 g. La generación obtenida es similar al valor presentado en la Figura 4 utilizando la viga cantiléver.

Las ventajas frente al modelo de viga cantilever son varias: por un lado, se evita el procedimiento de pegado del material piezoeléctrico sobre la viga portante y por otro lado, se reducen las dimensiones del dispositivo recolector. La masa utilizada en este modelo es de 13 gr, bastante mayor comparada con el modelo cantilever de 1.7 gr. Sin embargo, el desplazamiento vertical máximo en la condición de resonancia es tan solo de 0.7 mm, comparado con el diámetro de 38 mm, asegurando la integridad estructural del dispositivo propuesto.

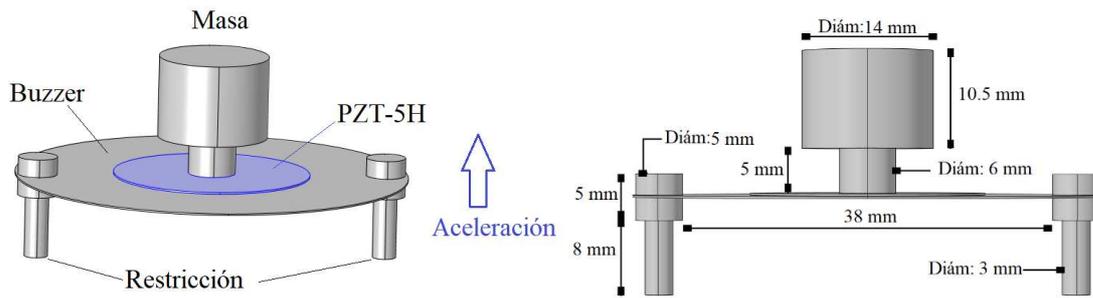


Figura 5: Modelo del recolector basado en el buzzer cilíndrico.

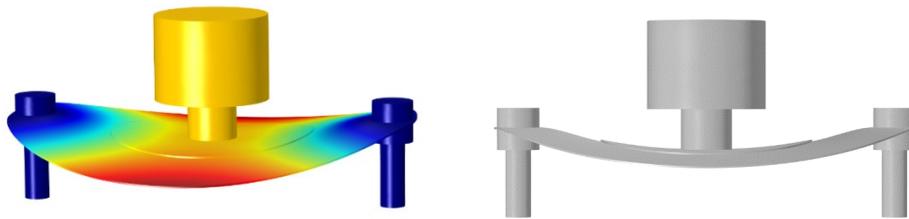


Figura 6: Modo de vibración sintonizado a 153 Hz.

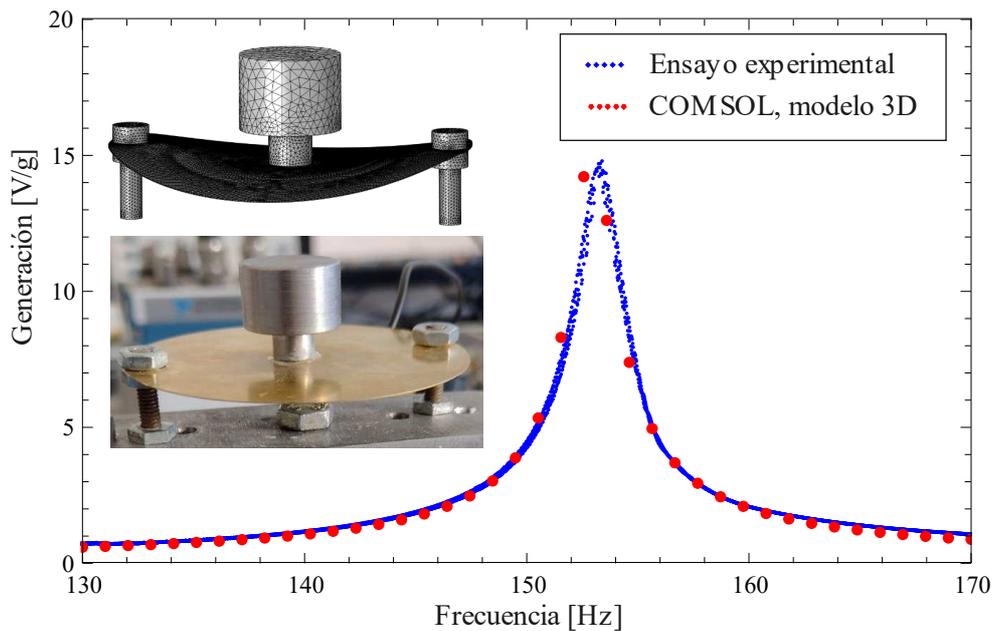


Figura 7: Respuesta en frecuencia de voltaje del modelo 3D de COMSOL y experimental.

En la Figura 7 se presenta también la respuesta en frecuencia de generación de voltaje obtenida experimentalmente. De igual manera que en el caso cantiléver, se realiza un barrido de excitación entre 130 y 170 Hz. Se puede observar un buen acuerdo con el resultado numérico, tanto en resonancia como fuera de ella.

3.3 Sensor de llama

En esta sección se presenta el análisis de la energía generada por el recolector como fuente de alimentación de un sensor de llama. (ver esquema de la Figura 8a) Mediante mediciones de laboratorio se establecieron los requisitos eléctricos de 4 Volts y 0.5 mA de corriente sobre la unidad de regulación y rectificación de potencia (ver Figura 8a) de forma de asegurar el correcto funcionamiento del sensor y una carga constante en el supercapacitor. El sistema de sensado presenta una resistencia equivalente de $R=8\text{ K}\Omega$. En la Figura 9 (b) se presenta una simulación de generación obtenida con COMSOL junto con resultados experimentales, considerando una $R=7.5\text{ K}\Omega$ (valor comercial más cercano) y aceleración en la base de 4 g.

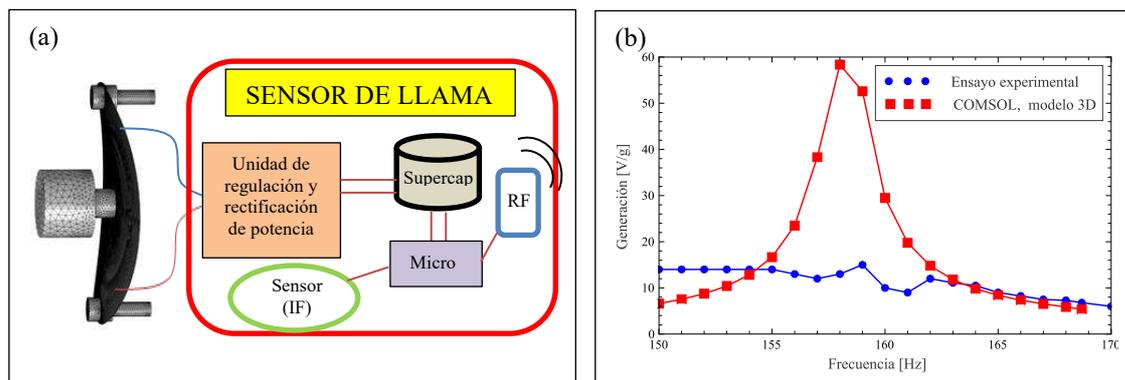


Figura 8: a) Esquema de unidad de sensado alimentado por el prototipo propuesto, b) Respuesta en frecuencia de voltaje del modelo 3D de COMSOL y experimental, para 4 g de aceleración y $R=7.5\text{ K}\Omega$

Se pueden observar dos resultados: que la simulación predice una mayor generación que los ensayos experimentales, efecto esperado dado que el COMSOL no contempla no-linealidades materiales del piezoeléctrico puestas de manifiesto con una aceleración tan grande, de 4 g (ver Machado et al 2020) y que el prototipo observado supera el voltaje para el correcto funcionamiento del sensor de llama, en base a los requerimientos eléctricos medidos sobre el mismo.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un dispositivo recolector de energía basado en un buzzer piezoeléctrico. Para obtener las constantes materiales del buzzer se utiliza un modelo unidimensional analítico basado en una viga cantiléver que permite obtener los valores numéricos a partir de la comparación con experimentos. Con el fin de diseñar un dispositivo que sirva para alimentar eléctricamente un sensor autónomo de llama, el recolector se diseña resonante en base a las frecuencias de la fuente de vibración de entre 150 y 160 Hz. El dispositivo propuesto tiene la ventaja de ser de menor tamaño, no debe pegarse a la estructura de base y tiene una generación del mismo orden de magnitud, comparado con una viga cantiléver.

Al observar el desempeño del recolector sobre un sensor de llama se concluye que, en función de sus características eléctricas, voltaje y corriente requeridos para su normal funcionamiento, el dispositivo propuesto tiene una generación eléctrica que excede a la requerida en el rango de frecuencias de diseño, de 150 a 160 Hz. Por todo ello representa ser un buen candidato para la aplicación propuesta.

REFERENCIAS

- Ashraf Virk M, Myseorewala MF, Cheded L. Review of energy harvesting techniques in wireless sensor-based pipeline monitoring networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 157, 112046.
- Anton SR, Sodano HA. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). *Smart Materials and Structures*; 16, 2007. doi:10.1088/0964-1726/16/3/R01.
- Beeby SP, Tudor MJ, White NM. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* ;17, 2006. doi:10.1088/0957-0233/17/12/R01.
- Basari AA, Hashimoto S, Homma B, Okada H, Okuno H, Kumagai S. Design and optimization of a wide band impact mode piezoelectric power generator, *Ceramics International* 42(2016)6962–6968.
- Erturk A, Inman DJ. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Materials and Structures* ;18:025009, 2009. doi:10.1088/0964-1726/18/2/025009.
- Fan FR, Tang W, Wang ZL. Flexible Nanogenerators for Energy Harvesting and Self-Powered Electronics. *Advanced Materials*; 28:4283–305, 2016. doi:10.1002/adma.201504299.
- H. Fu, X. Mei, D. Yurchenko, S. Zhou, S. Theodossiades, K. Nakano, E.M. Yeatman, Rotational energy harvesting for self-powered sensing, *Joule* 5 (5) (2021) 1074–1118, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.006>.
- Gatti CD, Ramírez JM, Febbo M, Machado SP. Multimodal piezoelectric device for energy harvesting from engine vibration. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*;13, 2018. doi:10.2140/jomms.2018.13.17.
- Harb A. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy* ;36:2641–54, 2011. doi:10.1016/j.renene.2010.06.014.
- He J, Fu Z-F. Modal Analysis. Butterworth-Heinemann, 2001.
- Machado SP, Febbo M, Gatti CD, Osinaga SM, A piezoelectric beam model with geometric, material and damping nonlinearities for energy harvesting. *Smart Materials and Structures* ;29, 095009, 2020.
- Mori K, Horibe T, Ishikawa S, Shindo Y, Narita F. Characteristics of vibration energy harvesting using giant magnetostrictive cantilevers with resonant tuning. *Smart Materials and Structures*;24, 2015. doi:10.1088/0964-1726/24/12/125032.
- Peano F, Tambosso T. Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger. *Journal of Microelectromechanical Systems* ;14:429–35, 2005. doi:10.1109/JMEMS.2005.844803.
- Pradeesh EL, Udhayakumar S, Vasundhara MG, Klavathi GK, A review on piezoelectric energy harvesting. *Microsystem Technologies*, 28 (8) 1797-1830, 2022.
- Qi L, Pan H, Pan Y, Luo D, Yan J, Zhang Z. A review of vibrations energy harvesting in rail transportation field. *iScience*, 2022, 25 103849.
- Ramírez JM, Gatti CD, Machado SP, Febbo M. A piezoelectric energy harvester for rotating environment using a linked E-shape multi-beam. *Extreme Mechanics Letters* ; 27, 8-19, 2019.
- Saravia CM, Ramírez JM, Gatti CD. A hybrid numerical-analytical approach for modeling levitation based vibration energy harvesters. *Sensors and Actuators A: Physical* ;257:20–9, 2017. doi:10.1016/j.sna.2017.01.023.
- Shahab S, Zhao S, Erturk A. Soft and hard piezoelectric ceramics and single crystals for random vibration energy harvesting. *Energy Technology* ; 6 (5), 935-942, 2018.
- Yang Y, L, Guo Y, Xu BX, T Yang. Improved vibration-based EH by annular mass configuration of piezoelectric circular diaphragms, *Smart Mat and Struct* 27 (2018) 035004.