

# COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DE MOTORES PIEZOELÉCTRICOS KNL-NTS Y PZT A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

## COMPARISON OF EFFICIENCY OF KNL-NTS AND PZT PIEZOELECTRIC MOTORS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Juan D. Madrigal García<sup>a</sup>, Leandro Ramajo<sup>a</sup>, Federico J. Cavalieri<sup>b</sup> y Nicolás Pérez<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Instituto de Investigaciones Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), Universidad Nacional de Mar del Plata. [intema@intema.gov.ar](mailto:intema@intema.gov.ar).*

<sup>b</sup>*Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC)-UNL/CONICET, Predio CONICET Santa Fe, Colectora Ruta Nac. 168, Km 472, Paraje El Pozo, Santa Fe, Argentina.*

<sup>c</sup>*Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Av. Julio Herrera y Reissig 565, 11200 Montevideo, Uruguay.*

**Palabras clave:** piezoeléctricos sin plomo, motor lineal, método de elementos finitos.

**Resumen.** Las restricciones en el uso del plomo en procesos industriales, especialmente en materiales para electrónica está impulsando el desarrollo de nuevos materiales libres de plomo. Las cerámicas de niobato de sodio y potasio KNN han emergido como un candidato prometedor para sustituir al zirconato titanato de plomo PZT, el material más comúnmente empleado en la fabricación de actuadores, transductores, sensores y motores piezoeléctricos. En este trabajo, se desarrolló un modelo numérico de un motor lineal piezoeléctrico utilizando el método de los elementos finitos, con el objetivo de comparar el rendimiento de las cerámicas KNN y PZT. Se determinaron las frecuencias y modos de vibración que generan las mayores deformaciones en cada material. Los resultados de las simulaciones revelaron que la cerámica PZT presenta una deformación 20 veces mayor en comparación con la KNN. Esto sugiere que la cerámica KNN requiere de aditivos endurecedores para optimizar los desplazamientos en motores piezoeléctricos libres de plomo.

**Keywords:** lead-free piezoelectrics, linear motor, finite element method.

**Abstract.** The restriction on the use of lead in electronic components has prompted research into new piezoelectric materials in search of alternatives to traditional lead-based materials. Potassium sodium niobate (KNN) ceramics have emerged as a promising candidate to replace lead zirconate titanate (PZT), the most commonly used material in the manufacture of piezoelectric actuators, transducers, sensors and motors. In this work, a numerical model of a linear piezoelectric motor was developed using the finite element method to compare the performance of KNN and PZT ceramics. The frequencies and vibration modes that generate the largest deformations in each material were determined. The simulation results revealed that PZT ceramic exhibits 20 times greater deformation compared to KNN. This suggests that KNN ceramic requires hardening additives to optimize displacements in lead-free piezoelectric motors.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria ha mostrado un creciente interés por los actuadores y accionamientos piezoeléctricos ultrasónicos impulsado principalmente por el desarrollo de nuevas aplicación para sistemas de microposicionamiento. Los principales fabricantes han integrado estos actuadores en su gama de productos comerciales debido a la simplicidad para su diseño, convirtiéndolos en una opción cada vez más popular en el ámbito del microposicionamiento. Un motor piezoeléctrico es un tipo de motor eléctrico que utiliza el efecto piezoeléctrico inverso para producir una deformación o vibración del material piezoeléctrico cuando se le aplica un voltaje para luego generar en un movimiento específico. Uno de los diseños más destacados es el actuador ultrasónico, que consiste en la excitación simultánea de una placa piezoeléctrica en los modos longitudinal y de flexión. Este principio, desarrollado en los años 70, ha demostrado gran eficacia, lo que ha llevado a que la mayoría de los microposicionadores piezoeléctricos lineales disponibles hoy en día utilicen esta tecnología. Desde la década de 1950, el material más utilizado para la fabricación de motores piezoeléctricos ha sido el zirconato titanato de plomo (PZT), gracias a su elevado coeficiente piezoeléctrico ( $d_{33}$ ), que supera los 450 pC/N, lo que lo hace ideal para aplicaciones de alta precisión como sensores, transductores y actuadores. Sin embargo, el impacto ambiental del plomo ha generado preocupación y regulaciones estrictas que limitan su uso en componentes electrónicos, incentivando la búsqueda de alternativas más sostenibles (Zelikha et al., 2013).

Los motores piezoeléctricos ultrasónicos tienen una cantidad de ventajas comparadas con los motores electromagnéticos. En este sentido, los motores piezoeléctricos pueden alcanzar precisiones de posicionamiento en el rango nanométrico y micrométrico, además, estando apagados, mantienen su posición final beneficiando el consumo de energía. Por otro lado, la eficiencia de los motores electromagnéticos disminuye dependiendo si sus dimensiones se reducen mientras que, los materiales piezoeléctricos no tienen esa restricción. Otra ventaja adicional es la facilidad de diseño, convirtiéndolos muy atractivos para su uso como componentes de productos electrónicos (Kim et al., 2008).

Los motores piezoeléctricos pueden ser clasificados dependiendo del tipo de excitación en resonantes o forzados (Barolin et al., 2014). En general, estos motores constan de dos o más cerámicas piezoeléctricas conectadas a una estructura metálica (generalmente de aluminio debido a su alta flexibilidad), con formas y configuraciones específicas. Las cerámicas se excitan con voltajes eléctricos alternos con diferentes fases, las cuales generan la vibración de la estructura, denominada estator. El movimiento de vibración de la estructura metálica da como resultado la propagación de una onda mecánica que crea un movimiento elíptico en el punto de contacto del estator con una barra de metal delgada, llamada carro, que se mueve por fricción en dirección horizontal, como se ve en la Fig.1. El modo de conseguir ese movimiento elíptico en el punto de contacto depende tanto de la forma y disposición de las piezocerámicas como de la geometría de la estructura flexible que define el tipo de motor piezoeléctrico (Xiaouan et al., 2012). La creciente preocupación por el impacto ambiental de los materiales utilizados en la industria electrónica ha llevado a la implementación de regulaciones estrictas, como la restricción del uso de plomo en componentes electrónicos. Esta situación ha generado un impulso significativo en la investigación de materiales piezoeléctricos alternativos, ya que muchos de los piezoeléctricos tradicionales, como el PZT, contienen plomo en su composición. Uno de los candidatos más prometedores para reemplazar al PZT es el niobiato de sodio potasio (KNN), una cerámica piezoeléctrica libre de plomo que ha mostrado un gran potencial en aplicaciones como actuadores, transductores, sensores y motores piezoeléctricos debido a su alta piezoelectricidad y alta

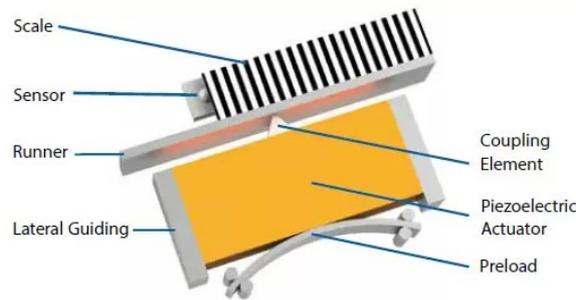


Figura 1: Modelo de un motor piezoeléctrico

temperatura de Curie (Saito et al., 2004). En este sentido, evaluar y comparar el desempeño de estos materiales alternativos para garantizar que puedan cumplir con los requisitos técnicos y operativos exigidos por las aplicaciones modernas resulta imperativo.

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un modelo de motor piezoeléctrico lineal utilizando dos tipos de cerámicas, la PZT-ACP880 comercial con plomo y la KNL-NTS libre de plomo desarrollado por difusión de estado sólido en el laboratorio, por los autores de este trabajo. Utilizando el método de elementos finitos se ha analizado la respuesta mecánica de ambos materiales en términos de los desplazamientos y de las frecuencias de resonancia con el objetivo final de analizar la viabilidad de utilizar la cerámica KNL-NTS libre de plomo en aplicaciones reales de ingeniería.

## 2. APROXIMACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El análisis de sistemas físicos suelen llevar a ecuaciones diferenciales parciales que no siempre tienen una solución analítica debido a la complejidad de las condiciones de frontera o del dominio. Para un análisis realista y detallado, se necesita recurrir a métodos numéricos para abordar el problema, siendo el método de los elementos finitos (MEF) uno de los más populares para resolver esta clase de problemas. Desde la década de 1970, ha habido un aumento considerable en la cantidad de investigaciones sobre la aplicación del MEF a sistemas piezoeléctricos. Con la aparición del concepto de estructuras activas, el número de publicaciones ha crecido significativamente en los últimos años.

Las ecuaciones que describen el fenómeno de acoplamiento electromecánico, especialmente en la piezoelectricidad, son complejas, lo que limita la posibilidad de obtener soluciones analíticas cuando las condiciones de frontera y el dominio tiene una geometría muy irregular. Por estas razones, el MEF se convierte en una herramienta numérica esencial y efectiva para resolver este tipo de problemas (Benjeddou, 2000; Avdiaj et al., 2009). Asumiendo que el material piezoeléctrico tiene un comportamiento lineal, ya que las cerámicas tienen pequeñas deformaciones, las variables mecánicas guardan una relación con las variables eléctricas según las siguientes dos ecuaciones,

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e} \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \mathbf{e}^T \mathbf{S} - \boldsymbol{\epsilon}^S \mathbf{E} \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $\mathbf{S}$  es el vector de deformación mecánica,  $\mathbf{T}$  es el vector esfuerzo o tensión mecánica,  $\mathbf{D}$  es el vector de densidad de flujo eléctrico y  $\mathbf{E}$  es el vector de campo eléctrico. Luego,  $\mathbf{c}^E$  es el tensor de rigidez elástico,  $\mathbf{e}$  es el tensor piezoeléctrico y finalmente  $\boldsymbol{\epsilon}^S$  es el tensor dieléctrico. Además, acorde a la configuración del cristal, PZT o KNL-NTS, el material requiere

de 10 parámetros independientes (obtenidos de manera experimental) para que se cumpla con la Ec.(1), éstos son, cinco parámetros mecánicos del tensor de rigidez,

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}^E - c_{12}^E}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

tres parámetros piezoeléctricos del tensor piezoeléctrico

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

y dos constantes dieléctricas,

$$\boldsymbol{\epsilon}^S = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (4)$$

Luego, el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  se relaciona con el potencial eléctrico  $\phi$  de la siguiente manera

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \phi \quad (5)$$

Las ecuaciones dinámicas de un material continuo piezoeléctrico, pueden derivarse a partir del principio de Hamilton,

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (L + W) dt = 0 \quad (6)$$

donde el operador  $\delta$  denota la variación de primer orden,  $t_1$  y  $t_2$  definen el intervalo de tiempo (todas las variaciones se anulan en  $t = t_1$  y  $t = t_2$ ), el Lagrangiano  $L$  se determina por las energías disponibles en el medio piezoeléctrico y  $W$  es el trabajo virtual de las cargas exteriores mecánicas y eléctricas. Luego, para generar las relaciones de la matriz electroelástica en un elemento finito, el desplazamiento mecánico  $\mathbf{u}$  y el potencial eléctrico  $\phi$  se expresan mediante los valores de cada nodo  $i$  a través de las funciones de interpolación  $N_u$  y  $N_\phi$ , respectivamente,

$$\mathbf{u} = N_u \mathbf{u}_i \quad \phi = N_\phi \phi_i \quad (7)$$

Diferenciando las Ecs.(7), se obtienen las deformaciones y el campo eléctrico que se relacionan con los desplazamientos y los potenciales nodales de la siguiente manera,

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}_u \mathbf{u}_i \quad \mathbf{E} = \mathbf{B}_\phi \phi_i \quad (8)$$

donde  $\mathbf{B}_u$  y  $\mathbf{B}_\phi$  son las matrices de derivadas de las funciones de forma para el campo de desplazamiento y para el potencial eléctrico, respectivamente. De forma similar se pueden interpolar las cargas de cuerpo y de superficie para que queden expresadas en términos de los valores nodales a través de las funciones de interpolación. Aplicando el principio de Hamilton, ver Ec.(6), a cada elemento finito, y luego de realizar el procedimiento de ensamblado, se tienen las siguientes dos ecuaciones de equilibrio globales,

$$\begin{aligned} M\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{UU}\mathbf{U} + \mathbf{K}_{U\phi}\boldsymbol{\Phi} &= \mathbf{F} \\ \mathbf{K}_{\phi U}\mathbf{U} + \mathbf{K}_{\phi\phi}\boldsymbol{\Phi} &= \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (9)$$

donde  $M$  es la matriz de masa,  $K_{UU}$  es la matriz de rigidez mecánica,  $K_{U\phi}$  es la matriz piezoeléctrica,  $K_{\phi\phi}$  es la matriz dieléctrica,  $F$  es el vector de cargas exteriores mecánicas,  $Q$  es el vector de cargas eléctricas exteriores,  $U$  es el vector de desplazamiento global y  $\Phi$  es el potencial eléctrico global.

### 3. MODELO NUMÉRICO

Todas las formulaciones mencionadas se encuentran implementadas en el entorno de programación Oofelie (Oriented Finite Elements Led by Interactive Executor) (Cardona et al., 1994), que comprende distintas herramientas implementadas en el lenguaje de programación C++, orientadas a la resolución de problemas de la Mecánica del Continuo por medio del MEF. Luego, para comparar la respuesta mecánica de las cerámicas KNN y PZT, se propuso un análisis harmónico para un modelo de elementos finitos que representa un motor piezoeléctrico lineal como el que se muestra en la Fig. 2. La geometría del motor es rectangular con un largo  $L = 60$  mm, ancho  $W = 9$  mm y alto  $H = 28$  mm, ver Fig. 2. Se utilizaron elementos finitos con una topología tetrahédrica. El tamaño promedio de los elementos de la malla es de 1,3 mm lo que resulta en 109.721 elementos y 10.223 nodos. El motor se dividió en dos partes, una activa donde se aplica un potencial y otra nula. En la parte activa, se aplicó una diferencia de potencial de 1000 V. El objetivo es encontrar la frecuencia de oscilación que maximice el desplazamiento en la mitad de la cara superior donde se encuentra el pusher, quien estaría en contacto con una barra y que por efecto de la fricción y un movimiento elíptico del pusher, haría que la barra se desplazase en la dirección del eje Y. Las constantes piezoeléctricas usadas para las matrices

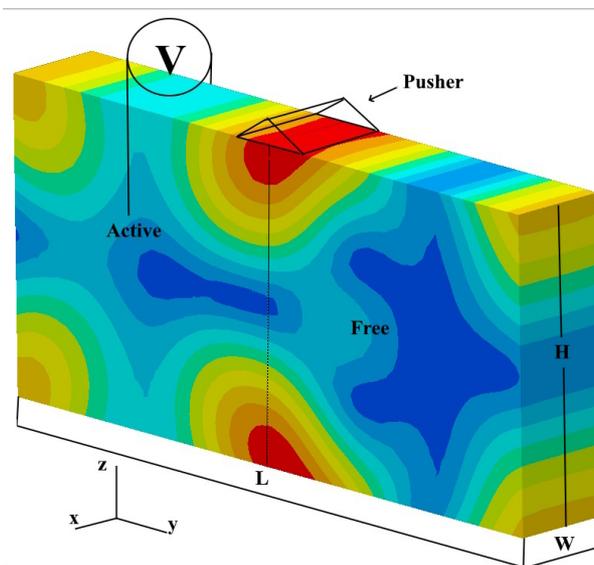


Figura 2: Modelo del motor piezoeléctrico.

constitutivas de las cerámicas analizadas se muestran en la Tabla 1. El resultado del campo de desplazamiento se muestra en la Fig. 3. La frecuencia de resonancia que exhibe la deformación deseada para el KNL-NTS es de 91,8 kHz, ya que el nodo central alcanza un desplazamiento máximo en las direcciones Y y Z. La magnitud del desplazamiento del modelo en el punto medio de la placa es de  $0,636 \mu\text{m}$ , en tanto que, para el material PZT, la frecuencia que muestra la deformación buscada es de 77,4 kHz con una magnitud de desplazamiento de  $19,17 \mu\text{m}$ . Es decir, el desplazamiento del KNL-NTS es aproximadamente 30 veces más chico que el correspondiente para el PZT, lo que sugiere en pensar diferentes dopantes para endurecer el material,

	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$c_{11}^E$ GPa	$c_{12}^E$ GPa	$c_{13}^E$ GPa	$c_{33}^E$ GPa	$c_{44}^E$ GPa	$e_{15}$ pC/m <sup>2</sup>	$e_{31}$ pC/m <sup>2</sup>	$e_{33}$ pC/m <sup>2</sup>	$\epsilon_{11}/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$
KNL-NTS	4.44	132	67	68	131	26.5	10	-3.1	14.5	1000	870
PZT	7.6	116	72	72	109	21	10.2	-3.9	16.4	730	845

Tabla 1: Coeficientes piezoeléctricos del KNL-NTS y del PZT.

como por ejemplo, el cobre o zirconio y de esta forma se podría alcanzar una desplazamiento de mayor amplitud.

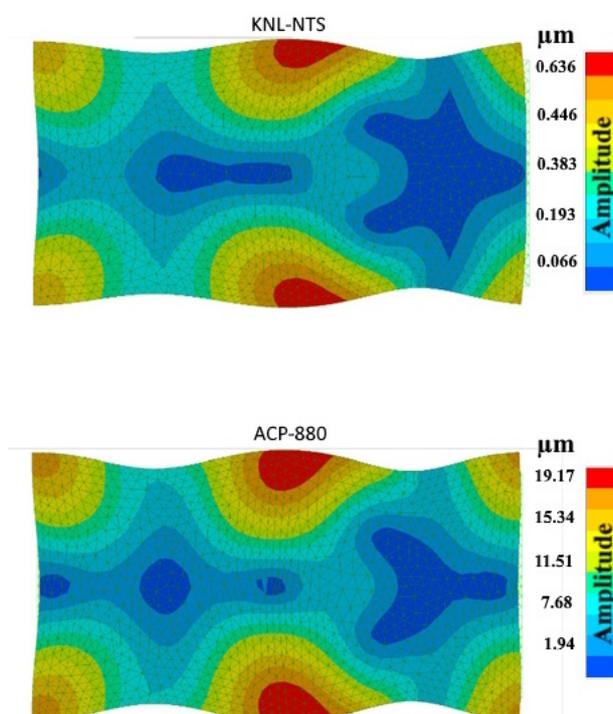


Figura 3: Relación amplitud-frecuencia derivada de simulaciones con el método de elementos finitos.

#### 4. CONCLUSIONES

La evaluación de la respuesta dinámica estructural en un motor piezocerámico lineal ultrasónico demostró que las piezocerámicas KNL-NTS muestran desplazamientos compatibles con el movimiento buscado, lo que sugiere que podrían ser consideradas como una alternativa sin plomo para el diseño de motores. Sin embargo, al comparar la respuesta mecánica del KNL-NTS con su contraparte comercial PZT, se observó que el material KNL-NTS produce un desplazamiento menor que el PZT. Por lo tanto, para aplicaciones futuras que requieran magnitudes de desplazamiento comparables a las del PZT-APC-880 u otras piezocerámicas duras, se necesitaría mejorar las propiedades del material mediante la introducción de aditivos con elementos endurecedores en la composición de la perovskita. Esta mejora aumentaría la dureza del material, lo que permitiría alcanzar mayores desplazamientos.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido financiamiento del CONICET a través del proyecto PIP11220200101 688CO y de la UTN a través de los proyectos AMECAFE0008102TC.

#### REFERENCIAS

- Avdiaj S., etina J., y Sylva N. Modeling of the piezoelectric effect using the finite-element method (fem). *Materiali in tehnologije*, 43(6):283–291, 2009.
- Barolin S., De la Rubia M., Terny J., Rubio-Marcos F., De sanctis O., Alonso R., Fernandez Lozano F., y De Frutos J. Respuesta ferro-piezoeléctrica de (k,na,li)(nb,ta,sb)o<sub>3</sub> poroso. *Ceramica y vidrio*, 53:48–52, 2014.
- Benjeddou A. Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey. *Computers & Structures*, 76(1-3):347–363, 2000.
- Cardona A., Klapka I., y Geradin M. Design of a new finite element programming environment. *Engineering Computations*, 11:365–381, 1994.
- Kim W.S., Yun C.H., y Lee S.K. Nano positioning of a high power ultrasonic linear motor. *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(7R):5687, 2008. doi:10.1143/JJAP.47.5687.
- Saito Y., Takkaio H., Tani, T. Nonoyama T., Takatori K., Homma T., Nagaya T., y Nakamura M. Lead-free piezoceramics. 432:84–87, 2004.
- Xiaouan H., Pueh L.H., Jin O.C., y Piang L.S. Design and finite element analysis of a new stack ultrasonic motor based on in-plane mode. *Smart Mater*, 2012.
- Zelikha N., Ahmed B., Malika and A. Hayet M., y A. N. Effects of thermal conditions in the phase formation of undoped and doped pb(zr<sub>1-x</sub>ti<sub>x</sub>)o<sub>3</sub> solid solutions. *Materials Sciences and Applications*, 4, 2013.