

Recolectores piezoeléctricos de geometría circular para estaciones de sensado autónomo.

Circular geometry piezoelectric collectors for autonomous sensing stations

Doctorando:

Carlos Alberto VERA

<https://orcid.org/0009-0000-7458-9880>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca
cvera@frbb.utn.edu.ar

Director:

Sebastián Pablo MACHADO

Codirector:

Mariano FEBBO

Resumen

En el presente trabajo se exponen resultados experimentales y numéricos de recolectores de energía piezoeléctricos de geometría circular, los que permiten una amplia versatilidad de uso en la recuperación de energía desde fuentes vibratorias provenientes básicamente de fenómenos comunes en el campo de la ingeniería. El dispositivo estudiado cuenta con el agregado de una masa de oscilación en su centro, para sintonizar frecuencias específicas de trabajo y aumentar la potencia generada. Se exponen resultados experimentales y analíticos, para formulaciones lineales y no lineales, con especial atención para el primer modo de vibración. La fuente vibratoria es el motor de una máquina cosechadora de marca John Deere, a la que se pretende asistir con sensores de ignición para la detección de incendios.

Palabras clave: Piezoelectricidad; energía; vibraciones.

Abstract

This paper presents experimental and numerical results obtained using circular piezoelectric energy harvesters, which offer broad versatility in energy recovery from vibrational sources, primarily from common engineering phenomena. The studied device incorporates an oscillating mass at its center to tune specific operating frequencies and increase the generated power. Experimental and analytical results are presented for both linear and nonlinear formulations, with particular attention to the first vibration mode. The vibrational source is the engine of a John Deere combine harvester, which is intended to be equipped with ignition sensors for fire detection.

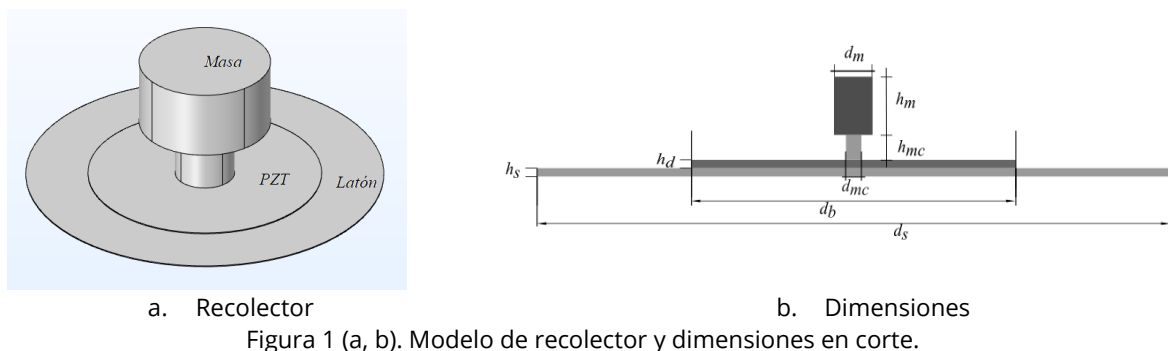
Keywords: Piezoelectricity; Energy Harvesting. Vibration.

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. A., 2004), dado que esta energía vibratoria puede utilizarse como fuente de energía eléctrica. En particular, es interesante destacar la utilización de esta energía para la alimentación de sensores industriales autónomos en el monitoreo de diferentes variables de importancia en el campo de la ingeniería. Un dispositivo de sensado autónomo reduce considerablemente su costo de manutención, considerando que estos dispositivos electrónicos son por lo general de baja potencia. Sabido es que la vida útil de cualquier batería siempre es mucho más corta que la vida útil del propio dispositivo, y el recambio de estas en muchas ocasiones es de alto costo y de difícil acceso en las estructuras que requieren sensado. Entre las configuraciones geométricas para recolectores de energía, son ampliamente conocidos los recolectores tipo viga (Erturk, A., and Inman, D. J., 2008). Sin embargo, va ganando terreno el estudio de recolectores piezoeléctricos de geometría circular, conocidos como buzzer. Estos constan de un disco de material PZT sobre un sustrato metálico de latón también circular (Chen et al. 2012; Palosaari J. et al. 2014; Yang et al. 2018). El interés en este tipo de recolectores radica en el bajo costo del buzzer y su menor tamaño, en comparación con los recolectores tipo viga para idénticos niveles de generación. En el presente artículo se muestran resultados de estudios de modelos analíticos unidimensionales, lineales y no lineales, de recolectores circulares empotrados a lo largo de toda la circunferencia exterior, y se los compara con resultados experimentales de laboratorio. Al dispositivo se le agrega una masa en su centro, que permite la sintonización del dispositivo a la frecuencia de trabajo, una mayor deformación y, por ende, un aumento en la generación de energía. La motivación del estudio está sustentada en el diseño de recolectores de energía para alimentar una estación de sensado autónomo en máquinas cosechadora para el sensado 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, y que generan grandes pérdidas para productores y compañías de seguros. Todas las pruebas se realizan a la frecuencia de resonancia relevada previamente para una parte de la máquina cosechadora, y para condiciones de carga que son similares a las que necesita una estación autónoma de sensado.

Desarrollo

En la Figura 1 (a, b) se muestran el modelo de recolector y las dimensiones principales en corte. Un sistema de coordenadas (r, z, θ) se localiza en el plano neutro del dispositivo con el origen en el centro de éste y el eje z + hacia arriba. Las dimensiones geométricas son el diámetro y el espesor del sustrato (d_s, h_s), diámetro y espesor del PZT (d_p, h_p), diámetro (d_m) y altura (h_m) de la masa de oscilación. El contacto entre masa y PZT se materializa montándola sobre cilindros de menor diámetro (d_{mc}) y de altura constante (h_{mc}).



Asumiendo para la deflexión del prototipo la teoría clásica de placas de Kirchoff, se definen el desplazamiento

flexional $w = w(r, \theta, t)$, los desplazamientos radiales u_r , transversales u_θ y las deformaciones específicas como

$$u_r = -z \frac{\partial w}{\partial r}; \quad u_\theta = -\frac{z}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \quad \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} = -\frac{z}{r} \frac{\partial w}{\partial r}; \quad \gamma_{r\theta} = 0 \quad (1)$$

Las tensiones para el sustrato (S) (Yuanlin et. al. 2017) se definen desde

$$\sigma_r^{(S)} = \frac{E_S}{(1-\nu_S^2)} (\varepsilon_r + \nu_S \varepsilon_\theta); \quad \sigma_\theta^{(S)} = \frac{E_S}{(1-\nu_S^2)} (\varepsilon_\theta + \nu_S \varepsilon_r) \quad (2)$$

en las que E_S , ν_S son el módulo de Young y el módulo de Poisson respectivamente. Para el piezoelectrico, considerando expresiones de no linealidad de la constitutiva del material (Leadnham et al, 2015) se tiene

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(p)} &= \frac{1}{s_{11}^E (1-\nu_p^2)} (\varepsilon_r + \nu_p \varepsilon_\theta) - \frac{e_{31}}{s_{11}^E (1-\nu_p)} E_3 + \frac{1}{s_{111}^E (1-\nu_p^2)} [\varepsilon_r^2 + \nu_p \varepsilon_\theta \varepsilon_r] \text{sign}(\varepsilon_r) \\ &\quad - \frac{e_{311}}{s_{111}^E (1-\nu_p^2)} (1+\nu_p) \varepsilon_r \text{sign}(\varepsilon_r) E_3 \\ \sigma_\theta^{(p)} &= \frac{1}{s_{11}^E (1-\nu_p^2)} (\varepsilon_p + \nu_p \varepsilon_\theta) - \frac{e_{31}}{s_{11}^E (1-\nu_p)} E_3 + \frac{1}{s_{111}^E (1-\nu_p^2)} [\varepsilon_\theta^2 + \nu_p \varepsilon_\theta \varepsilon_r] \text{sign}(\varepsilon_\theta) \\ &\quad - \frac{e_{311}}{s_{111}^E (1-\nu_p^2)} (1+\nu_p) \varepsilon_\theta \text{sign}(\varepsilon_\theta) E_3 \end{aligned} \quad (3)$$

en las que s_{11}^E y ν_p son la flexibilidad elástica del material piezoelectrico a campo eléctrico constante y el módulo de Poisson del piezoelectrico respectivamente. Los términos asociados a la no linealidad constitutiva s_{111}^E y e_{311} son el módulo de elasticidad no lineal y la constante piezoelectrica no lineal. La energía potencial U es la suma de la energía del sustrato (U_S) y del piezoelectrico (U_p). Para el sustrato

$$U_S = \int_{V_s} \frac{1}{2} \{ \varepsilon_r \sigma_r^{(S)} + \varepsilon_\theta \sigma_\theta^{(S)} \} dV_S + NL_G \quad (4)$$

donde NL_G representa la no linealidad geométrica, que en este caso se considera en forma aproximada según (Haterbouch et. al. 2003) $NL_G = \pi D \int_0^r \frac{3}{h^2} (w'')^4 r dr$. Para el piezoelectrico se incorpora la energía del potencial eléctrico, quedando la expresión

$$U_p = \int_{V_p} \frac{1}{2} \{ \varepsilon_r \sigma_r + \varepsilon_\theta \sigma_\theta \} dV_p - \int_{V_p} D_3 E_3 dV \quad (5)$$

en la que D_3 es la componente del desplazamiento eléctrico definida por

$$D_3 = d_{13} (\sigma_r^{(p)} + \sigma_\theta^{(p)}) + \epsilon_{33}^T E_3 + \frac{e_{311}}{s_{11}^E (1-\nu_p)} \varepsilon_r \quad (6)$$

en la que ϵ_{33}^T es la permitividad del piezoelectrico a tensión constante, d_{13} constante piezoelectrica y E_3 campo eléctrico en la dirección z positivo, que se obtiene según (Erturk et. al. 2011) $E_3 = -\frac{V_t}{h_p}$

El desplazamiento flexional se divide en 3 secciones. La sección (1) corresponde al sustrato, la (2) a sustrato + piezoelectrico, la (3) sustrato + piezoelectrico + la masa oscilante. De esta manera, la energía cinética T se calcula mediante la integral

$$T = \frac{1}{2} \int_{V_3} \rho_M [\dot{w}_3(r, \theta, t)]^2 dV_3 + \frac{1}{2} \int_{V_p} \rho_p [\dot{w}_2(r, \theta, t)]^2 dV_p + \frac{1}{2} \int_{V_s} \rho_s [\dot{w}_1(r, \theta, t)]^2 dV_s + \frac{1}{2} m_t \dot{g}^2 \quad (7)$$

en la que ρ_p , ρ_s y ρ_M son las densidades por unidad lineal del piezoeléctrico, del sustrato y de la masa oscilante. Reemplazando las ec. (2) y (3) en (4), (5) y (7), aplicando el operador de Lagrange $L=T-U$ desde principio de Hamilton se derivan las ecuaciones del movimiento

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{w}} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial L}{\partial w'} \right) - \frac{\partial}{\partial r^2} \left(\frac{\partial L}{\partial w''} \right) + c\dot{w} + c\dot{w}^2 \text{sign}(\dot{w}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{V}} \right) + \frac{V}{R_L} &= 0 \end{aligned} \quad (8 \text{ a, b})$$

Los últimos dos términos de (8 a) corresponden al trabajo de las fuerzas no conservativas, lineal y no lineal (Stanton et. al. 2010, Machado et. al 2020). Operando desde (8 a, b), expandiendo y discretizando el desplazamiento modal como $w(r, t) = \sum_{k=1}^3 \phi_{(k),n}(r) q(t)$, y normalizando se llega al sistema de ecuaciones diferenciales

$$\begin{aligned} \ddot{q}(t) + \omega^2 q(t) + \xi \dot{q}(t) - KNq^2(t) \text{sign}[q(t)] - v(t)\theta_p - \theta_{pn}v(t)q(t) \text{sign}(q) \\ - KGq^3(t) + C_n \dot{q}(t) \dot{q}(t) \text{sign}[\dot{q}(t)] = -\rho A \ddot{g} \\ \frac{v(t)}{R_L} + 2\pi r \frac{\epsilon_{33}}{h_p} v(t) + \theta_p \dot{q}(t) + \psi_{pn} \dot{q}(t) q(t) \text{sign}[q(t)] = 0 \end{aligned} \quad (9 \text{ a, b})$$

Resultados

La Tabla 1 muestra las dimensiones geométricas del dispositivo, los valores mecánicos y eléctricos. Se realizaron barridos en frecuencia entre 130 Hz y 170 Hz, con valores de excitación en unidades de $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ a saber: 0.1g, 0.2g, 0.5g y 1.0g, resistencia $R = 9.1 \text{ k}\Omega$, amortiguamiento lineal $\xi = 0.1$ y no lineal $\xi_{NL} = 0.016$

d_m	13.25 mm	d_s	36 mm	E_s	97 GPa	S_{11}^E	62.3GPa
h_m	7 mm	h_s	0.1 mm	ρ_s	7850 kg/cm ³	ρ_p	7500 kg/cm ³
d_{mc}	6 mm	d_p	23.5 mm	ν_s	0.31	d_{31}	125 10 ⁻¹² C/m ²
h_{mc}	6 mm	h_p	0.1 mm	C_p	8.15 10 ⁻¹⁵ Fa	S_{111}^E	-2.685 10 ⁻¹² 1/Pa

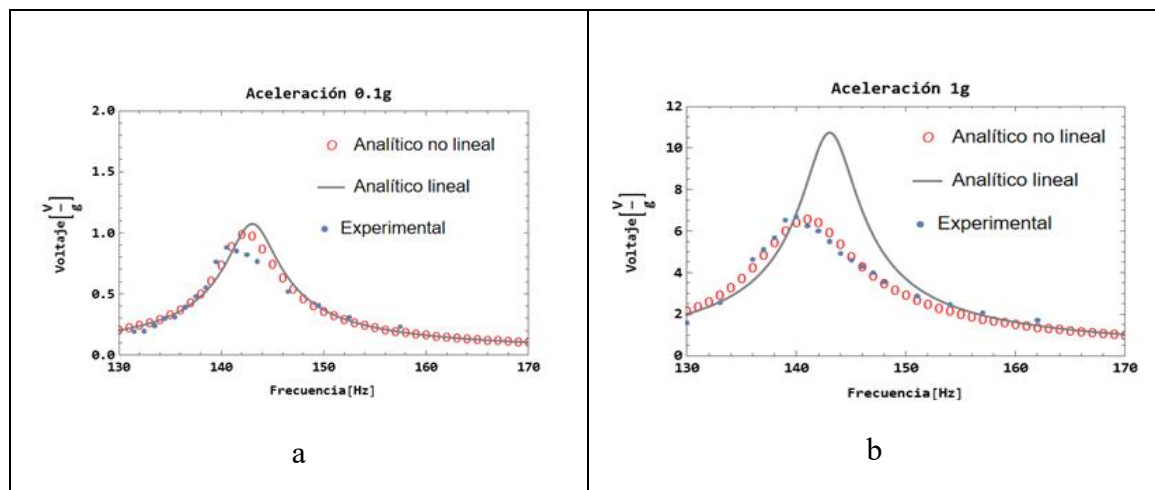
Tabla 1 a), b) Dimensiones geométricas, valores mecánicos y eléctricos del dispositivo

La configuración del ensayo se muestra en la Figura 2). La señal de entrada se realiza mediante un generador de ondas Rigol DG4062, se amplifica para ingresar a un shaker Labworks ET-132. La respuesta es medida por un acelerómetro PCB Piezotronics (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. Las Figuras 4 (a, b) muestran curvas de generación de los modelos lineal, no lineal y experimental para excitación 0.1g y 1g. El modelo lineal se obtiene haciendo cero todos los parámetros no lineales en la formulación (Ecuaciones 9 a, b).



Figura 2. Esquema de ensayo en laboratorio.

Las Figuras 3 (a, b) muestran curvas de generación de los modelos lineal, no lineal y experimental para excitación 0.1g y 1g. El modelo lineal se obtiene haciendo cero todos los parámetros no lineales en la formulación (Ecuaciones 9 a, b). Puede observarse que para una aceleración de 0.1g la influencia de términos no lineales en la generación es insignificante, y por ello hay una buena predicción en la generación entre los modelos lineales, no lineales y los resultados experimentales. Sin embargo, cuando la aceleración es de 1g aparecen 2 efectos distintivos vinculados con efectos de la no linealidad. Por un lado, el modelo lineal arroja valores superiores de generación tanto a los no lineales como a los experimentales. La buena predicción del modelo no lineal se debe principalmente a la disipación no viscosa definida en la Ec. (8 a) que actúa como amortiguamiento. El segundo efecto que se observa, conocido como softening, es un corrimiento en la frecuencia de resonancia hacia la izquierda y se debe principalmente al término constitutivo no lineal S_{111}^E .



Figuras 3 (a, b). Curvas de generación para modelos lineal, no lineal y experimental

Conclusiones

Los modelos lineales presentan limitaciones a la hora de predecir la generación de energía cuando los recolectores son sometidos a altas aceleraciones. En este artículo se presenta un nuevo modelo no lineal de placas circulares que es capaz de predecir correctamente la recolección de energía para diferentes niveles de aceleración. En el modelo se incluyen términos de orden superior en las tensiones radiales y transversales para

el material piezoeléctrico y también para el desplazamiento eléctrico. Para validar el modelo, se contrastaron los resultados analíticos con resultados experimentales para diferentes niveles de excitación. En los casos de bajas aceleraciones, la generación de voltaje tiene una buena aproximación entre modelos lineales, no lineales y resultados experimentales, situación que se da en cercanías a la frecuencia de resonancia y fuera de esta. Para altas aceleraciones se evidencian desfases en frecuencia y en los valores de generación entre ambos modelos analíticos, siendo la diferencia en generación de 1.35 Volts y 4.3 Volts respectivamente. No obstante, se mantiene la concordancia en generación entre el modelo no lineal y los valores experimentales. Esta buena predicción del modelo no lineal se debe principalmente al término de disipación viscosa no lineal definido en la Ec. (8 a). Observando la Fig. (3 a) la generación para 0.1g pareciera que no se ve afectada por los efectos no lineales, siendo del orden de 1Volt. El efecto softening también se acrecienta a medida que aumenta el valor de la excitación, llegando el corrimiento a valores cercanos a los 2 Hz. para el caso de bajas aceleraciones y altas aceleraciones. Como síntesis del trabajo se infiere que el modelo no lineal se ajusta muy bien tanto para bajas aceleraciones como para altas aceleraciones. Para bajas aceleraciones converge de idéntica manera con las predicciones del modelo lineal. La consideración de efectos no lineales es de gran importancia en situaciones de altas aceleraciones, situación que se estima sean las condiciones de trabajo del recolector de energía. Se propone como futuro trabajo, verificar la convergencia del modelo no lineal propuesto para mayores aceleraciones a 1g.

Referencias

- Chen X R, Yang T Q, Wang W and Yao X. "Vibration energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm". *Ceram. Int.* 38 S271-4, 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.
- Haterbouch M., Benamar R. "The effects of large vibration amplitudes on the axisymmetric mode shapes and natural frequencies of clamped thin isotropic circular plates. Part I: iterative and explicit analytical solution for non-linear transverse vibration". *Journal of Sound and Vibration*. 265 – (123 – 154). 2003
- Leadenham S. and Erturk, A. "Unified nonlinear electroelastic dynamics of a bimorph piezoelectric cantilever for energy harvesting, sensing, and actuation". *Nonlinear Dynamics*. Vol. 79, pp. 1727-1743, 2015.
- Machado S., Febbo M., Gatti C., Osinaga S. "A Piezoelectric beam model whit geometric, material and damping nonlinearities for Energy Harvesting". *Smart Materials and Structures* 29 – 2020.
- 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.
- Sodano H., Inman D. J. and Park G. A review of power Harvesting from vibration using piezoelectric materials. *Shock Vib. Dig.* 36. 197-206, 2004.
- Stanton S. C, Erturk A, Mann B. P, and Inman D. J. "Nonlinear piezoelectricity in electroelastic energy harvesters: Modeling and experimental identification," *Journal of Applied Physics*, vol. 108, p. 074903, 2010.
- 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.