

RESPUESTA DE DINÁMICA DE MOTORES PIEZOELÉCTRICOS DE ONDA VIAJERA FABRICADOS CON MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS

Carlos Plazaola, Humberto Rodríguez
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá,

RESUMEN

Los motores piezoeléctricos son objeto de interés para aquellas aplicaciones en donde se requiere una alta densidad de torque y una operación silenciosa. Uno de los tipos de motores piezoeléctricos más prometedores, el de onda viajera, utiliza excitación piezoeléctrica para la generación de una onda que se propaga a través de un estator metálico. En estos motores, la forma y amplitud de la deformación del estator bajo régimen resonante determinan la potencia máxima y la eficiencia de la transmisión de la energía del estator al rotor.

En este trabajo presentamos un análisis de la posibilidad de utilizar arreglos de láminas de material fibroso, con diferentes orientaciones, para obtener mayores amplitudes de vibración en el estator de los motores piezoeléctricos de onda viajera (MPOV). Se presentan los resultados, obtenidos mediante simulación numérica.

Palabras claves: Motores Piezoeléctricos, materiales compuestos laminados, onda viajera.

ABSTRACT

Piezoelectric motors are very attractive for applications where high density of torque and quiet operation is needed. One of the most promising piezoelectric motors, the traveling wave ultrasonic motor (TWUM), uses piezoelectric excitation to generate a wave, which propagates along a metallic stator. In these motors, when working at resonance, the shape and amplitude of the stator deformations determines the maximum power and efficiency of the energy transmission from stator to rotor.

In this work, the possibility of obtaining higher amplitudes of vibration by using a composite laminated stator is addressed. Numerical simulation results for the stator of the TWUM are presented.

Keywords: Piezoelectric motor, composite laminated materials, traveling wave.

1. Introducción

Los motores piezoeléctricos de onda viajera (MPOV) se investigan en la actualidad como una alternativa para aplicaciones que requieren actuadores con alta densidad de par y/o cuyo funcionamiento sea silencioso. De allí que los MPOV resulten muy atractivos para aplicaciones en robótica y en prótesis [1]. A los motores piezoeléctricos de onda Viajera también se les conoce como Motores Ultrasónicos ya que, la frecuencia de la vibración utilizada para generar el movimiento es mayor a los 20kHz, por lo que es inaudible.

El estator de los MPOV puede tener forma de anillo o de disco y está compuesto de dos elementos, uno fabricado de un material piezoeléctrico y el otro metálico, como se muestra en la figura 1a. Para

este último se prefieren materiales como el acero inoxidable y el invar, cuyas propiedades mecánicas son muy estables ante cambios térmicos. Además, el módulo de Young de estos materiales tiene un valor tal que, conduce a coeficiente de acoplamiento electromecánico del motor (CAEM) altos, cuando se utilizan materiales piezoeléctricos fabricados a partir de óxidos de circonio, titanio y plomo (PZT). Por el contrario, módulos relativamente bajos, como el de los materiales plásticos reducen el CAEM [2].

La cerámica piezoeléctrica es del tipo PZT "dura", las cuales además se dopan para obtener factores de calidad mecánica altos. Vale la pena mencionar que el factor de calidad es más importante inclusive que el coeficiente piezoeléctrico de la cerámica, cuando el actuador opera en resonancia.

De allí que se prefieran las cerámicas duras, a pesar de que las suaves posean coeficientes piezoeléctricos mayores.

La onda viajera se genera en el estator mediante la superposición de dos ondas estacionarias desfasadas 90° en tiempo y espacio. Cada una de estas ondas se excita en una de las mitades del anillo piezoeléctrico. Así, el desfase espacial se

consigue desfasando la polarización de los segmentos de una mitad con respecto a los de la otra un cuarto de la longitud de onda, $\frac{1}{4} \lambda$. Mientras que, el desfase en tiempo se consigue aplicando funciones senoidales temporales

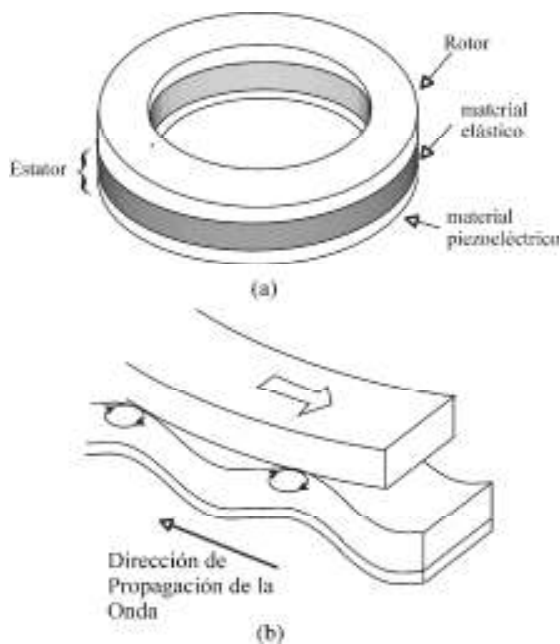


Figura 1: Componentes de un motor piezoeléctrico de onda viajera y funcionamiento.

en cuadratura, como se muestra en la figura 2b. Además, se suelen ranurar dientes en la parte superior de la capa metálica para amplificar el movimiento de elíptico que describen los puntos en la superficie del estator. Finalmente, el rotor va presionado contra el estator por medio de un resorte (no mostrado), de manera que el movimiento del estator se transfiere por contacto directo al rotor.

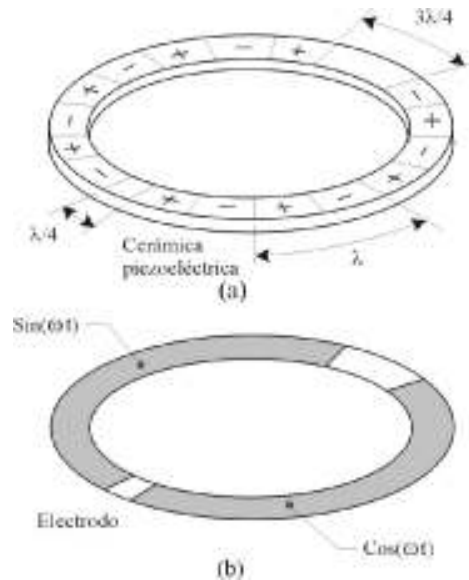


Figura 2: Polarización y excitación de la cerámica.

En el desarrollo de MPOV se hace necesario el dotar de características estructurales anisotrópicas a elementos como el estator, con la finalidad de producir mayores amplitudes en las deflexiones del mismo, de forma tal que se logren los niveles de torque deseados, ya que este último depende de las amplitudes resultantes [3]. Esta condición se obtiene con la presencia de los dientes ubicados en la periferia del estator, dando como

resultado propiedades de rigidez diferentes en las direcciones radiales y circunferenciales, es decir que aunque se construya de un material isotrópico, la presencia de las discontinuidades introducidas por la ubicación de los dientes genera características direccionales (ortotrópicas) en la estructura.

Una forma alterna de dotar a la estructura del estator de propiedades elásticas direccionales, es el fabricarlo de materiales compuestos reforzados con fibras. El uso de estos materiales ofrece la ventaja de poder orientar las fibras de refuerzo de forma tal que se obtengan las propiedades estructurales óptimas para la aplicación

específica. En el caso de una estructura de placa delgada en forma de disco circular las fibras de refuerzo podrían orientarse de manera radial y/o circunferencial para producir un material ortotrópico. Para aplicaciones en MPOV una alternativa que se explora en este trabajo consiste en colocar fibras de refuerzo en forma sesgada con respecto a la dirección radial, tal como se muestra en la figura 3b. Esta configuración para el refuerzo da como resultado un material con características anisotrópicas, de manera específica un material que es, localmente, transversalmente isotrópico.

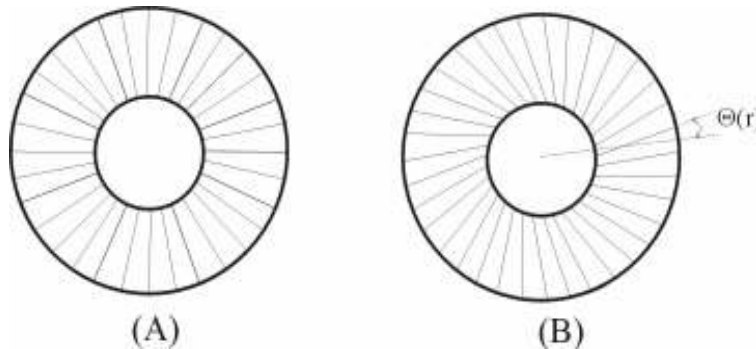


Figura 3: Comparación de un estator en forma de disco anular con fibras de refuerzo radiales (A) y otro con fibras sesgadas (B).

Aún cuando en la literatura se han propuesto un número significativo de variantes al diseño básico de los motores de onda viajera [4], no se ha propuesto todavía la conformación modal y del acoplamiento electromecánico, que se proponen en este trabajo, mediante materiales compuestos laminados. Menos aún se ha considerado la posibilidad de utilizar fibras de refuerzo sesgadas.

2. Modelado del Estator

Se utilizará en este trabajo la formulación de elementos finitos anulares y su solución mediante el método variacional de Ritz, desarrollados por H. Rodríguez *et al.* [5]. En dicha formulación se aplica la teoría de placas laminadas con deformación al cortante e inercias rotatorias a elementos anulares de tres tipos diferentes, en los cuales se divide el estator de MPOV, tal como aparece en la figura 4. Los anillos del tipo I están formados por una única capa de material metálico, los del tipo II por una capa de material piezoeléctrico de espesor uniforme y una capa de material metálico de espesor, el cual varía linealmente con el

radio. Por último los elementos del tipo III están compuestos de tres capas, las dos primeras similares a las del tipo II y una tercera de un material ortotrópico ficticio

(capa dentada) que toma en consideración la anisotropía provocada por los dientes.

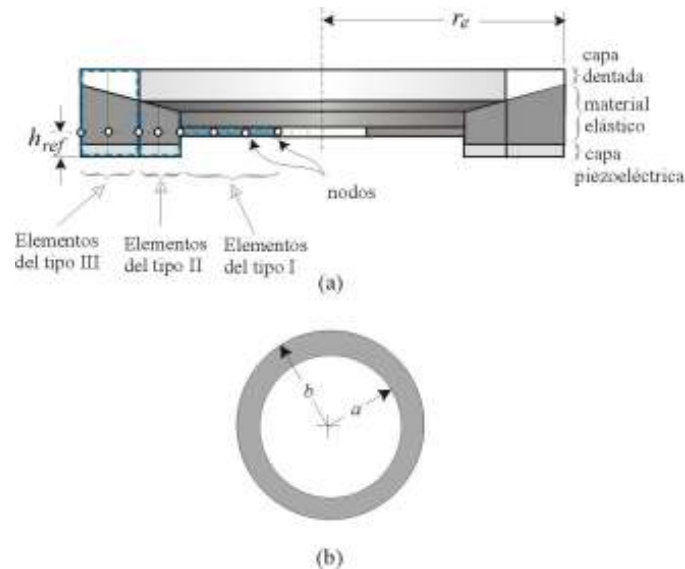


Figura 4: a) Sección transversal que muestra la descomposición del estator en elementos anulares de tres tipos diferentes, b) elemento anular típico.

No se presentan aquí los detalles de esta formulación, por lo que se refiere al lector al trabajo de H. Rodríguez *et al.*, [5] mencionado con anterioridad. La solución numérica se obtuvo utilizando MATLAB para la programación del método.

3. Formulación para el estator de Material Compuesto

Para utilizar las ecuaciones de teoría de placas circulares, es necesario realizar la transformación de las constantes elásticas referidas al sistema principal de coordenadas materiales, para referirlas al sistema de coordenadas estructurales (polares en este caso). Llevando a cabo la transformación se obtienen las ecuaciones que muestran acoplamiento entre las cargas de flexión (momentos) y las deformaciones de la superficie media de la placa, así como también entre las cargas en

el plano (resultantes de esfuerzos) y las curvaturas de las deformaciones. Esto debe contribuir a incrementar las amplitudes de las deflexiones.

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas en la transformación, [6], [7].

Se inicia con la ecuación constitutiva referida al sistema de coordenadas materiales, donde una coordenada es definida a lo largo de las fibras y las otras perpendiculares a ésta. Así,

$$\{\sigma\}_m = [Q]_m \{\varepsilon\}_m,$$

En donde la matriz Q representa la matriz de constantes elásticas referidas al sistema de coordenadas materiales y el subíndice m se refiere a "materiales". Se realiza ahora una transformación de las componentes de esfuerzo y deformación, refiriéndolas al

sistema de coordenadas estructurales, es decir el sistema de coordenadas polares:

$$\begin{aligned}\{\sigma\}_m &= [T]\{\sigma\}_e \\ \{\varepsilon\}_m &= [T]\{\varepsilon\}_e,\end{aligned}$$

En donde la matriz T es la matriz de transformación,

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -mn & mn & 0 & 0 & 0 & (m^2 - n^2) \end{bmatrix}$$

En esta matriz, $m = \cos \theta$ y $n = \text{sen} \theta$. Si se reemplazan las expresiones de transformación para las componentes de esfuerzo y deformación se obtiene,

$$\begin{aligned}[T]\{\sigma\}_e &= [Q]_m [T]\{\varepsilon\}_e \\ \{\sigma\}_e &= [T]^{-1} [Q]_m [T]\{\varepsilon\}_e\end{aligned}$$

Por lo tanto la matriz de constantes elásticas referida al sistema de coordenadas estructurales es:

$[Q]_e = [T]^{-1} [Q]_m [T]$, cuyos elementos son:

$$\begin{aligned}Q_{e11} &= Q_{m11}m^4 + 2(Q_{m12} + 2Q_{m66})m^2n^2 + Q_{m22}n^4 \\ Q_{e12} &= (Q_{m11} + Q_{m22} - 4Q_{m66})m^2n^2 + Q_{m12}(m^4 + n^4) \\ Q_{e13} &= Q_{m13}m^2 + Q_{m23}n^2 \\ Q_{e16} &= -mn^3Q_{m22} + m^3nQ_{m11} - mn(m^2 - n^2)(Q_{m12} + 2Q_{m66}) \\ Q_{e22} &= Q_{m11}n^4 + 2(Q_{m12} + 2Q_{m66})m^2n^2 + Q_{m22}m^4 \\ Q_{e23} &= n^2Q_{m13} + m^2Q_{m23} \\ Q_{e33} &= Q_{m33} \\ Q_{e26} &= -m^3nQ_{m22} + mn^3Q_{m11} + mn(m^2 - n^2)(Q_{m12} + 2Q_{m66}) \\ Q_{e36} &= (Q_{m13} - Q_{m23})mn \\ Q_{e44} &= Q_{m44}m^2 + Q_{m55}n^2 \\ Q_{e45} &= (Q_{m55} - Q_{m44})mn \\ Q_{e55} &= Q_{m55}m^2 + Q_{m44}n^2 \\ Q_{m66} &= (Q_{m11} + Q_{m22} - 2Q_{m12})m^2n^2 + Q_{m66}(m^2 - n^2)^2\end{aligned}$$

Así, las ecuaciones constitutivas resultan como sigue:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{e11} & Q_{e12} & Q_{e13} & 0 & 0 & 2Q_{e16} \\ Q_{e12} & Q_{e22} & Q_{e23} & 0 & 0 & 2Q_{e26} \\ Q_{e13} & Q_{e23} & Q_{e33} & 0 & 0 & 2Q_{e36} \\ 0 & 0 & 0 & 2Q_{e44} & 2Q_{e45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2Q_{e45} & 2Q_{e55} & 0 \\ Q_{e16} & Q_{e26} & Q_{e36} & 0 & 0 & 2Q_{e66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{\theta z} \\ \varepsilon_{rz} \\ \varepsilon_{r\theta} \end{Bmatrix}.$$

Estas ecuaciones en conjunto con las ecuaciones constitutivas del material piezoeléctrico se utilizan para obtener los resultantes de esfuerzos, los cuales una vez expresados en término de los desplazamientos y rotaciones, se reemplazan en el principio de Hamilton. Luego, con el método de Ritz se aproximan los desplazamientos y rotaciones de cada elemento expresándolos en términos de componentes y funciones de coordenadas (admisibles). Finalmente, estos componentes se obtienen al hacerlos satisfacer el principio variacional de Hamilton [5].

1. Discusión de Resultados

Para determinar si la utilización de las fibras sesgadas tiene el efecto esperado, de aumentar la amplitud de vibración del estator, se modificaron las ecuaciones constitutivas como se presentó en la sección anterior para un estator de dimensiones típicas y se compararon sus respuestas modales y forzadas con aquellas de un estator, de dimensiones y materiales iguales, pero con las fibras dispuestas radialmente. Un aspecto que hubo de ser considerado para la simulación

del estator con fibras sesgadas, es que el ángulo del sesgo es función del radio, $\Theta(r)$, como se muestra en la figura 5, por lo que, la matriz constitutiva Q_e varía radialmente. Así, como primera aproximación se promedió el valor de $\Theta(r)$ para cada elemento y se obtuvo una sola matriz para cada elemento anular.

En la figura 6 se muestran las formas modales de los dos estatores reforzados con fibras de carbono, uno de fibra radial y el otro de fibras sesgadas. Como se aprecia en esta figura la respuesta correspondiente al estator con fibras sesgadas tiene mayor amplitud para ambos modos de vibración.

Además de estos resultados, también se obtuvo la respuesta forzada, bajo la acción de voltajes de excitación senoidal, encontrándose igualmente que la amplitud de la respuesta del estator con fibras sesgadas es mayor, como aparece en la figura 7. En todas estas gráficas se muestra sólo la forma radial de la onda, ya que en el sentido circunferencial el modo está fijo, en 5 y 7 para estos ejemplos.

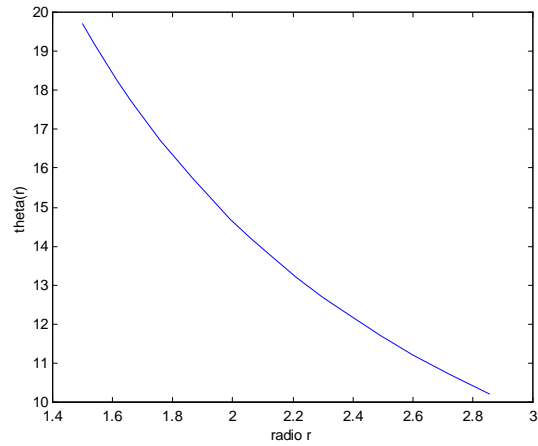


Figura 5: Variación del ángulo del sesgo con la posición radial

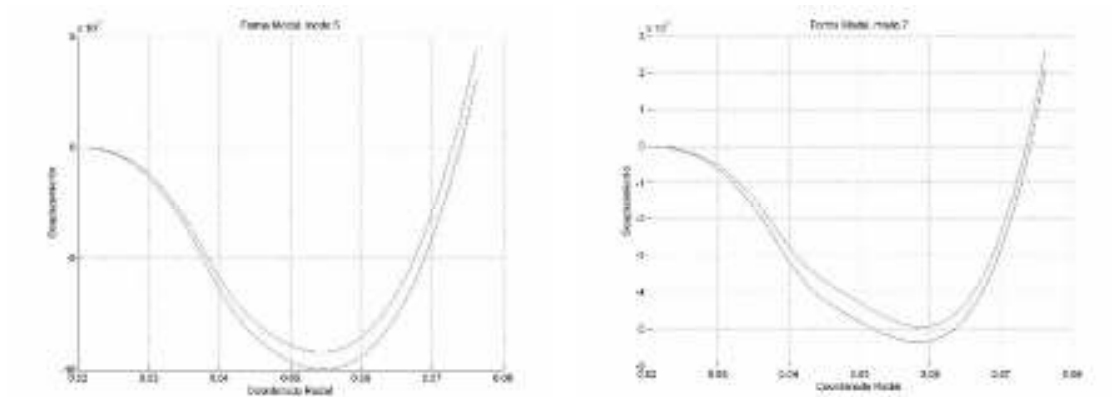


Figura 6: Formas modales del 5º y 7º modo de flexión para los dos estatores. En rojo el desplazamiento del estator con fibras sesgadas y en azul el del estator con fibras radiales.

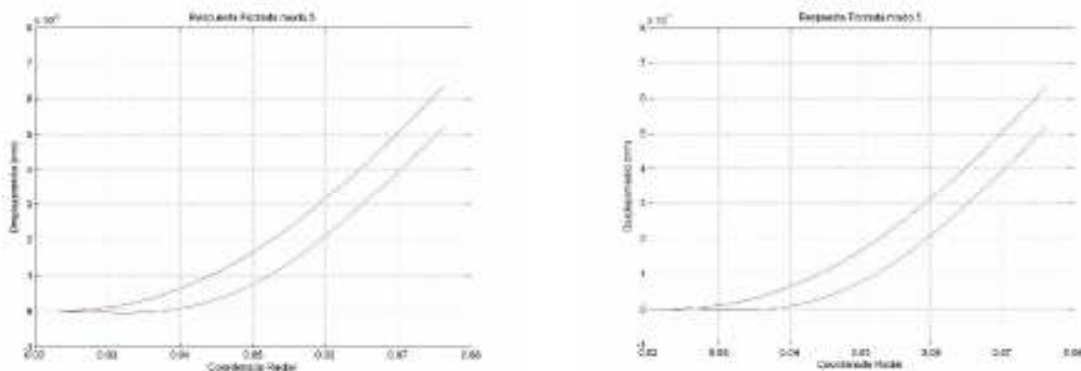


Figura 7: Amplitud de la vibración forzada en función del radio para los dos estatores, para dos modos de vibración de flexión diferentes (5º y 7º). En rojo el desplazamiento del estator con fibras radiales y en azul el estator con fibras sesgadas.

2. Conclusión y Trabajos Futuros

Se ha demostrado, utilizando un modelo previamente validado, que el uso de materiales compuestos reforzados con fibra permite configurar el material para lograr mayores amplitudes en los desplazamientos transversales del estator. Esto se logró orientando las fibras con respecto a la dirección radial, provocando así acoplamiento mecánico entre las deformaciones radiales y las transversales. Al obtener mayores amplitudes se pueden conseguir torques de salida mayores para el MPOV.

Por supuesto, existen un gran número de posibles configuraciones de las capas del estator que necesitan ser investigadas. Se pueden combinar varias capas con orientaciones diferentes entre ellas para conseguir mayor acoplamiento aún. Uno de los problemas que sería interesante abordar es el de optimización del ángulo óptimo de las fibras de las diferentes capas, de cara a maximizar la potencia máxima y/o eficiencia del motor. Para ello habría que incorporar en el modelo la interacción con el rotor.

Otro aspecto que sería importante investigar, es el porcentaje óptimo de los materiales con que se fabrican la matriz y las fibras de las láminas y de sus propiedades mecánicas. También, el tema de la resistencia mecánica para diferentes tipos de fallas del estator laminado, una vez se consigan las amplitudes deseadas, resulta de sumo interés.

Por último, la comprobación experimental de estos resultados es una etapa fundamental para evaluar el desempeño real del estator y del motor piezoeléctrico como un todo.

6. Bibliografía

- [1] J.L. Pons, H. Rodríguez, I. Luyckx, D. Reynaerts, R. Ceres, H. Van Brussel. *High torque ultrasonic motors for hand prosthetics: Current status and trends*, Technology and Health Care, 10(2):121-133, 2002.
- [2] J.L. Pons, H. Rodríguez, J.F. Fernández, M. Villegas, F. Seco. *Parametrical optimisation of ultrasonic motors*, Sensors and Actuators, A 107 (2003) 169–182.
- [3] T. Sashida y T. Kenjo, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Claredon Press, Oxford, 1993.
- [4] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa y N. Nakamura, *Ultrasonic Motors: Theory and applications*. Claredon Press, Oxford, 1993.
- [5] H. Rodríguez, J.L. Pons, R. Ceres. *Novel Modeling Technique for the Stator of Traveling Wave Ultrasonic Motors*: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 50, No. 11, Noviembre, 2003.
- [6] C. R. Plazaola, *Effects of Blast Loads on laminated Composite Material Circular Cylindrical Shells, Including Transverse Shear Deformation*, Tesis de Maestría en Ing. Mecánica. University of Delaware, 1991.
- [7] J. R. Vinson y RL Sierakowski, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Martinus Nijhoff Publishers (now Kluwer Academic Publishers) Dordrecht, The Netherlands, 1986.