

DISEÑO PRELIMINAR DE UN SISTEMA DE DOBLE ETAPA PARA POSICIONAMIENTOS NANOMÉTRICOS

PRELIMINARY DESIGN OF A DOUBLE-STAGE SYSTEM FOR NANOMETRIC POSITIONS

Lucas I. Lamas^a, Gustavo M. Flores^a y Rogelio L. Hecker^{a,b}

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Pampa, Calle 110 N°390, Gral. Pico, La Pampa, Argentina, lcs.lamas@gmail.com, <http://www.ing.unlpam.edu.ar>

^bCONICET, hecker.rogelio@gmail.com

Palabras clave: Posicionador manométrico, Piezoeléctricos, Flexure Stage.

Resumen. Los sistemas de posicionamiento dual son utilizados frecuentemente en nanomanipulación cuando se requieren desplazamientos relativamente largos con alto grado de precisión. Estos consisten en dos etapas de movimiento donde una de baja resolución esta acoplada en serie con otra de alta resolución. En este artículo se presenta el diseño preliminar de un posicionador dual basado en mecanismos flexibles o flexure stage, con capacidad para recorridos del orden de los 10 mm y un ajuste fino de algunos micrones con resolución manométrica. En principio la etapa de largo recorrido se realiza mediante un tornillo micrométrico, previendo la motorización del mismo en un futuro. Para la etapa de alta resolución se dispone de un actuador piezoeléctrico y de un mecanismo de amplificación tipo puente. Se presenta el modelo analítico, el cual tiene en cuenta la rigidez y las masas del conjunto, que permite determinar su comportamiento estático y dinámico a partir del cual se definen las dimensiones iniciales. El comportamiento del sistema se verifica utilizando el método de elementos finitos. Además se comparan los resultados obtenidos por simulación con los analíticos concluyendo que el modelo presentado permite hallar relaciones útiles para el dimensionado inicial del posicionador.

Keywords: Nanometric Positioner, Piezoelectric, Flexure Stage.

Summary. Dual positioning systems are frequently used in nanomanipulation when relatively long displacements with a high degree of precision are required. These consist of two movement stages where a low resolution one is coupled in series with a high resolution one. This article presents the preliminary design of a dual positioner based on flexible mechanisms or flexure stage, with capacity for runs of the order of 10 mm and a fine adjustment of a few microns with manometric resolution. First, the long-distance stage is carried out by means of a micrometric screw, allowing its motorization in the future. A piezoelectric actuator and a bridge type amplification mechanism are available for the high resolution stage. The analytical model is presented, which takes into account the rigidity and masses of the assembly, which allows determining its static and dynamic behavior from which the initial dimensions are defined. The behavior of the system is verified using the finite element method. In addition, the results obtained by simulation are compared with the analytical ones, concluding that the presented model allows finding useful relationships for the initial sizing of the positioner.

1 INTRODUCCIÓN

Un sistema de posicionamiento nanométrico permite realizar desplazamiento con resoluciones en el orden de los nanómetros. Son utilizados en aplicaciones de alta precisión como microscopía, metrología, fabricación de MEMS, entre otras. En general se utiliza un actuador piezoeléctrico para generar el desplazamiento y una estructura flexible o “flexure stage” para guiar su movimiento. Los piezoeléctricos se caracterizan por su alta resolución, limitada en la práctica solo por la electrónica del sistema de actuación y control (Canghai et al. 2016; Y.K.Yong et al. 2012; PI, 2008; Leang y Fleming, 2009). El guiado del movimiento a partir de la deformación elástica de una estructura de rigidez conocida, evita uniones o acoples deslizantes, eliminando la fricción, el desgaste y los problemas de juego mecánico, garantizando una alta precisión de guiado. Además presentan como ventajas su construcción monolítica y compacta, minimizando la cantidad de piezas y peso del conjunto. Los actuadores piezoeléctricos tienen como desventajas su bajo recorrido (0,1 % de su longitud). Para lograr mayores desplazamiento se han propuestos distintos mecanismos de amplificación siendo el de brazo de palanca el más sencillo (Y.K.Yong et al. 2012; Flores et al. 2018; Zeyi y Xu et al. 2018). En otros trabajos se presentan estructuras más complejas como la de Scott-Russell, romboidal o puente y sus variantes (Yanling et al. 2009; Shubao et al. 2016). Además con el objeto de lograr una mayor amplificación, algunos proponen varias etapas de amplificación (Wang et al. 2015). Sin embargo en todos los casos a lo sumo se logra aumentar el desplazamiento nominal del actuador unas pocas veces, disminuyendo la rigidez del sistema, afectando su respuesta en frecuencia.

Para lograr recorridos mayores, del orden de decenas o centenas de milímetros con resoluciones del nanómetro, se recurre al desarrollo de sistemas híbridos que combinan las bondades de los sistemas convencionales (largos recorridos y precisiones micrométricas) con sistemas de posicionamiento nanométricos (recorridos de unos pocos micrones y alta resoluciones). Esto se logra montando el sistema de bajo recorrido en serie con el de largo recorrido de tal manera que el primero compense, en forma activa, los errores de posicionamiento del segundo (Dong et al. 2009; Shuo y Lee et al. 2010). En (Elfizy, et al. 2005) se presenta un sistema dual para mejorar la precisión de posicionamiento en máquinas herramientas mientras que en (Chuan et al. 2008) se presenta el diseño de un sistema dual para posicionamientos en la industria de Circuitos Integrados. Ambos casos utilizan sistemas de guiados convencionales en la implementación de la etapa gruesa, mientras que en (Q. Xu et al. 2012) presentan el diseño de un sistema dual que implementa el sistema de guiado del movimiento de ambas etapas mediante estructuras flexibles.

En este trabajo se presenta el diseño preliminar de un posicionador nanométrico de dos etapas con capacidad para recorridos del orden de los 10 mm y un ajuste fino de algunos micrones. La etapa de desplazamiento grueso se realiza mediante un tornillo micrométrico accionado en forma manual, previendo la motorización del mismo en un futuro. La etapa de alta resolución se implementa con un actuador piezoeléctrico y un mecanismo de amplificación de su recorrido, del tipo puente. Se prevé el guiado del movimiento de ambas etapas mediante estructuras flexibles. En el diseño se busca lograr una estructura compacta pensando que será utilizada en espacios reducidos y se busca que la frecuencia natural del conjunto sea lo mayor posible buscando alta velocidad de posicionamiento en el futuro. La primer parte del trabajo presenta el esquema adoptado y un análisis estático y dinámico de cada una de las etapas. A partir de este modelo, se procede al dimensionado del sistema en función de las especificaciones de diseño y del actuador piezoeléctrico disponible. Además, con los valores de rigidez y masas del conjunto se obtienen las frecuencias naturales de cada etapa. Finalmente aplicando el método de cálculo por elementos finitos se verifica el

comportamiento del sistema tanto estático como dinámico. Aplicando la fuerza máxima del piezoeléctrico se obtiene el desplazamiento efectivo de la etapa de alta resolución y se verifica que los vínculos flexibles no superen el esfuerzo de fluencia del material. También se obtienen las frecuencias y modos de vibración de ambas etapas observando una correlación entre los valores obtenidos con el modelo analítico. Si bien el modelo no predice en forma exacta el comportamiento del conjunto permite hallar relaciones útiles para el dimensionado inicial o selección de los componentes del sistema y el efecto o interrelación entre las distintas partes del mismo.

2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DUAL

Para el diseño del sistema se adopta la configuración propuesta en (Q. Xu et al. 2012) [Figura 1](#). Especificaciones de diseño: recorrido total 10 mm, recorrido etapa fina, 30 micrones, resolución manométrica. Para lograr resoluciones nanométricas se utiliza un piezoeléctrico en el sistema de posicionamiento fino. Además como su desplazamiento nominal es bajo se plantea la utilización de un mecanismo de amplificación. Para ambas etapas se adoptan estructuras flexible o “flexure stage” como sistema de guiado del movimiento. En principio no se especifica frecuencia natural pero se pretende que sea lo más alta posible.

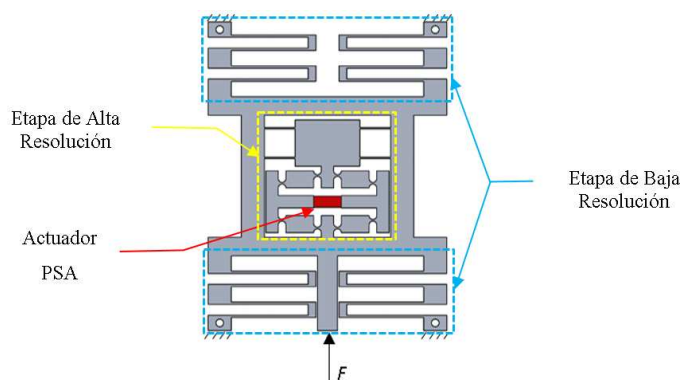


Figura 1: Sistema de posicionamiento dual

3 MODELADO SISTEMA DE DOBLE ETAPA

3.1 Análisis estático de la etapa de baja resolución.

La etapa de posicionamiento de baja resolución consta de 4 extremos tipo flexure, ubicados como muestra la [Figura 1](#) los cuales son deformados en la dirección del movimiento al aplicar una fuerza F en el extremo inferior del sistema mediante un tornillo micrométrico accionado manualmente. Su dimensionamiento se realizará teniendo en cuenta el desplazamiento objetivo del posicionador, $\Delta y = 10 \text{ mm}$, el esfuerzo máximo que puede entregar el tornillo micrométrico $F_{max} = 180 \text{ N}$, los requerimientos geométricos del sistema, y las propiedades mecánicas del material utilizado aluminio AL7075. En la [Figura 2](#) se muestra un extremo flexible de dicha etapa, el cual se analizará en forma individual al poder considerarlos geoméricamente idénticos entre ellos, por consiguiente, la deformación que sufrirá cada uno, al aplicar la carga, es la misma para todos los extremos. Como se observa en la [Figura 2a](#)), cada extremo consta de una cierta cantidad de brazos n , y se puede decir que la deformación total ΔY_{max} al aplicar una fuerza F_{max} vendrá dada por:

$$\Delta Y_{max} = n \delta y_{max} \quad (1)$$

Donde δy_{max} es la deformación máxima de cada brazo.

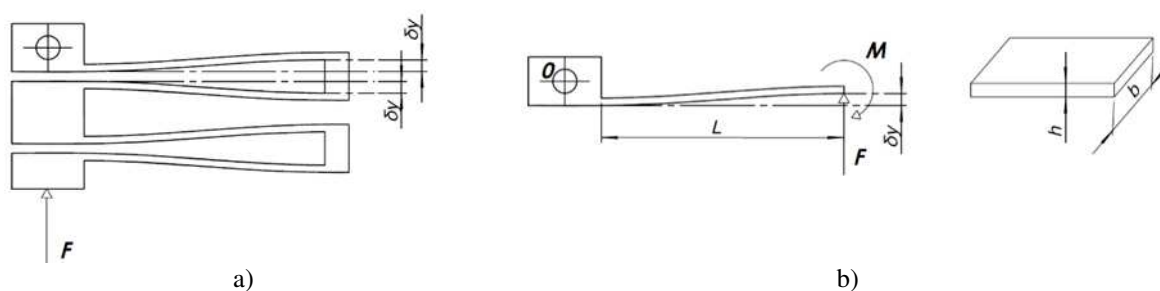


Figura 2: a) Esquema de brazos en serie; b) Brazo aislado.

Por otro lado se puede determinar la rigidez total de la etapa, K_L , teniendo en cuenta la fuerza que puede aplicar el tornillo micrométrico y el desplazamiento máximo:

$$K_L = \frac{F_{max}}{\Delta y_{max}} \quad (2)$$

Si analizamos cada extremo por separado entonces la fuerza F actuante en cada extremo es $\frac{1}{4}$ de la fuerza máxima y el desplazamiento de cada uno será:

$$\delta y_{max} = \frac{F}{K_L} \quad (3)$$

Mediante Ec.(1)

$$n = \frac{\Delta y_{max}}{\delta y_{max}} \quad (4)$$

Obteniendo que en cada extremo se necesitan n brazos para lograr el desplazamiento propuesto, Ec.(4). Analizando cada brazo por separado, Figura 2 b), se tiene que:

$$F = \frac{2M}{L} \quad (5)$$

la cual producirá una deformación máxima que viene dada por:

$$\delta y_{max} = \frac{FL^3}{12EI} \quad (6)$$

siendo E el módulo de elasticidad del material, I el momento de Inercia de la sección transversal del brazo y L su longitud, según la Figura 2. Por otro lado partiendo de que la tensión máxima se da cuando el esfuerzo es máximo, se puede deducir:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}h}{I} \Rightarrow M_{max} = \frac{2\sigma_{max}I}{h} \quad (7)$$

Mediante Ec. (5), Ec. (6) y Ec.(7) se pueden obtener las dimensiones de los brazos:

$$h = \frac{\sigma_{max}L^2}{3E\delta y_{max}} \quad (8)$$

$$L = \sqrt[3]{\frac{27FE^2\delta y_{max}^2}{b\sigma_{max}^3}} \quad (9)$$

3.2 Análisis estático de la etapa de alta resolución

La etapa de alta resolución contará con una etapa de amplificación del recorrido del actuador piezoeléctrico y una etapa de guiado del movimiento tipo estructura flexible, Figura 3a).

Puente amplificador:

Para la amplificación, se utilizará un sistema de puente flexible de 4 brazos, los cuales

estarán conectados mediante 8 articulaciones flexibles. La Figura 3b) muestra la forma esquemática del perfil de cada brazo. El objetivo en este punto es analizar y determinar las características geométricas de dicho puente de manera de lograr una amplificación que permita tener la resolución requerida.

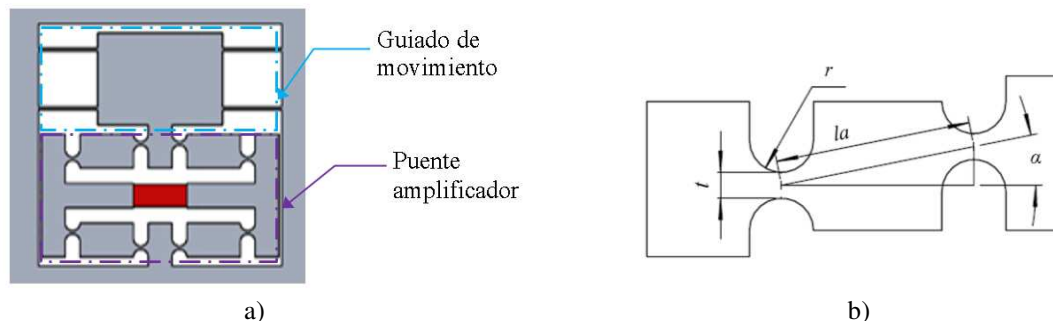


Figura 3: a) Puente amplificador, b) Brazo aislado del puente

A partir del análisis de cuerpo libre del brazo y expresiones de la rigidez rotacional y axial de los vínculos rotacionales tipo muesca circular se arriba a expresiones de rigidez de entrada y relación de amplificación del sistema tipo puente (Q. Xu et al. 2012):

$$A = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{K_t l_a^2 \cos^3(\alpha) \sin(\alpha)}{2K_r + l_a^2 K_t \cos^2(\alpha) \sin^2(\alpha)} \quad (10)$$

$$K_{in} = \frac{4 K_t K_r \cos^2(\alpha)}{2K_r + l_a^2 K_t \cos^2(\alpha) \sin^2(\alpha)} \quad (11)$$

Los valores de K_t y K_r son determinados según (Yuen et al. 2008), donde se realiza un análisis detallado de la relación t/r para pequeñas relaciones. Luego dado los valores de r , t , l_a y α se obtienen los valores de rigidez y la relación de amplificación del puente.

Guiado del movimiento.

Para guiar el movimiento del puente amplificador se utiliza un esquema similar al de la etapa gruesa, o configuración en paralelogramo con cuatro brazos flexible. A partir del análisis individual de uno de los brazos, Figura 2 b), se obtienen las expresiones de esfuerzo, deformación y desplazamiento del brazo en función de las dimensiones del mismo. Luego la rigidez del paralelogramo vendrá dada por:

$$K_p = \frac{F_2}{\delta y_2} = \frac{4 E b_2 h_2^3}{l_2^3} \quad (12)$$

Desplazamiento efectivo del piezoeléctrico.

El actuador piezoeléctrico se modela como un resorte ideal cuya rigidez, K_p , determinada por el módulo de elasticidad del material cerámico. La fuerza máxima, F_{max} , que puede aplicar se denomina fuerza de bloqueo y es la que se obtiene cuando actúa sobre una carga de rigidez infinita. Mientras que el máximo desplazamiento, ΔL_0 , se da en vacío. La relación entre fuerza máxima y desplazamiento está dada por la Ec.(13):

$$F_{max} = K_p \cdot \Delta L_0 \quad (13)$$

Este comportamiento del piezoeléctrico hace que su desplazamiento efectivo, ΔL , cuando actúa contra una carga de rigidez conocida, K_s , se reduzca según la siguiente ecuación:

$$\Delta L = \Delta L_0 \cdot \left(\frac{K_p}{K_p + K_s} \right) \quad (14)$$

Por lo tanto para el diseño de la etapa de alta resolución es necesario hallar la relación entre la rigidez del sistema de amplificación y sistema de guiado con el desplazamiento efectivo del actuador piezoeléctrico. Del análisis del mecanismo de amplificación tipo puente, [Figura 3b](#)), se obtienen las siguientes relaciones:

$$\Delta y = A \Delta x \quad (15)$$

$$K_y = \frac{K_x}{A^2} \quad (16)$$

Donde A es el factor de amplificación del desplazamiento en la dirección x medido en la dirección y , K_x la rigidez en la dirección x y K_y en la dirección y . Si el sistema tipo puente es accionado con un actuador piezoeléctrico de rigidez K_p y a su vez este actúa sobre el sistema de guiado del área de trabajo u objetivo, cuya rigidez es K_f , se tiene el esquema simplificado de masas y resorte de la [Figura 4](#):

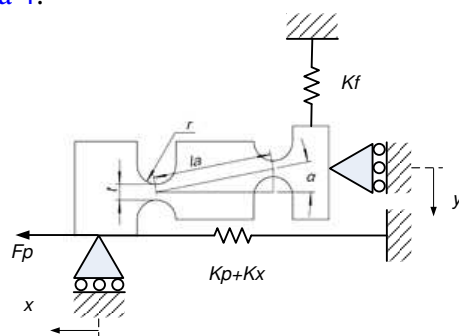


Figura 4: Modelo simplificado del sistema de amplificación tipo puente (solo sobre un brazo) y flexure.

Aplicando el principio de trabajo virtual se llega a que el desplazamiento a la salida del sistema de amplificación estará dado por:

$$\Delta y = \Delta L_0 \left[\frac{A \cdot K_p}{K_p + K_x + 2K_f \cdot A^2} \right] = \Delta L_0 \cdot R \quad (17)$$

El valor de R representa la amplificación del desplazamiento nominal del piezo. Como R depende en forma directa de A pero en forma inversa de su cuadrado, esto sugiere que hay un valor que hace que R sea máximo. Este valor se da para:

$$\frac{dR}{dA} = 0 \Rightarrow A_{\max} = \sqrt{\frac{K_p + K_x}{2K_f}} \quad (18)$$

Como el valor de A depende de factores geométricos y otras variables, fijado el valor de A se obtiene el valor de rigidez que debe tener el sistema de guiado del flexure, K_f , para que se logre el máximo desplazamiento del área objetivo, como:

$$K_f = \frac{K_p + K_x}{2A^2} \quad (19)$$

Si en la expresión de R , [Ec. \(17\)](#), reemplazamos el valor de K_f de la [Ec.\(19\)](#), se llega al valor de la amplificación del desplazamiento nominal del piezoeléctrico como:

$$R = \frac{A \cdot K_p}{2(K_p + K_x)} \quad (20)$$

Si la rigidez del sistema de amplificación K_x , fuera despreciable frente al valor de K_p , entonces el valor de R se aproxima a $A/2$. Este resultado indica que la amplificación del desplazamiento nominal del piezoeléctrico es aproximadamente la mitad del valor de amplificación del sistema tipo puente. Que resulta similar a la expresión obtenida para el sistema de amplificación tipo brazo de palanca (Flores et al, 2018). Si en la expresión, Ec.(20), anterior se fija un valor para K_x como una fracción de K_p se llega a la siguiente relación:

$$R = \frac{nA}{2(n+1)} \quad (21)$$

3.3 Análisis dinámico de la etapa de alta resolución.

La etapa de amplificación del desplazamiento del piezoeléctrico, de rigidez K_{Ay} en la dirección del movimiento y , está en paralelo con la rigidez del sistema de guiado. Por lo tanto la rigidez total en la dirección del movimiento será la suma de ambos valores. Luego K_{Ay} se obtiene en función de la rigidez del sistema de amplificación en la dirección x :

$$K_{Ay} = \frac{K_{xT}}{A^2} = \frac{K_p + K_{Ax}}{A^2} \quad (22)$$

Donde K_x es la rigidez del sistema de amplificación aislado (sin el piezoeléctrico). Luego la pulsación natural de la etapa de alta resolución se obtiene como:

$$\omega_n^2 = \frac{K_{yT}}{m_{ef}} = \frac{K_f + (K_p + K_x)/A^2}{m_{ef}} \quad (23)$$

4 DISEÑO PRELIMINAR SISTEMA DE DOBLE ETAPA

A partir de las especificaciones de diseño y del análisis estático presentado se procede al diseño del sistema de posicionamiento dual. En la construcción del sistema se prevé la utilización de aluminio *AL7075* y fabricación a partir de una plancha de *10 mm* de espesor para lograr una buena rigidez en la dirección transversal al plano del flexure.

Etapa de baja resolución

Adoptando un coeficiente de seguridad para el material de $C_s = 1.6$ y siendo la tensión de fluencia de *505 MPa*, se obtiene una tensión máxima de trabajo del material de $\sigma_{max} = S_y/C_s = 336 MPa$. La Tabla 1 muestra los valores obtenidos para las condiciones de diseños:

$F_{max}[N]$	$F[N]$	n[unidades] Ec.(4)	b[mm]	h[mm] Ec.(8)	L[mm] Ec.(9)	$\Delta y_{max}[mm]$ Ec.(1)	$\delta y_{max}[mm]$ Ec.(3)	$K_L[N/mm]$ Ec.(2)
180	45	4	10	1.5	50	10	2.5	18

Tabla 1- Características mecánicas y geométricas de los extremos de la etapa de baja resolución

Etapa de alta resolución

Para la etapa de alta resolución se utiliza un actuador piezoeléctrico PK4FQP2 de la

empresa ThorLab cuyos datos principales se presentan en la [Tabla 2](#).

Dimensiones (mm)	Desplazamiento nominal (μm @ 120 V)	Fuerza de bloqueo (N @ 120 V)	Rigidez (N/ μm)	Frecuencia de resonancia. (kHz)
5,2x7,1x18	16 \pm 15%	800	50	70

Tabla 2-Especificaciones del actuado piezoeléctrico

Con los datos del actuador y las relaciones obtenidas en la etapa de modelado se determinan los valores de rigidez y amplificación del puente y sistema de guiado, [Tabla 3](#)

R	A E_c (21)	n	K_x (N/ μm)	K_f (N/ μm) E_c .(19)	f (kHz) E_c .(23)
2	4.2	20	2,5	1,49	1,058

Tabla 3- Características de sistema de guiado y puente amplificador.

Estos valores permiten definir las dimensiones geométricas, [Tabla 4](#), del puente amplificador y brazos del sistema de guiado utilizando de las ecuaciones presentadas en la etapa de modelado.

Puente amplificador					Sistema guiado		
r[mm]	t[mm]	t/r	la[mm]	α [$^\circ$]	h2[mm]	L2[mm]	b[mm]
2.5	1	0.4	23.5	12.2	1.6	20	10

Tabla 4- Características geométricas de la etapa de alta resolución

4.1 Resultados de simulación.

A partir de los resultados de la etapa de diseño se modela el sistema y se verifica su desempeño. En la [Figura 5 a\)](#) se verifica el desplazamiento total de la etapa gruesa de 10 mm para una fuerza de actuación de 180 N, mientras que en la [Figura 5 b\)](#) se verifica que el valor de tensión para el desplazamiento máximo es de 360 MPa , similar al obtenido en la etapa de diseño. A partir del estudio de los modos de vibración del sistema completo se aprecia que el primer modo se da en la dirección del movimiento a la frecuencia de 37 Hz

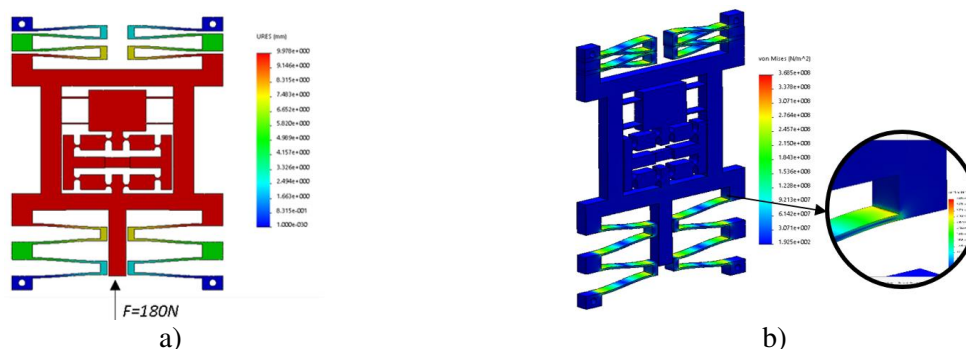


Figura 5-Desplazamiento efectivo de la etapa gruesa para una fuerza de 180 N, b) Esfuerzo alcanzado en los brazos flexibles para el desplazamiento nominal.

A partir del modelado de la etapa de alta resolución y aplicando la fuerza máxima del actuador piezoeléctrico (800 N) se obtiene un desplazamiento de 24,9 micrones, [Figura 6 a\)](#). Además se verifica que el esfuerzo máximo alcanzado en los vínculos flexibles (rotacionales como viga) no supera el esfuerzo de fluencia del material, [Figura 6 b\)](#). Es de destacar que el actuador piezoeléctrico se modeló simplemente como un elemento de material cerámico cuyas

características mecánicas se deducen de sus especificaciones, Tabla 2 y en sus extremos se aplica la condición de carga dada por la Fuerza de bloqueo.

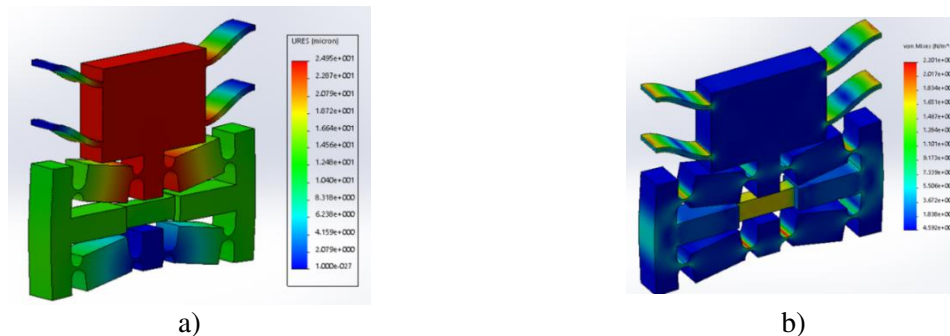


Figura 6-Desplazamiento de la etapa de alta resolución para una fuerza de 800N, b) Esfuerzos máximos alcanzados en los vínculos flexibles.

Del estudio de los modos de vibración, Figura 7, se observa un primer modo próximo a los 600 Hz, muy diferente al predicho por el modelo rígido. Sin embargo este modo se da por la baja rigidez del piezo en la dirección normal al plano del sistema y la longitud de los brazos que lo soportan. Esta situación se podría mejorar a posteriores rediseños. Por otro lado el segundo modo se da en la dirección del movimiento principal a los 1200 Hz bastante más próximo al predicho por las ecuaciones del modelo dinámico.

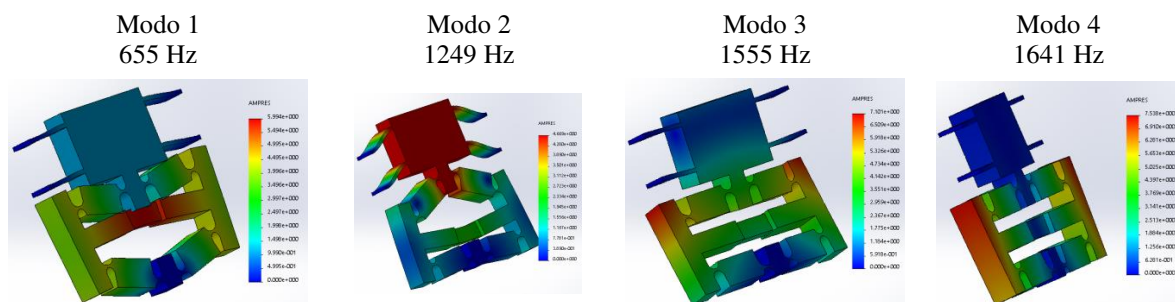


Figura 7: Modos de vibración de la etapa de alta resolución

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño preliminar de un posicionador nanométrico de dos etapas con capacidad para recorridos del orden de los 10 mm y ajuste fino de algunos micrones. El guiado de ambas etapas de movimiento se implementó con estructuras flexibles (flexure stage). En la etapa de alta resolución se utilizó un actuador piezoeléctrico con un mecanismo de amplificación de su recorrido, del tipo puente. Se presentó un modelo analítico a partir del cual se definieron las dimensiones iniciales del sistema, cumpliendo con las especificaciones de diseño. El modelo estático permite hallar una relación importante entre la relación geométrica de amplificación, la amplificación efectiva o real del desplazamiento nominal del actuador y los valores de rigidez del mecanismo, la cual resulta de utilidad en la etapa de diseño. Además, con los valores de rigidez y masas del conjunto es posible determinar aproximadamente las frecuencias naturales de cada etapa. Mediante simulación aplicando el método de cálculo por elementos finitos se verificó el comportamiento del sistema tanto estático como dinámico. Aplicando la fuerza máxima del piezoeléctrico se obtuvo el desplazamiento efectivo de la etapa de alta resolución y se verificó que los vínculos flexibles no superen el esfuerzo de fluencia del material. También se hallaron las frecuencias y modos de vibración de ambas etapas observando una correlación entre los valores obtenidos

con el modelo analítico. Las simulaciones permiten concluir que si bien el modelo analítico no predice en forma exacta el comportamiento del conjunto resulta de utilidad para el dimensionado inicial o selección de los componentes de un sistema con las características exigidas en el presente trabajo.

6 REFERENCIAS

- A.T. Elfizy, G.M. Bone, M.A. Elbestawi, "Design and control of a dual-stage feed drive", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005) 153–165.
- Changhai Ru, Xinyu Liu, Yu Sun, *Nanopositioning Technologies: Fundamentals and Applications*, ISBN 978-3-319-23853-1, DOI 10.1007/978-3-319-23853-1, Springer International Publishing, 2016.
- Chuan Yang, Guang L. Wang, Bi S. Yang, and Hai R. Wang, Research on the Structure of High-speed Large-scale Ultra-precision Positioning System, *Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. On Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2008, Sanya, China
- Flores, Gustavo; Ramirez, Pablo; Lamas, Lucas y Hecker, Rogelio, Diseño de un posicionador nanométrico con amplificación de recorrido. VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, VI CAIM 2018, Tucumán, Argentina, Oct. 2018.
- Gustavo M. Flores, Luis P. Ramirez, Rogelio L. Hecker, Fernando J. Villegas., "Diseño y Resultados Experimentales de un Posicionador Nanométrico". *Mecánica Computacional Vol XXXV*, págs. 135-145, 2017.
- Leang, K.K., Fleming, A.J., High-speed serial-kinematic AFM scanner: design and drive considerations. *Asian J. Control (Special issue on Advanced Control Methods for Scanning Probe Microscopy Research and Techniques)* 11(2), 144–153, 2009.
- Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. Piezoelectrics in Positioning. Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications. www.pi.ws, 2008.
- Q. Xu, "Design and Development of a Flexure-Based Dual-Stage Nanopositioning System With Minimum Interference Behavior," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 554-563, July 2012, doi: 10.1109/TASE.2012.2198918.
- Shubao Shao, Ming long Xu, Shuwen Zhang, Shilin Xie, Stroke maximizing and high efficient hysteresis hybrid modeling for a rhombic piezoelectric actuator. *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, 75 (2016) 631–647.
- Shuo Hung CHANG, Jen Bon LEE, "Design of a long range nano-scale resolution mechanism", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, ISSN 1673-565X (Print); ISSN 1862-1775 (Online).
- W. Dong, J. Tang and Y ElDeeb, "Design of a linear-motion dual-stage actuation system for precision control", *Journal of Smart Materials And Structures*, August 2009.
- Wang, Fujun, Liang, Cunman, Tian, Yanling, Zhao, Xingyu and Zhang, Dawei. Design of a Piezoelectric-actuated microgripper with a three-stage flexure-based amplification. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20 (5) (2015) pp. 2205-2213.
- Y. K. Yong, S. O. R. Moheimani, B. J. Kenton, and K. K. Leang. Invited Review Article: High-speed flexure-guided nanopositioning. *Mechanical design and control issues*. (2012)
- Yanling Tian, Bijan Shirinzadeh, Dawei Zhang, Gursel Alici, Development and dynamic modeling of a flexure-based Scott Russell mechanism for nanomanipulation. *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 (2009) 957–978.
- Zeyi Wu and Qingsong Xu, Survey on Recent Designs of Compliant Micro-/Nano-Positioning Stages. *Journal Actuators*, ISSN 2076-0825, Vol. 7, Nro. 1, (2018).
- Yuen Kuan Yong, Tien-Fu Lu, Daniel C. Handley, Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations, *Precision Engineering*, Volume 32, Issue 2, Pages 63-70, 2008.