

Casos de estudio de recolección de energía por vibraciones con piezoelectricos de geometría circular.

Vibration energy harvesting with a piezoelectric circular diaphragm (buzzer)

Presentación: xx/10/2024

Carlos Vera

GIMAP – UTN – FRBB

cvera@frbb.utn.edu.ar

Sebastián Machado

GIMAP – UTN – FRBB. CONICET

smachado@frbb.utn.edu.ar

Mariano Febbo

IFISUR – UNS - CONICET

mfebbo@uns.edu.ar

Resumen

En el presente trabajo se exponen resultados experimentales y numéricos de estudios realizados en recolectores de energía que piezoelectricos de geometría circular, conocidos comercialmente como buzzer. Estos recolectores 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. En particular, los buzzer estudiados agregan a la configuración circular una masa de oscilación con el objetivo de sintonizar frecuencias específicas de trabajo y también aumentar la potencia generada. Se exponen resultados experimentales y analíticos para dos configuraciones de vinculación diferentes, y comparaciones con modelos de elementos finitos utilizando el programa COMSOL Multiphysics®. En todos los casos estudiados, se puso énfasis en la generación de energía en frecuencias de resonancia, valores que se determinan de manera experimental y que deviene de la frecuencia de resonancia en cercanías al motor de una máquina cosechadora de marca John Deere, a la que se pretende asistir con sensores de ignición y así prevenir incendios en este tipo de equipos.

Palabras clave: Recolección de energía, piezoelectricidad, vibraciones

Abstract

Experimental and numerical results of studies carried out on piezoelectric energy harvesters with circular geometry, buzzers. These harvesters allow a wide versatility of use in the recovery of energy from vibratory sources, basically coming from common phenomena in the field of engineering. A circular mass is attached to the setup to tune working frequencies and also increasing the generated power. Experimental results are presented for 2 different link configurations, and comparisons with finite element models using the COMSOL Multiphysics® program. In all the cases studied, emphasis was placed on the generation of energy at resonance frequencies, values that are determined experimentally and that comes from the resonance frequency near the

engine of a John Deere brand harvester, which is intended to be assisted with ignition sensors and thus prevent fires in this type of equipment.

Keywords: Energy harvesting, piezoelectricity, vibration.

Introducción

La generación de energía eléctrica desde fuentes vibratorias a través del fenómeno piezoelectrónico 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 vibratoria 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, más 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. Por otro lado, el recambio de baterías no solo en muchas ocasiones es de alto costo, sino que también pueden tenerse dificultades para el acceso al recambio en las estructuras que ser quieren sensar.

Entre las configuraciones geométricas para recolectores de energía, son ampliamente conocidos los estudios realizados sobre aquellos que tienen como elemento generador de electricidad estructuras del tipo viga, siendo los más destacados los que utilizan vigas 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 piezoelectrónicos de geometría circular, conocidos como buzzer. Estos constan de un material PZT sobre un sustrato metálico de latón, teniendo ambas estructuras la forma de discos (Xu-rui Chen et al. 2012; Palosaari J. et al. 2014; Yangyiwei Yang et al. 2017; Yangyiwei Yang et al. 2018). En particular, es muy conocido también adosar al dispositivo generador una masa oscilante, en el caso de los buzzer, ubicada en su centro.

En el presente artículo se muestran resultados de comparaciones experimentales, y a través de modelos analíticos unidimensionales y tridimensionales en elementos finitos, de dos recolectores con diferentes vinculaciones. En un caso la vinculación evita una restricción completa de toda la circunferencia del buzzer. Esto se materializa restringiendo 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. Esta disposición permite flexibilizar el dispositivo recolector y disminuir así el tamaño de la masa de oscilación para similares valores de generación. 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). La otra vinculación se materializa con un empotramiento a lo largo de toda la circunferencia del latón, obteniendo de esta manera los clásicos modos normales de vibración de placas circulares. En ambos casos, la masa adherida al PZT se calcula de tal manera que su tamaño permite la sintonización del dispositivo a la frecuencia de trabajo, lo que provoca una mayor deformación del PZT y por ende, mayor generación de energía. Cabe aclarar que en ambos casos de estudio la frecuencia de resonancia coincide con la de trabajo, y son frecuencias donde los desplazamientos del dispositivo son máximos.

Es importante mencionar que el interés en utilizar este tipo de configuración para los recolectores 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.

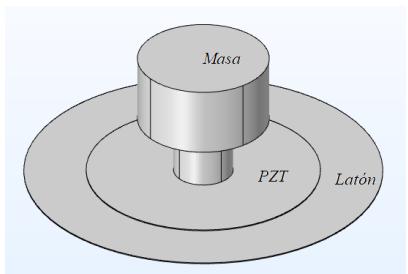
La motivación del estudio de estos tipos de dispositivos de geometría circular está sustentada en el diseño de un recolector de energía para alimentar una estación de sensado autónomo en maquinarias agrícolas. La estación de sensado se propone montar en máquinas cosechadoras para monitorear posibles 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, y que por ende 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



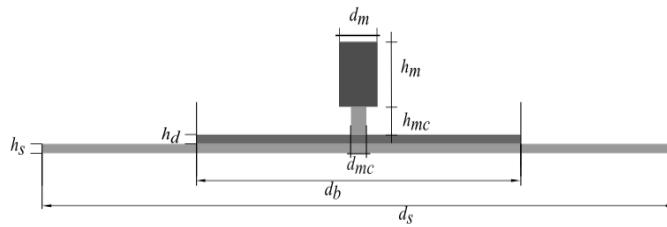
máquina cosechadora, y para condiciones de carga que son similares a las que necesita una estación autónoma de sensado.

Desarrollo

En la Figura 1 (a, b) se muestran el modelo de recolector y las dimensiones principales en corte.



a. Modelo de recolector



b. Dimensiones

Figura 1 (a, b). Modelo de recolector y dimensiones en corte.

En tanto, en la Figura 2 (a, b) se muestran los dos casos de estudio experimental.

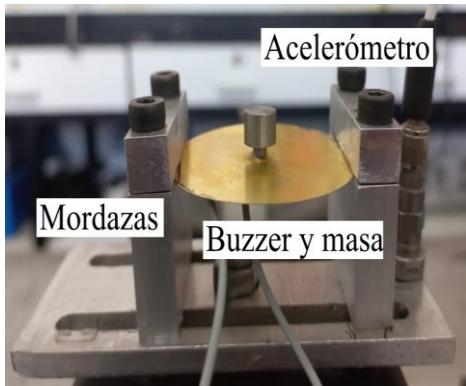


Fig. 2 a) Sujeción de mordazas paralelas.

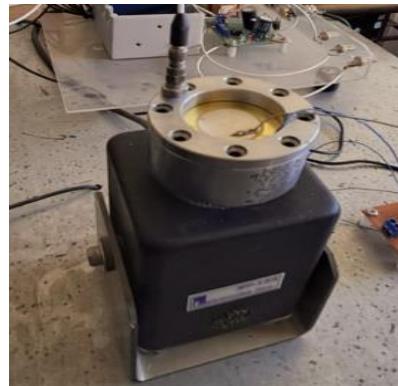


Fig. 2 b) Empotramiento total

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), que definen como variables mecánicas a **T** (tensor de tensión mecánica), **S** (tensor de deformación mecánica), y como variables eléctricas a **D** (vector de deformación eléctrica) y **E** (vector campo eléctrico).

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

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

en la que **s** es la matriz de flexibilidad, **d** es la matriz de acoplamiento electromecánico y **ε** 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 **c** = matriz (o tensor) elástico y **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

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

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

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

Se presentan a continuación dos ejemplos de estudios realizados. Para ambos estudios en la Tabla 1 figuran las constantes y dimensiones del buzzer. En la Tabla 2 se indican las dimensiones de la masa oscilante para el caso del buzzer sujeto a mordazas. En todos los casos, la tolerancia en peso de la masa es de $\pm 0.01\text{gr}$.

Sustrato (Brass)		PZT 5H	
Y_B	97 GPa	Y_P	8.23 GPa
ρ_B	7850 kg/m ³	ρ_P	7500 kg/m ³
v_B	0.31	v_P	0.31
d_B	41 mm	d_P	22 mm
h_s	0.1 mm	h_P	0.1 mm
----	----	d_{31}	$125 \times 10^{-12} \text{ C/m}^2$

Tabla 1. Valores mecánicos y estructurales del buzzer.

Caso sujeción por mordazas	Dimensiones de la masa		Masa
	d_m	7mm	
	h_m	5.3 mm	1.71 gr
	d_{mc}	3 mm	
	h_{mc}	2 mm	

Tabla 2. Dimensiones de la masa de oscilación.

La determinación del voltaje generado se realiza mediante el 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. Para la parte experimental, se excita 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. En todos los casos lo que se obtiene es la respuesta en frecuencia de generación de voltaje.

La Figura 3 muestra resultados de la comparación entre los valores experimentales y los obtenidos con COMSOL Multiphysics para el caso del buzzer sujetos por mordazas. En la Figura 4, se muestra el modo de vibración que se obtiene.

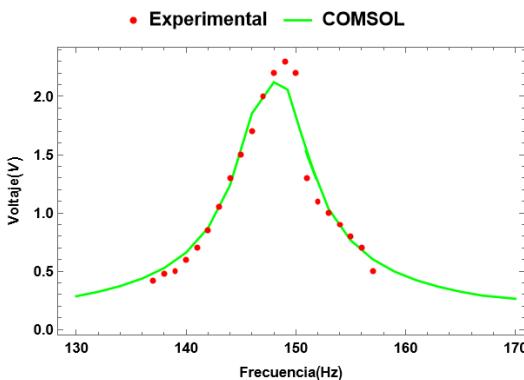


Figura 3. Generación para sujeción con mordazas

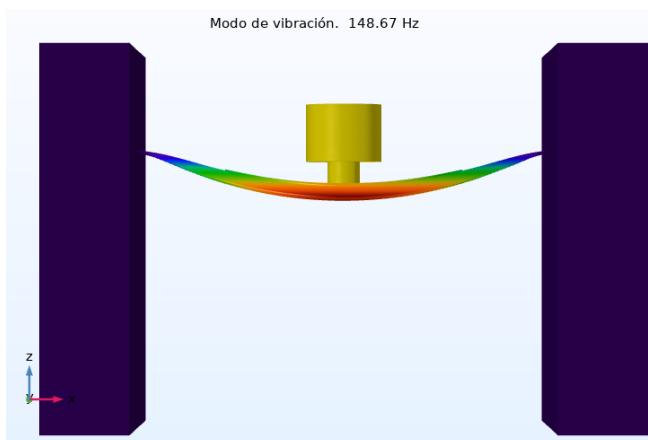


Figura 4. Modo de vibración para sujeción con mordazas

El estudio para la condición de empotramiento total a lo largo de la circunferencia se realiza a través de la comparación de generación entre un modelo analítico unidimensional con un modelo tridimensional en COMSOL. Las dimensiones de la masa de oscilación para este caso se muestran en la Tabla 3.

Caso empotramiento total	Masa	
d_m	10 mm	8 gr
h_m		
d_{mc}		
h_{mc}		

En la Figura 5 se muestra el modo y el mallado para el modelo tridimensional en COMSOL.

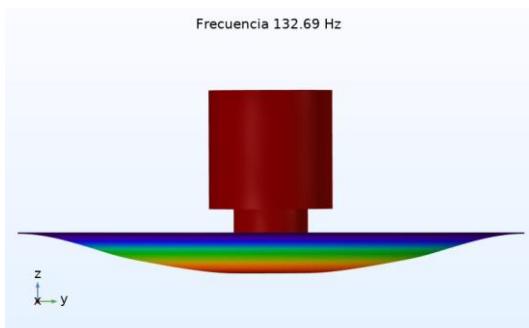


Fig. 5a) Modo flexional

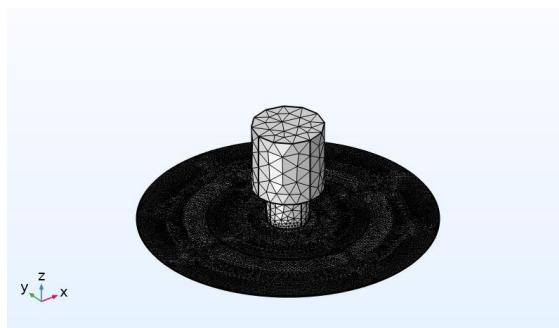


Fig. 5b) Mallado

Figura 5. Modo flexional y mallado para modelo 3D



En tanto que en la Figura 6, se muestra la comparación entre la respuesta en frecuencia de generación de voltaje para ambos modelos.

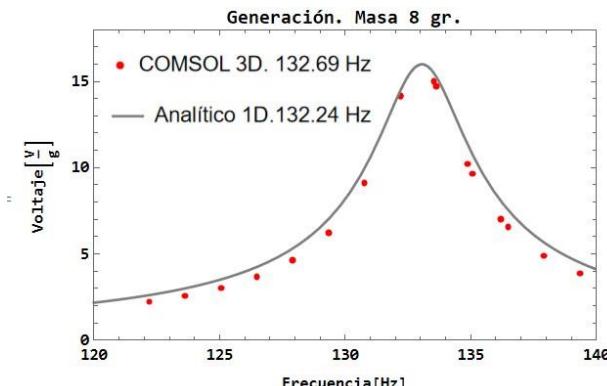


Figura 6. Generación para empotramiento total

Conclusiones

La generación de voltaje desde fuentes vibratorias es una disciplina que viene ganando amplio espacio de estudio en los últimos años. La necesidad de contar con energías limpias a niveles de baja potencia hace que cada vez más se estudien dispositivos que recolectan esa energía a través del fenómeno piezoelectrónico, en vistas a que desde esas fuentes se alimenten estaciones de sensado autónomas, en las que el cableado o el recambio de baterías sea complicado y de alto costo de mantenimiento.

En este trabajo se presentaron estudios numéricos y experimentales realizados sobre dispositivos recolectores de energía desde fuentes vibratorias pero cuya geometría es circular, conocidos comercialmente como buzzer. A estos dispositivos se le adhirió en su centro una masa de oscilación con el objeto de mejorar la generación y también para sintonizar la frecuencia de resonancia del buzzer a la frecuencia de trabajo. Los estudios presentados se refieren a dos tipos de vinculación diferente. En un caso, 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 para este caso de 150 Hz, valor que se determina de mediciones experimentales en campo sobre una máquina cosechadora comercial. En el otro caso de estudios, se compararon resultados numéricos de un modelo analítico unidimensional del dispositivo recolector con un modelo tridimensional construido bajo la plataforma COMSOL Multiphysics. En este último caso la condición de borde considerada fue de empotramiento a lo largo de toda la circunferencia. En todos los casos de estudio la excitación armónica fue de 1 G, con una resistencia de 10 Kohm, y se realizaron barridos en frecuencia en un ancho de banda entre 130 Hz y 170 Hz.

Para el 1º caso de estudio, la generación es de 2.12 V para una frecuencia resonante de 148,67 Hz. En tanto para el 2º caso de estudio la generación del modelo analítico es unidimensional llega a un valor pico de 16.1 V a una frecuencia de 132.69 Hz. En este caso, se puede observar un buen mayor ancho de banda de convergencia para el estudio, siendo esto de mucha importancia para las predicciones de generación de energía. En ambos casos de estudio, las predicciones analíticas guardan una muy buena aproximación con los resultados de laboratorio.

Se destaca que los estudios presentados son ampliados para mayor un número mayor de experimentos de laboratorio y analíticos, en los que se estudian la influencia de la superficie de contacto de la masa oscilante en la generación, la amplitud de desplazamiento modal y la amplitud del desplazamiento en resonancia. También se compararon valores de generación con distintos tamaños y disposiciones de la masa de oscilación.

Es de destacar que se está trabajando en modelos analíticos lineales y no lineales para realizar ajustes en la predicción de generación de voltaje, de manera de incluir este tipo de recolectores en unidades de sensado de fuego en máquinas agrícolas.

Todos los estudios realizados en el presente están vinculados a la alimentación de una estación de sensado autónoma para la prevención de incendios en maquinaria agrícola, concretamente cosechadoras de cereal fino y grueso, proyecto que cuenta con financiamiento PID UTN desde el año 2021.

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., Couquin G. A. and Welsh F. S. *IEEE standard on piezoelectricity IEEESTD.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.