

## MICRO GENERADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADOS EN DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS

Ahmad E. Guennam <sup>a</sup>, Bibiana M. Luccionia <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán  
Av. Pres. Gral. J. A. Roca 1800, T4000ACR San Miguel de Tucumán, Argentina.  
Tel /FAX: 54-(0381)-4364087

<sup>b</sup> CONICET

e-mail: [eguennam@herrera.unt.edu.ar](mailto:eguennam@herrera.unt.edu.ar), web page: <http://www.herrera.unt.edu.ar/iest/>

**Palabras claves:** Micro generadores, Piezoeléctrico, Espacio de Estados, Elementos Finitos.

**Resumen.** Los dispositivos piezoeléctricos polarizados con electrodos interdigitales presentan un alto nivel de acoplamiento electromecánico, ya que la disposición y topología de los electrodos permiten que la dirección principal de polarización coincida con la dirección axial de las fibras piezoeléctricas. Esta es una de las razones por las que los nombrados dispositivos han sido objeto de numerosos trabajos de investigación en la última década. Otras características están relacionadas con la resistencia al daño, alta anisotropía y elevada capacidad para alojarse en estructuras de forma compleja.

En este trabajo se estudia el caso de micro generadores de energía eléctrica basados en la disposición de dispositivos piezoeléctricos del descrito anteriormente en estructuras, que se sabe, estarán sometidas a importantes niveles de vibraciones durante su vida de servicio.

A partir del modelo matemático del sistema se obtienen las ecuaciones de elementos finitos y se introduce el efecto de la red eléctrica conectada a los electrodos de los dispositivos piezoeléctricos. Al realizar las transformaciones a las ecuaciones originales se obtienen las mismas en el espacio de estados, con lo que se estudian las variaciones de amortiguamiento, frecuencias naturales y potencia disipada en función de los valores de resistencia eléctrica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Ciertos materiales piezoeléctricos exhiben importantes niveles de acoplamiento electromecánico, lo cual resulta de gran utilidad en aplicaciones como control de vibraciones, microposicionamiento y microgeneración de energía eléctrica. Ésta última aplicación hace uso del efecto piezoeléctrico directo, es decir la aparición de cargas eléctricas en las superficies del material como consecuencia de la distorsión del mismo (Lesieutre et al. 2004).

En una estructura dotada de dispositivos piezoeléctricos, la conexión de un circuito disipativo (resistivo) o un circuito que transfiera la energía a una batería, produce, necesariamente, un amortiguamiento de las vibraciones mecánicas, (Lesieutre et al. 2004). Numerosos autores han investigado el tema de amortiguamiento producido por la disipación de energía en una red eléctrica pasiva conectada a dispositivos y laminados piezoeléctricos. Hagoood y Flotow (1991), analizaron el efecto de conectar resistencias e inductores a los terminales de dispositivos piezoeléctricos adheridos a una viga en voladizo, observaron que el efecto producido por la conexión de las resistencias era de naturaleza similar a la presencia de un material viscoelástico. Saravanos (1999) analizó el amortiguamiento en placas laminadas y la variación del mismo con el valor de resistencia eléctrica.

En los últimos diez años ha surgido la idea de “captar” energía del entorno de operación de ciertas máquinas y mecanismos para transformarla en energía eléctrica y alimentar dispositivos de monitoreo, cuando éstos operan en ambientes remotos o cuando se encuentran completamente aislados del medio externo (Williams and Yates, 1996; Chandrakasan et al. 1999; Lu et al. 2004) .

El presente artículo presenta el análisis numérico de un sistema micro generador de energía eléctrica que aprovecha las vibraciones impuestas o inducidas por el entorno. El sistema está compuesto por una estructura flexible de tipo cajón cerrado de paredes delgadas con rigidizadores longitudinales en cuyo recubrimiento se encuentran adheridos parches piezoeléctricos polarizados con electrodos interdigitales, del tipo utilizado en control activo de vibraciones, (Guennam y Luccioni 2006). Usando el método de elementos finitos, el concepto de espacio de estado y la resolución de las ecuaciones con herramientas numéricas del paquete Matlab, se evalúan las características del conjunto. Se evalúan y cuantifican, en el dominio del tiempo y la frecuencia, la energía eléctrica generada, los desplazamientos y los niveles de amortiguamiento experimentados por la estructura.

## 2. ANÁLISIS DEL SISTEMA

Las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de la estructura analizada, se resuelven utilizando el método de elementos finitos. En la literatura se encuentra una gran cantidad de trabajos que abordan el análisis del continuo piezoeléctrico con el método de elementos finitos y numerosos elementos han sido propuestos, Benjeddou (2000) presenta un estudio sobre los avances y tendencias en formulaciones y aplicaciones del método de elementos finitos destinados a la modelación de estructuras que utilizan materiales piezoeléctricos.

Teniendo en cuenta la presencia de grados de libertad mecánicos y eléctricos, la ecuación matricial de elementos finitos que plantea el equilibrio dinámico del problema acoplado, puede expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} [M_{mm}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}_m\} \\ \{\ddot{q}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{mm}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{q}_m\} \\ \{\dot{q}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{mm}] & [K_{me}] \\ [K_{em}] & [K_{ee}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q_m\} \\ \{q_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_m\} \\ \{F_e\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $\{q_m\}$  y  $\{q_e\}$  son, respectivamente, los vectores de desplazamientos mecánicos y potenciales eléctricos nodales.  $[M_{mm}]$  y  $[C_{mm}]$  son las matrices de masa y amortiguamiento respectivamente y  $[K_{mm}]$ ,  $[K_{me}]$  y  $[K_{ee}]$  son las matrices de rigidez mecánica, de acoplamiento electromecánico y dieléctrica respectivamente.

Para la resolución de las ecuaciones dinámicas que surgen del planteo del problema, se puede emplear el concepto de estado. Así, la ecuación (1) puede reestructurarse de manera tal de obtener la equivalente ecuación de estado del sistema en la forma convencional siguiente:

$$\begin{aligned} \{\dot{x}(t)\} &= [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \\ \{y(t)\} &= [C]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $\{x(t)\}$  es el vector de estado,  $\{u(t)\}$  es el vector de entrada e  $\{y(t)\}$  el vector salida del sistema. Por otra parte,  $[A]$  es la matriz del sistema y  $[B]$  la de entrada del sistema, mientras que  $[C]$  y  $[D]$  son las de salida.

Para obtener las matrices del sistema y de entrada, resulta conveniente realizar una partición de la ecuación (1) en término de grados de libertad libres y prescriptos, tanto mecánicos como eléctricos, con lo cual se obtiene la ecuación (3), donde los subíndices m y e indican grados de libertad mecánicos y eléctricos respectivamente y l y p libres y prescriptos.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_{mm}^{ll}] & 0 & [M_{mm}^{lp}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ [M_{mm}^{pl}] & 0 & [M_{mm}^{pp}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}_m^l\} \\ \{\ddot{q}_e^l\} \\ \{\ddot{q}_m^p\} \\ \{\ddot{q}_e^p\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{mm}^{ll}] & 0 & [C_{mm}^{lp}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ [C_{mm}^{pl}] & 0 & [C_{mm}^{pp}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{q}_m^l\} \\ \{\dot{q}_e^l\} \\ \{\dot{q}_m^p\} \\ \{\dot{q}_e^p\} \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} [K_{mm}^{ll}] & [K_{me}^{ll}] & [K_{mm}^{lp}] & [K_{me}^{lp}] \\ [K_{em}^{ll}] & [K_{ee}^{ll}] & [K_{em}^{lp}] & [K_{ee}^{lp}] \\ [K_{mm}^{pl}] & [K_{me}^{pl}] & [K_{mm}^{pp}] & [K_{me}^{pp}] \\ [K_{em}^{pl}] & [K_{ee}^{pl}] & [K_{em}^{pp}] & [K_{ee}^{pp}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q_m^l\} \\ \{q_e^l\} \\ \{q_m^p\} \\ \{q_e^p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_m^l\} \\ \{F_e^l\} \\ \{F_m^p\} \\ \{F_e^p\} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones acopladas y realizada la partición de las ecuaciones, se añaden las ecuaciones impuestas por la presencia de los elementos eléctricos. Finalmente, mediante una reestructuración de ecuaciones se obtienen las ecuaciones en el espacio de estados para el presente caso.

El potencial eléctrico permanece libre en correspondencia con los grados de libertad eléctricos a los que se conecta el circuito. Desarrollando las dos primeras ecuaciones resulta:

$$\begin{aligned} & [M_{mm}^{ll}] \{\ddot{q}_m^l\} + [C_{mm}^{ll}] \{\dot{q}_m^l\} + [K_{mm}^{ll}] \{q_m^l\} + [K_{me}^{ll}] \{q_e^l\} = \\ & = \{F_m^l\} - [M_{mm}^{lp}] \{\ddot{q}_m^p\} - [C_{mm}^{lp}] \{\dot{q}_m^p\} - [K_{mm}^{lp}] \{q_m^p\} - [K_{me}^{lp}] \{q_e^p\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$[K_{em}^{ll}] \{q_m^l\} + [K_{ee}^{ll}] \{q_e^l\} = \{F_e^l\} - [K_{em}^{lp}] \{q_m^p\} - [K_{ee}^{lp}] \{q_e^p\} \quad (5)$$

Agrupando los segundos miembros en un vector y renombrando las matrices y vectores correspondientes a grados de libertad libres se pueden escribir las dos primeras ecuaciones de la siguiente manera:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u + K_{Piezo} V = F \quad (6)$$

$$K_{Piezo}^T u + K_{Diel} V = Q \quad (7)$$

Donde

$$\begin{aligned} M &= [M_{mm}^{ll}] \\ C &= [C_{mm}^{ll}] \\ K &= [K_{mm}^{ll}] \\ K_{Piezo} &= [K_{me}^{ll}] \\ K_{Piezo}^T &= [K_{em}^{ll}] \\ K_{Diel} &= [K_{ee}^{ll}] \\ u &= \{q_m^l\} \\ V &= \{q_e^l\} \end{aligned} \quad (8)$$

Y además:

$$F = \{F_m^l\} - [M_{mm}^{lp}] \{\ddot{q}_m^p\} - [C_{mm}^{lp}] \{\dot{q}_m^p\} - [K_{mm}^{lp}] \{q_m^p\} - [K_{me}^{lp}] \{q_e^p\} \quad (9)$$

$$Q = \{F_e^l\} - [K_{em}^{lp}] \{q_m^p\} - [K_{ee}^{lp}] \{q_e^p\} \quad (10)$$

La corriente eléctrica es:

$$J = \frac{dQ}{dt} \quad (11)$$

Ecuación del circuito eléctrico compuesto de una resistencia y una inductancia en serie (circuito LR serie):

$$V = RJ + LJ \quad (12)$$

$$J = R^{-1}V - R^{-1}L\dot{J} \quad (13)$$

Planteando la derivada de (7) y reemplazando en ella la ecuación (13) resulta:

$$K_{Piezo}^T \dot{u} + K_{Diel} \dot{V} - R^{-1}V + R^{-1}L\dot{J} = 0 \quad (14)$$

Se puede expresar (6), (10) y (12) en una sola ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} M & 0_{a \times a} & 0_{a \times b} & 0_{a \times b} \\ 0_{a \times a} & I_{a \times a} & 0_{a \times b} & 0_{a \times b} \\ 0_{b \times a} & 0_{b \times a} & K_{Diel} & R^{-1}L \\ 0_{b \times a} & 0_{b \times a} & 0_{b \times b} & -L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{u} \\ \dot{V} \\ \dot{J} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & K & K_{Piezo} & 0_{a \times b} \\ -I & 0_{a \times a} & 0_{a \times b} & 0_{a \times b} \\ K_{Piezo}^T & 0_{b \times a} & -R^{-1} & 0_{b \times b} \\ 0_{b \times a} & 0_{b \times a} & I_{b \times b} & -R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ u \\ V \\ J \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Por consiguiente la matriz A y B resultan:

$$[A] = - \begin{bmatrix} M & 0_{a \times a} & 0_{a \times b} & 0_{a \times b} \\ 0_{a \times a} & I_{a \times a} & 0_{a \times b} & 0_{a \times b} \\ 0_{b \times a} & 0_{b \times a} & K_{Diel} & R^{-1}L \\ 0_{b \times a} & 0_{b \times a} & 0_{b \times b} & -L \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} C & K & K_{Piezo} & 0_{a \times b} \\ -I & 0_{a \times a} & 0_{a \times b} & 0_{a \times b} \\ K_{Piezo}^T & 0_{b \times a} & -R^{-1} & 0_{b \times b} \\ 0_{b \times a} & 0_{b \times a} & I_{b \times b} & -R \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} M & 0_{a \times a} & 0_{a \times b} & 0_{a \times b} \\ 0_{a \times a} & I_{a \times a} & 0_{a \times b} & 0_{a \times b} \\ 0_{b \times a} & 0_{b \times a} & K_{Diel} & R^{-1}L \\ 0_{b \times a} & 0_{b \times a} & 0_{b \times b} & -L \end{bmatrix}^{-1} \quad (17)$$

Las matrices de salida se construyen según la salida deseada. En el caso mas simple y en el que se desee conservar todo el vector de estado como salida se tratará de una matriz identidad.

Con el sistema replanteado en el espacio de estados resulta cómodo evaluar, en función de los valores de resistencia eléctrica, el movimiento de los polos del sistema en el plano complejo (lugar de raíces), la respuesta dinámica en estado estacionario en el dominio de la frecuencia y la respuesta temporal.

*Características modales:*

Planteando la transformada de Laplace de la ecuación de estado se obtiene:

$$sX(s) = [A]X(s) + [B]U(s) \quad (18)$$

Por lo tanto la transformada de Laplace del estado resulta:

$$X(s) = (s[I] - [A])^{-1} [B] U(s) \quad (19)$$

Por otra parte, la transformada de Laplace de la salida del sistema está dada por la siguiente expresión:

$$\{Y(s)\} = [C]\{X(s)\} \quad (20)$$

Reemplazando se obtiene una expresión que relaciona entrada con salida a través de un operador matricial, el mismo recibe el nombre de función de transferencia.

$$Y(s) = [C](s[I] - [A])^{-1}[B]U(s) \quad (21)$$

Teniendo en cuenta que:

$$(s[I] - [A])^{-1} = \frac{Adj(s[I] - [A])}{Det(s[I] - [A])} \quad (22)$$

la función de transferencia entre entrada salida, finalmente resulta:

$$F_{TRANS}(s) = [C] \frac{Adj(s[I] - [A])}{Det(s[I] - [A])} [B] \quad (23)$$

La ecuación característica del sistema se obtiene igualando a cero el denominador, es decir:

$$Det(s[I] - [A]) = 0 \quad (24)$$

Los valores de  $s$  que satisfacen la ecuación característica (24) son los polos del sistema. Si todos los parámetros, excepto el valor de la resistencia eléctrica, se mantienen inalterados, se pueden graficar el lugar geométrico del movimiento de  $s(R)$  en el plano complejo. En base a las raíces complejas  $s$ , se pueden obtener las frecuencias naturales  $\omega_n$  y los factores de amortiguamiento modales  $\zeta_n$  mediante las siguientes expresiones:

$$\omega_n = \|s_n\| \quad y \quad \zeta_n = -\frac{Re(s_n)}{\omega_n} \quad (25)$$

*Respuesta en frecuencia:*

Al excitar la estructura con una señal armónica de frecuencia variable dada por la expresión:

$$u(t) = U e^{j\omega t} \quad (26)$$

se obtiene la función de transferencia entre la entrada y la salida y se observa la respuesta en estado estacionario, también, para diferentes valores de la resistencia eléctrica.

Superado el régimen transitorio, la respuesta del sistema, o sea el vector de estado valdrá:

$$x(t) = [H_{xu}]U e^{j\omega t} \quad (27)$$

La matriz  $[H_{xu}]$  relaciona el estado del sistema con la entrada  $U$  en estado estacionario.

La derivada del vector de estado será:

$$\dot{x}(t) = j\omega [H_{xu}]U e^{j\omega t} \quad (28)$$

En régimen permanente se tiene:

$$j\omega [H_{xu}]U e^{j\omega t} = [A][H_{xu}]U e^{j\omega t} + [B]U e^{j\omega t} \quad (29)$$

Por lo tanto:

$$[H_{xu}] = (j\omega [I] - [A])^{-1} [B] \quad (30)$$

De igual manera, se pueden obtener matrices de respuesta en frecuencia de la salida del sistema:

$$[H_{yu}] = [C][H_{xu}] \quad (31)$$

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA ANALIZADA

Se trata de una estructura de tipo cajón cerrado, mono-celda, con rigidizadores longitudinales y costillas. En el recubrimiento se disponen parches piezoeléctricos orientados a  $\pm 45^\circ$ . La figura 1 detalla la geometría del sistema estudiado, donde se pueden observar los dispositivos de fibras piezoeléctricas adheridos a la piel del cajón. Se disponen los mismos de manera tal de maximizar el aprovechamiento de la energía contenida en las vibraciones torsionales de la estructura.

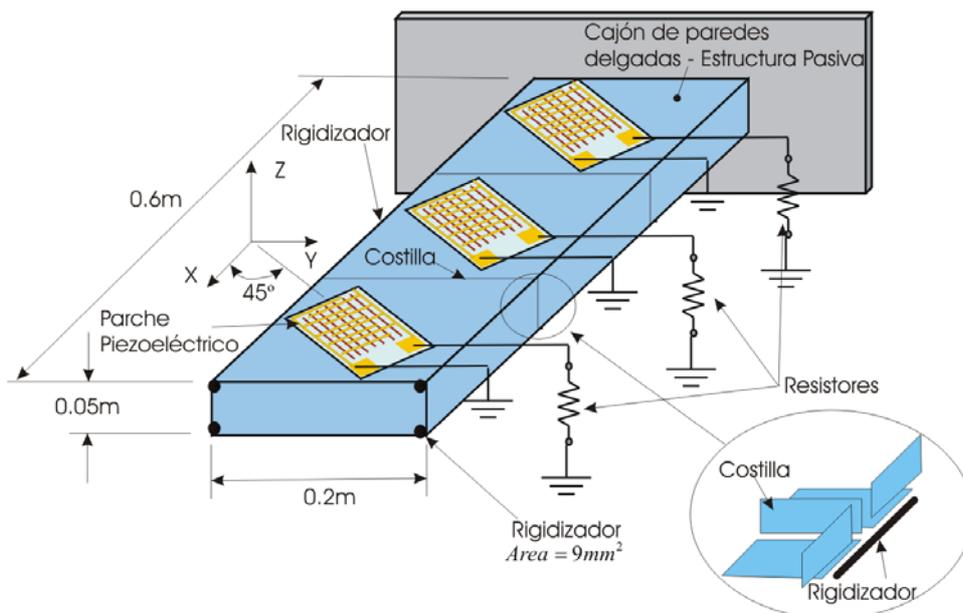


Figura 1: Estructura analizada.

Cada parche piezoeléctrico independiente posee dos terminales eléctricos que se conectan internamente a los electrodos interdigitales. Un terminal de cada parche se conecta a tierra mientras los restantes a resistencias que finalmente se conectan también a tierra. En los desarrollos de las ecuaciones se consideró el caso general de circuito inductivo resistivo (LR), sin embargo en el siguiente trabajo se considera solo una red pasiva resistiva pura.

En la zona activa, se emplean elementos de membrana piezoeléctrica en los que el campo eléctrico yace en el plano de los mismos (Guennam y Luccioni 2007). Las costillas y demás zonas pasivas se modelan con elementos de cáscara convencionales. Finalmente, para los rigidizadores se emplean elementos de barra axiales. En la tabla 1 se detallan las propiedades materiales de la cerámica y la resina del dispositivo piezoeléctrico empleado.

Propiedades electromecánicas de la cerámica PZT-5H								
Elástica (GPa)								
$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{22}$	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{55}$	$C_{66}$
130.6	85.66	135.8	88.3	90.42	121.3	23.47	22.99	22.99
Piezoeléctrica ( $C/m^2$ )					Dieléctrica ( $\times 10^{-8} F/m$ )			
$e_{15}$	$e_{26}$	$e_{31}$	$e_{32}$	$e_{33}$				
17.03	17.06	-6.9	7.07	22.9	1.27	1.27	1.51	
Densidad ( $Kg/m^3$ )								
7740								
Propiedades electromecánicas de la resina Epoxy								
Elástica (Gpa)								
$C_{11} = C_{22} = C_{33} = 8.0$					$C_{12} = C_{13} = C_{23} = 8.0$			
Dieléctrica ( $\times 10^{-9} F/m$ )					Densidad ( $Kg/m^3$ )			
1.51					900			

Tabla 1: Propiedades electromecánicas de la cerámica piezoeléctrica.

Los rigidizadores, costillas y largueros están contruidos con aluminio cuyas propiedades mecánicas se detallan en la [tabla 2](#).

Módulo Elástico (Gpa)
71.0
Módulo de Poisson
0.33
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
2713

Tabla 2: Propiedades mecánicas del aluminio.

En la [figura 2](#) se detalla el elemento de membrana piezoeléctrica utilizado para modelar la zona activa, ([Guennam y Luccioni, 2007](#)). El elemento posee un solo grado de libertad eléctrico y el campo eléctrico corre paralelo a las fibras piezoeléctricas.

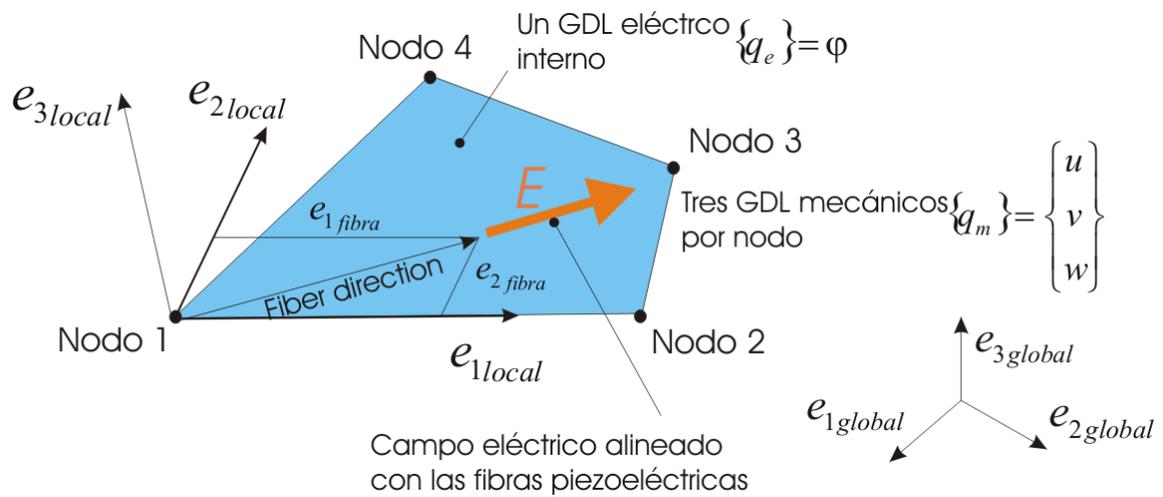


Figura 2: Elemento finito de membrana piezoeléctrica con el campo eléctrico contenido en su plano y un grado de libertad eléctrico interno.

La malla de elementos finitos se muestra en la [figura 3](#). En la misma se muestran los nodos retenidos durante el proceso de condensación de los grados de libertad mecánicos.

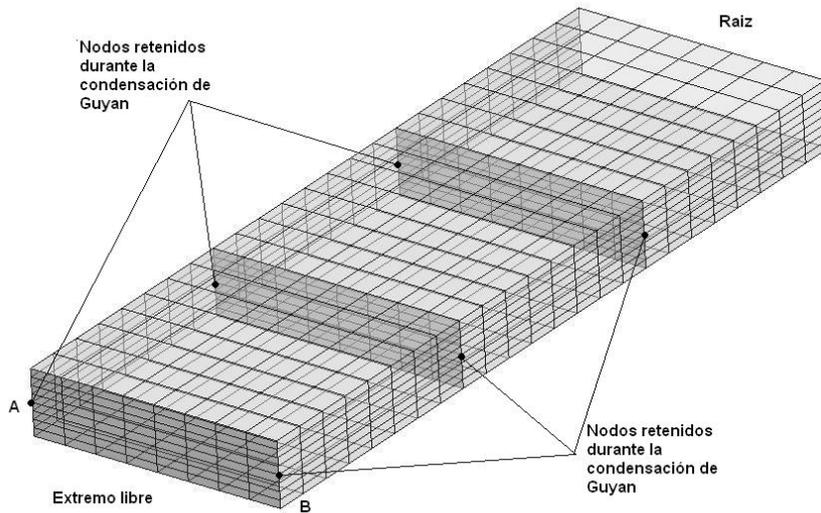


Figura 3: Malla de elementos finitos empleada.

#### 4. RESULTADOS

Los análisis realizados reflejan la influencia del valor de resistencia eléctrica, sobre la potencia generada en las zonas activas de la estructura. A partir de la evaluación de los parámetros modales se observa la existencia de valores de resistencia para los cuales el amortiguamiento es máximo y además una correspondencia con los valores de potencia disipada.

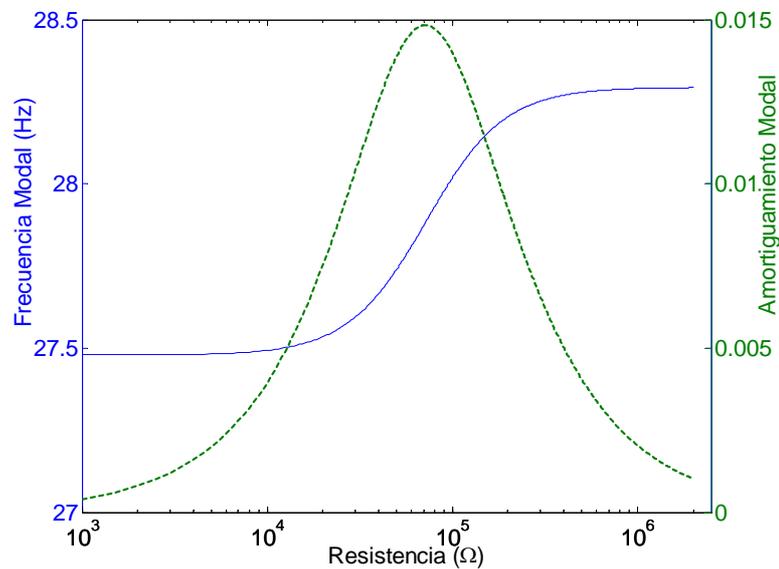


Figura 4: Amortiguamiento y Frecuencia natural - Primer Modo flexional.

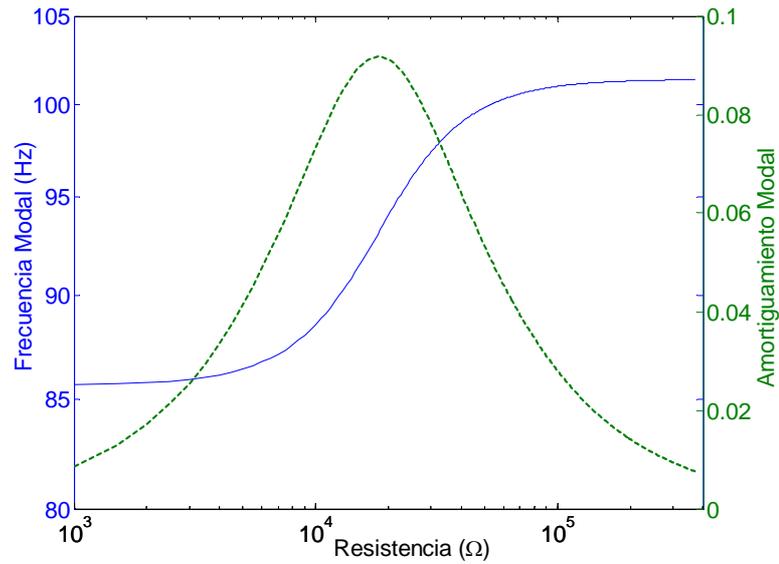


Figura 5: Amortiguamiento y Frecuencia natural - Primer modo torsional.

Los valores de resistencia eléctrica para los cuales el amortiguamiento adopta valores máximos, producen al mismo tiempo una rigidización de la estructura, lo cual se refleja en las figuras 4 y 5 a través del aumento en la frecuencia modal.

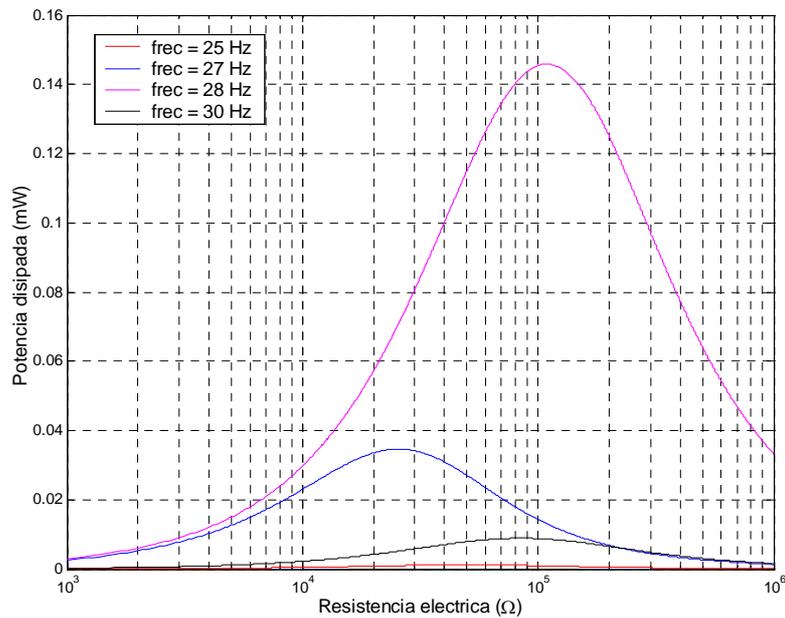


Figura 6: Potencia disipada en función de la resistencia eléctrica. Excitación flexional.

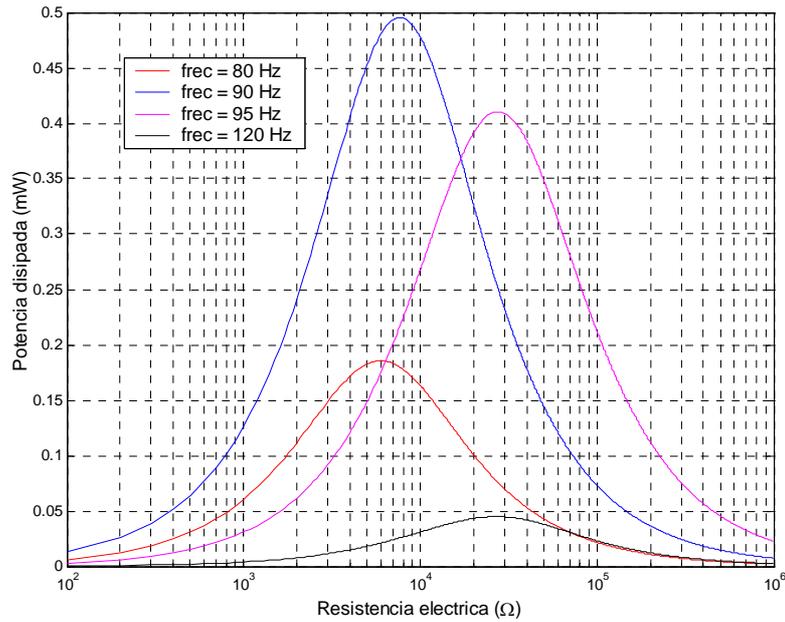


Figura 7: Potencia disipada en función de la resistencia eléctrica. Excitación torsional.

La variación de la potencia generada en función de la frecuencia de excitación y resistencia eléctrica conectada a los electrodos puede observarse en la [figura 6](#) para excitación flexional y [figura 7](#) para excitación torsional

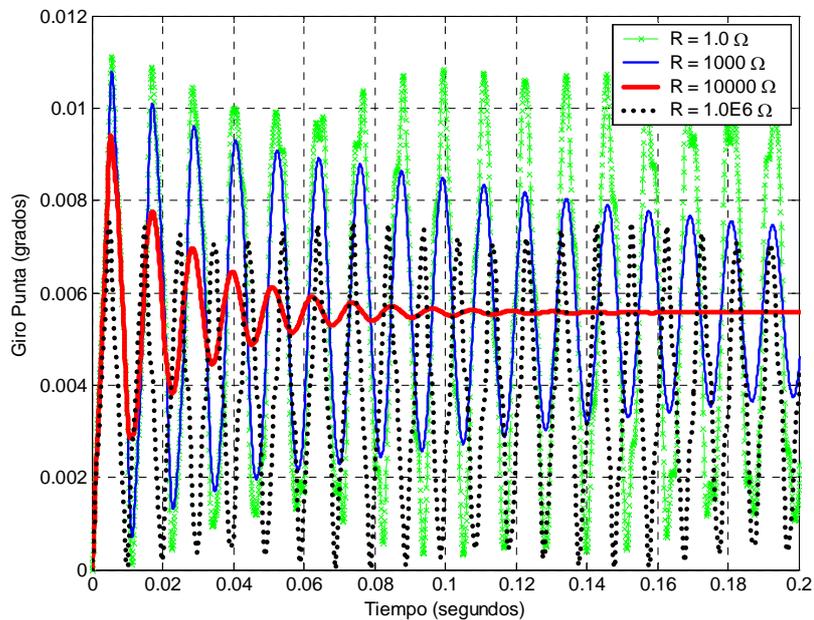


Figura 8: Respuesta temporal ante una momento torsor aplicado en el extremo libre modulado por una señal impulsiva.

La relación entre la potencia generada y la amplitud de las oscilaciones puede verse, para un valor de resistencias de  $2000\Omega$ , en la [figura 9](#), mientras que la [figura 10](#) presenta la respuesta para valores de resistencias de  $20000\Omega$ . En ambos casos, la excitación es una cupla aplicada en el extremo en forma de escalón de 0.5 segundos de duración y valor  $13.4 Nm$ .

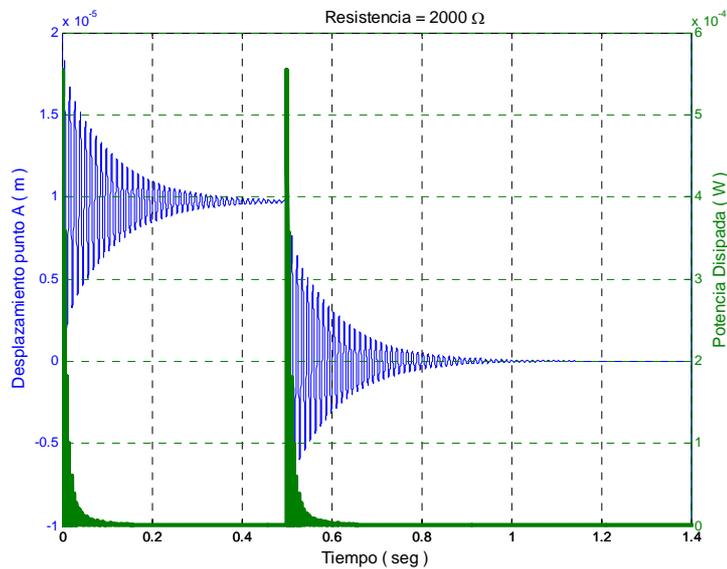


Figura 9: Respuesta temporal ante una momento torsor aplicado en el extremo libre modulado por una cupla de 0.5 duración.

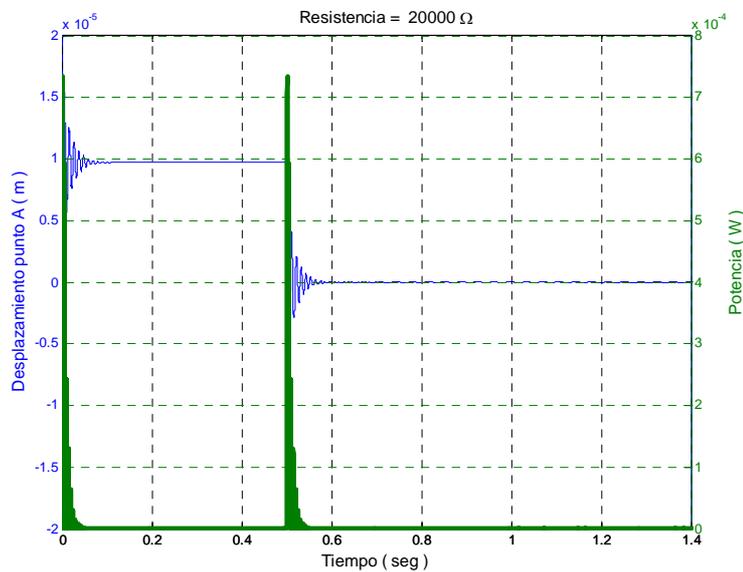


Figura 10: Respuesta temporal ante una momento torsor aplicado en el extremo libre modulado por una cupla de 0.5 segundos de duración.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se evalúa numéricamente el comportamiento de un sistema microgenerador de energía eléctrica basado en dispositivos piezoeléctricos montados en una estructura tipo cajón cerrado de paredes delgadas. El sistema aprovecha la energía mecánica que recibe del medio y al transformarla en energía eléctrica se produce en la estructura un amortiguamiento que se puede evaluar utilizando las herramientas numéricas descriptas.

La potencia extraída por la red eléctrica depende fuertemente de los valores de resistencia eléctrica de la misma. Los resultados obtenidos guardan concordancia con los presentados por otros autores para el caso de placas con laminados piezoeléctricos. La energía mecánica extraída del medio podría ser empleada para generar energía eléctrica en pequeñas escalas, lo que actualmente constituye un campo activo de investigación. Simultáneamente la red pasiva, contribuye a reducir las amplitudes de las vibraciones mecánicas del sistema.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo económico del CONICET.

## REFERENCIAS:

- Benjeddou A, Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey. *Computer and Structures*, 76: 347-363, 2000.
- Davis C, Lesieutre G, An actively tuned solid-state vibration absorber using capacitive shunting of piezoelectric stiffness, *Journal of Sound and Vibration* 232 601–617, 2000.
- Glynne-Jones P, Beeby S.P, White N.M, Towards a piezoelectric vibration-powered microgenerator, *IEEE Proceedings: Science, Measurement and Technology* 148 (2) 68–72, 2001.
- Guennam A.E, Luccioni B.M, FE modeling of a closed box beam with piezoelectric fiber composite patches. *Smart Materials and Structures*.15:1605-1615, 2006.
- Guennam A. E, Luccioni B. M. Variational form of motion equations for a piezoelectric solid. Enviado a *Journal of Sound and Vibration*, 2007.
- Hagood N.W and Von Flotow A Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. *Journal of Sound and Vibration*. 146 243–68, 1991.
- Lesieutre G A, Ottman G K and Hofmann H F. Damping as a result of piezoelectric energy harvesting. *Journal of Sound and Vibration*, 269: 991–1001, 2004.
- Lu F, Lee H.P. and Lim S. P, Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications. *Smart Mater. Struct.* 13 57–63, 2004.
- Saravanos D. Damped Vibration of Composite Plates with Passive Piezoelectric-Resistor Elements. *Journal of Sound and Vibration* 221(5) 867-885, 1999.
- White N M, Glynne-Jones P and Beeby S P. A novel thick-film piezoelectric micro-generator technical note. *Smart Mater. Struct.* 10: 850–852, 2001
- Williams C B and Yates R. Analysis of a micro-electric generator for microsystems *Sensors Actuators* 52: 8–11, 1996.