

DISEÑO DE MECANISMOS FLEXIBLES BIESTABLES TRASLACIONALES PARA PINES TÁCTILES BRAILLE

DESIGN OF TRANSLATIONAL BISTABLE COMPLIANT MECHANISMS FOR TACTILE BRAILLE DOTS

Martín A. Pucheta^{a,b}, Alejandro G. Gallardo^a, Rodrigo T. González^a, Matías P. Bertorello^a, Tomás I. Sosa^a y Facundo Olmedo^a

^a*Centro de Investigación en Informática para la Ingeniería (CIII), Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional, Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, X5016ZAA Córdoba, Argentina, mpucheta@frc.utn.edu.ar, <http://ciii.frc.utn.edu.ar>*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

Palabras clave: Mecanismo flexible de precisión, Mecanismo biestable, Pines Braille.

Resumen. Los arreglos de pines táctiles, líneas de celdas Braille y graficadores, facilitan la accesibilidad de personas disminuidas visuales, ciegas y sordociegas a la adquisición de información y su comunicación. Un desafío particular es la representación de fórmulas matemáticas, graficación de funciones y figuras geométricas. En este trabajo se presenta el diseño mecánico y optimización de pines biestables para interfaces táctiles. Los pines de estos arreglos tienen dos estados, en el estado elevado deben mantenerse firmes durante la “lectura táctil” a través de los dedos del usuario. La idea de biestabilidad consiste en que cada pin se mantenga en cada estado sin consumir energía y la energía suministrada sólo se requiera en parte del rango de movimiento para cambiarlo de estado. Esto elimina la necesidad de un mecanismo de enclavamiento. Además, se requiere que el mecanismo flexible biestable adosado al pin sea actuado individualmente con mínima fuerza y energía. Se presentan simulaciones de resultados preliminares de mecanismos biestables formados por elementos flexores de viga de geometría recta.

Keywords: Flexible precision mechanism, Bistable mechanisms, Braille dots.

Abstract. The arrays of tactile pins, as the lines of Braille cells and graphics, enable the accessibility of visually impaired, blind, and deafblind people to the acquisition of information and its communication. A particular challenge is the representation of mathematical formulas, graphing functions and geometric figures. This work presents the mechanical design and optimization of bistable pins for tactile interfaces. The pins of these arrays have two states, in the elevated state they must hold in position during the “tactile reading”. The idea of bistability is that each pin is maintained in each state without consuming energy and that the energy supplied is only required in part of the range of movement to change its state. This eliminates the need for a latching mechanism. Furthermore, the bistable flexible mechanism attached to the pin is required to be actuated individually with minimal force and energy. Simulations of preliminary results of bistable mechanisms formed by beam flexure elements of straight geometry are presented.

1. INTRODUCCIÓN

Las líneas táctiles de arreglos de pines, de celdas Braille y graficadores, facilitan la accesibilidad de personas disminuidas visuales, ciegas y sordociegas a la adquisición de información y su comunicación; ver Fig. 1. De mayor importancia aún, estas interfaces habilitan a dichas personas a tener una educación en las ciencias, la música, las artes e insertarse social y laboralmente. Uno de los principales desafíos de la educación universitaria de disminuidos visuales se presenta en la representación de fórmulas matemáticas, graficación de funciones y figuras geométricas. Este es el pilar fundamental para el acceso a las STEM (siglas de Science, Technology, Engineering and Mathematics). La convención para representar ecuaciones en Braille es compleja. Para la enseñanza de las matemáticas se combinan los dispositivos electrónicos Braille con un software para interacción pedagógica entre el docente y el alumno, por ejemplo, EDICO, Euler o WIMATs (Pucheta et al., 2023). Para expresiones matemáticas y música se necesitan múltiples líneas Braille y arreglos de pines para graficación¹; ver Fig. 1(b).



Figura 1: Dispositivos comerciales para asistencia a disminuidos visuales: (a) Línea Braille de lectura y teclado de escritura, (b) Matriz graficadora, (c) Tablet con página táctil Braille.

Con el objetivo de construir una línea Braille de bajo costo, Pucheta et al. (2023) comenzaron a estudiar diversos diseños existentes y se determinó que la utilización de mecanismos de pines con actuación electromagnética y biestabilidad no aparece suficientemente explorada. Recientemente, en la revisión de Yang et al. (2021) se ha reconocido la importancia de diseñar mecanismos de pines para arreglos táctiles con enclavamiento, ya sea por contacto o por biestabilidad de cuerpos que se deforman. El enclavamiento retiene al pin en una posición deformada, generalmente la posición elevada del pin y el mismo queda en reposo en la posición baja (El Khoury et al., 2016). Entonces la energía se requiere para cambiar de estado al pin pero no para mantenerlo en el estado, siendo una gran ventaja con respecto a sistemas basados en

¹Destacado en productos recientes como Sci-Dot (<https://independencescience.com/>), proyecto entre la Universidad de Purdue (USA) y Cadence Tactile Graphics Tablet (<https://solutionframeworksconsulting.com/te/>), Canute Console de la Universidad de Bristol (UK) (<https://bristolbraille.org/>), Graphiti (<http://www.orbitresearch.com/product/graphiti/>), Monarch (<https://www.humanware.com/en-usa/monarch>) y Metec (<https://metec-ag.de/>).

piezoeléctricos, térmicos, elastómeros dieléctricos, sistemas electrotérmicos y magnéticos sin enclavamiento.

En este trabajo, se propone utilizar la biestabilidad en el pin del mecanismo como medio de enclavamiento sin contacto alguno; la actuación electromagnética también sería sin contacto, lo cual aísla al usuario de los riesgos de la actuación. La posición no deformada o de fabricación del mecanismo biestable es uno de los estados de equilibrio estable y la deformada es el otro estado estable habiendo pasado entre ellos por una singularidad de pandeo o inestabilidad conocida como “snap-through”. En línea con esto último, Zirbel et al. (2016) utilizan un mecanismo paralelo plano como disparador de cortadores de hilos para el despliegue de antenas flexibles en el espacio, teniendo la ventaja de no ser explosivo en comparación a sus diseños predecesores. Hussein y Younis (2020) proponen soluciones analíticas para determinar la biestabilidad de vigas rectas y curvas formando mecanismos biestables planos. Liu y Hao (2022) utilizan mecanismos paralelos biestables similares pero con más segmentos rígidos intercalados para formar estructuras desplegadas planas y aumentar la energía potencial elástica almacenada. Abbasi et al. (2023) han propuesto mecanismos de membranas magnéticas biestables como protuberancias de los puntos Braille con la desventaja de requerir altos voltajes de actuación y compleja manufactura. En el presente trabajo, se propone utilizar vigas rectas adosadas al pin Braille formando un mecanismo paralelo biestable plano con soportes flexibles. Mediante un análisis estático, que tiene en cuenta no linealidades geométricas, se pretende estudiar cuáles son los parámetros de diseño más influyentes en la biestabilidad y la factibilidad de satisfacer numerosos requerimientos de para esta aplicación.

2. PROBLEMA

En la Argentina existen 2,7 millones de disminuidos visuales, 80 mil personas ciegas y 10 mil sordociegas. De estos últimos dos grupos, se estima que sólo el 15 % está escolarizado en Braille, indispensable para acceder a la información por lectoescritura táctil y a una educación más integral. El sistema de puntos en relieve Braille es una cecografía para lectoescritura creada por Luis Braille en París, Francia, mostrado a sus pares en 1824 a sus 16 años y publicado en 1827; Fig.2(a). Desde entonces, la escritura se puede realizar manualmente con un punzón sin filo y una plantilla sobre el reverso de papel resistente. Los sistemas electrónicos modernos mostrados en la Fig. 1 sobre elevan pines o deforman superficies que emulan dichos puntos. De este modo, la literatura, las fórmulas matemáticas y la música se puede se interpretar en una lectura táctil, con refresco de información en pocas décimas de segundo.

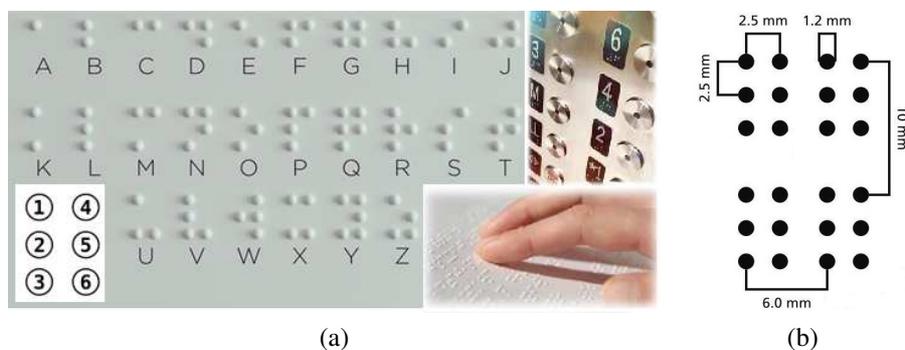


Figura 2: Celdas Braille: (a) Ejemplos de símbolos para letras, números y numeración de puntos en la celda; (b) Geometría adoptada en este trabajo.

El sistema Braille consta de un arreglo de celdas con 6 puntos mostrado en la Fig.2, dispuestos en dos columnas de 3 puntos. Hay varias normativas y geometrías adoptadas para las celdas que, en promedio, se separan 6 mm horizontalmente y 10 mm verticalmente, los puntos se separan 2,5 mm, horizontal y verticalmente, y se elevan del plano táctil entre 0,3 y 0,7 mm.

En una celda Braille las combinaciones posibles son $2^6 = 64$, por lo que cada combinación mapea a 63 símbolos definidos por puntos marcados en un papel o por pines que se elevan; la ausencia de todos (pines hundidos u ocultos) define un espacio en blanco separador de palabras y números. Este alfabeto óptimo para su discriminación táctil en su lectura y útil para la escritura ha permitido una gran autonomía a las personas ciegas. También existe el Braille con 8 puntos que amplía a 256 los símbolos representados.

El problema a resolver es el guiado individual de cada punto o pin Braille para el diseño de un sistema mecatrónico del grupo mostrado en la Fig.1. El pin se debe desplazar 0,7 mm y resistir una fuerza en oposición, sin hundirse durante la lectura, de al menos 0,3 N (Yang et al. (2021) sugiere 0,1 N). Se adosa un mecanismo biestable paralelo a pin. Para ello, se define un tamaño de celda repetitiva. Adentro de la celda se ubican flexores inicialmente formados por vigas inicialmente rectas. La celda limita la longitud de la viga en su proyección en el plano de lectura y también limita el espacio para ubicar columnas de soporte. La viga puede, sin embargo, tener distintas inclinaciones que cambiarán la rigidez del mecanismo tanto para actuarlo y cambiarlo de estado como para oponer la resistencia mínima requerida en la lectura.

3. METODOLOGÍA

La metodología a emplear consiste de análisis por elementos finitos de sólidos empleando software existente. En la Fig. 3 se muestra una representación del mecanismo en el plano xy con simetría en el plano xz . En la vista de planta, el pin tiene a su izquierda condiciones de borde deslizantes en dirección vertical. Las vigas paralelas fijas al pin tienen ambas espesor t , poseen una inclinación h/b y están separadas una distancia vertical d .

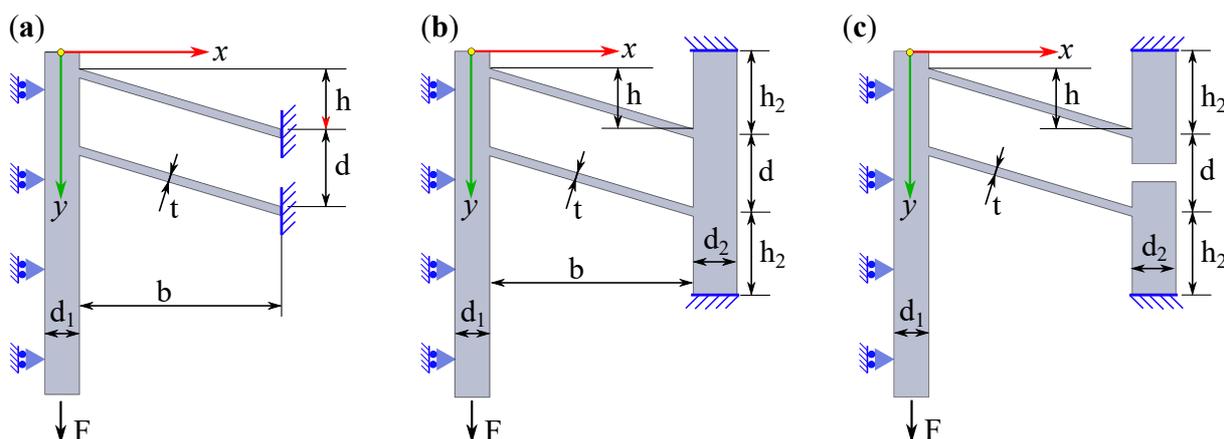


Figura 3: Modelos de mecanismos flexibles planos: (a) Vigas paralelas biempotradas ; (b) Vigas paralelas conectadas a parante biempotrado no esbelto; (c) Vigas paralelas conectadas a parantes cantiléver no esbeltos.

En el análisis estático se pretende estudiar la relación fuerza F_y versus desplazamiento Δy del pin y la energía almacenada. Se realizarán estudios que servirán de base para futuras optimizaciones. En estudios preliminares se determinó en las soluciones una influencia importante de las condiciones de borde de las vigas paralelas. Por ello, se plantean 3 modelos de mecanismos

flexibles:

- M1: Vigas paralelas biempotradas; ver Fig. 3(a). Esta configuración con emprotramientos idealmente rígidos posee solución analítica obtenida por Hussein y Younis (2020).
- M2: Vigas paralelas conectadas a un parante biempotrado no esbelto; ver Fig. 3(b). Zirbel et al. (2016) proponen un mecanismo con parante simplemente empotrado que permite a las vigas paralelas un movimiento en x en el emprotramiento; en prototipos fabricados hemos detectado diferencia de deformaciones entre vigas paralelas que producen su fractura y deben tener una separación d limitada. En el caso biempotrado propuesto, la separación d permitida es mayor y evita el giro parasitario del pin alrededor de z .
- M3: Vigas paralelas conectadas a parantes no esbeltos en configuración cantiléver opuesta; ver Fig. 3(c). Esta configuración es originalmente propuesta por los autores de este trabajo.

4. RESULTADOS

Para cada modelo se realizaron análisis no lineales estáticos con SolidWorks Simulation. Se definieron valores para los parámetros geométricos mostrados en la Fig. 3 y se variaron los espesores de las vigas paralelas para 3 estudios por cada modelo. Los 3 modelos tienen los siguientes parámetros geométricos en común: $h = 0,7$ mm, $b = 2,33$ mm, $d_1 = 0,4$ mm y $d = 0,8$ mm. Los modelos M2 y M3 comparten la geometría : $h_2 = 0,9$ mm y $d_2 = 0,4$ mm. El material es plástico ABS con módulo de elasticidad $E = 2$ GPa y de corte $G = 0,32$ GPa. Entre los espesores ensayados, se buscó un caso para el comportamiento biestable, uno cercano a la bifurcación de soluciones y un tercero de mayor espesor en que el mecanismo es monoestable, es decir, que almacena energía de deformación sin llegar a un segundo estado estable.

4.1. Modelo 1

El comportamiento biestable se obtiene para un espesor $t_1 = 0,1$ mm mostrado en color verde en la Fig. 4. Para tener una rápida referencia de una solución biestable se grafica la recta de trazos para $F_y = 0$.

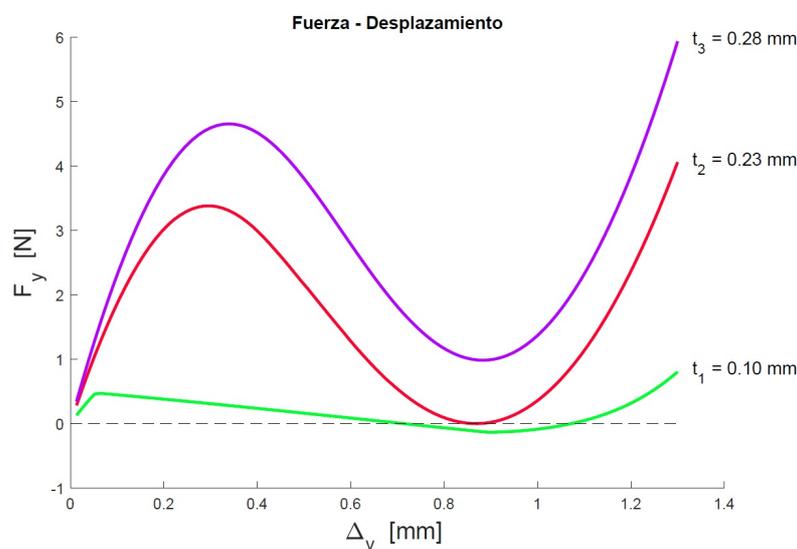


Figura 4: Experimentos numéricos para el Modelo 1.

La curva fuerza-desplazamiento de un mecanismo biestable corta a dicha recta 2 veces: la fuerza es positiva hasta un valor de desplazamiento en que la energía almacenada llega a un máximo local, luego la fuerza se hace negativa mientras la energía almacenada baja y al volver a cero la fuerza encuentra la segunda posición estable en donde la energía llega a mínimo local, posteriormente la fuerza y la energía suben con el desplazamiento. Notar además, que para este espesor la curva presenta un tramo casi recto, donde la rigidez es negativa y casi constante. Para el espesor t_2 el segundo estado estable se da luego de un rango negativo de fuerza con desplazamiento muy pequeño en que el mecanismo puede retornar al primer estado si se libera la fuerza de actuación; el mínimo local de la fuerza está cercano al cero. Para el espesor t_3 el comportamiento no es biestable. Las fuerzas de actuación para los espesores t_2 y t_3 son notablemente mayores que para t_1 .

4.2. Modelo 2

Los resultados mostrados en la Fig. 5 muestran que se obtiene la transición entre biestable y monoestable para un espesor t_2 menor que para el modelo 1. Si bien esto es una desventaja en términos de fabricación, las fuerzas de actuación requeridas son mucho menores que en el modelo 1. Esto es más evidente comparando los modelos con igual espesor $t_3 = 0,2$ mm. Las curvas fuerza-desplazamiento tienen máximos locales para menor valor de fuerza.

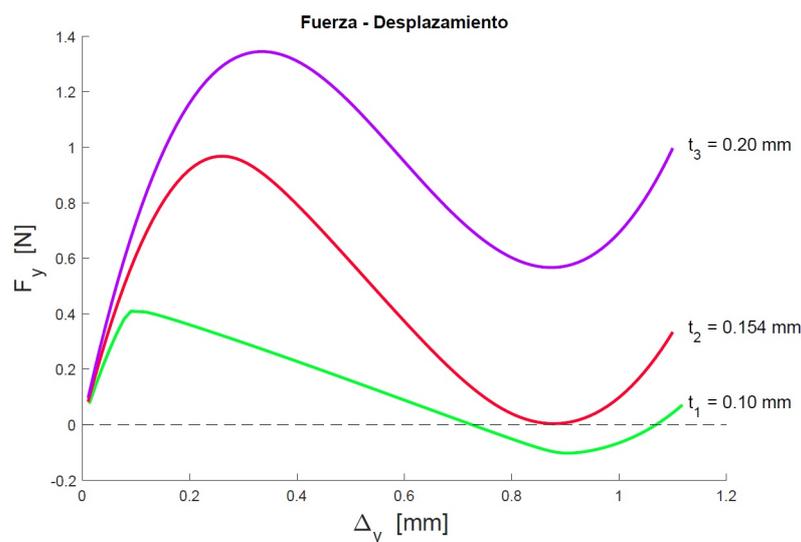


Figura 5: Experimentos numéricos para el Modelo 2.

4.3. Modelo 3

En los resultados mostrados en la Fig. 6 la transición entre biestable y monoestable se da para un espesor t_2 inferior que para el modelo 2 y con una fuerza de actuación un 40 % menor. Comparando los modelos con espesor $t_3 = 0,2$ mm, la fuerza requerida es un 30 % menor que en el Modelo 2. Las curvas fuerza-desplazamiento tienen máximos locales para menor valor de fuerza que para los modelos 1 y 2.

De los estudios realizados sobre los tres modelos, el comportamiento para los espesores t_2 y t_3 son una guía para saber en qué dirección modificar los parámetros geométricos, pero el estado monoestable no es de interés.

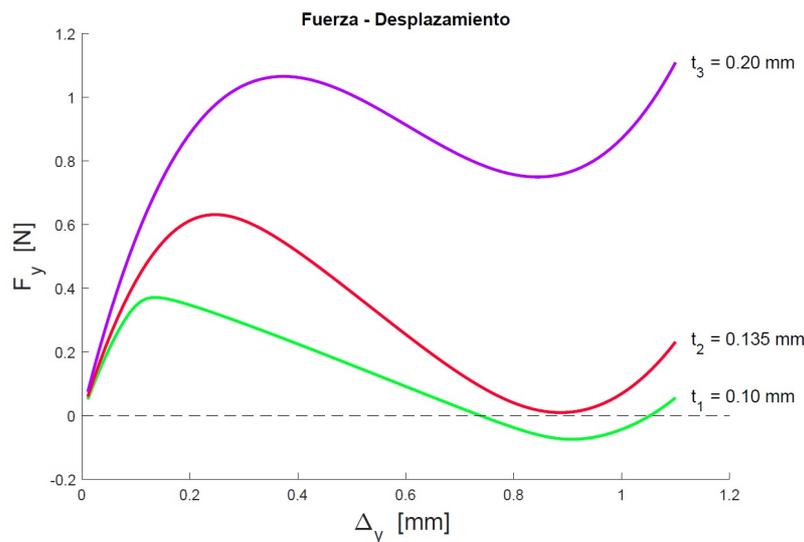


Figura 6: Experimentos numéricos para el Modelo 3.

4.4. Comparación de modelos con comportamiento biestable

El comportamiento de mayor interés, el biestable, se logra para espesores pequeños. Solapando los resultados para los tres modelos con igual espesor de viga en la Fig. 7 y 8, se puede observar que los tres modelos tienen comportamientos muy similares. El modelo 3 requiere de menor fuerza de actuación, implicando menor energía de deformación y en el desplazamiento, llega antes a la segunda posición de equilibrio por lo que requiere de menor carrera. La transición más suave en el máximo y mínimo local implica una transición más suave en los cambios de modo de deformarse, con lo cual, se estima que afecta menos a su fatiga y es más apto para una actuación rápida. Éste será el modelo a optimizar para lograr satisfacer la fuerza mínima de actuación y otros requerimientos.

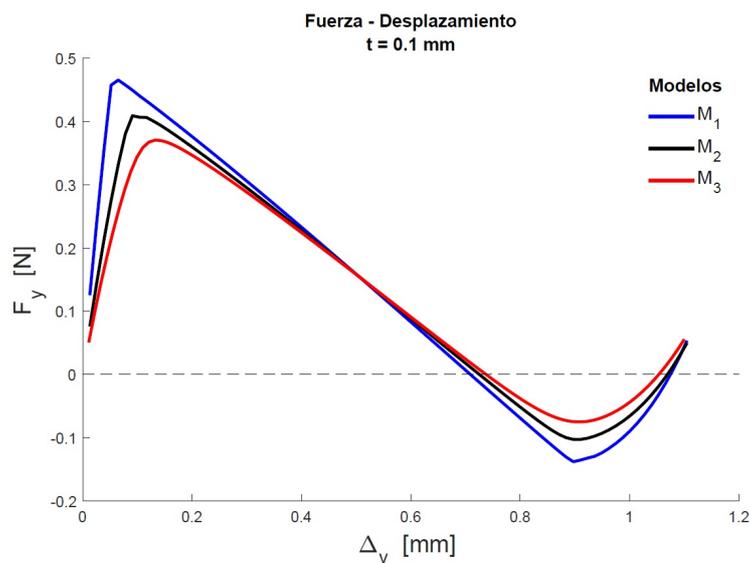


Figura 7: Comparación de fuerzas en modelos con comportamiento biestable

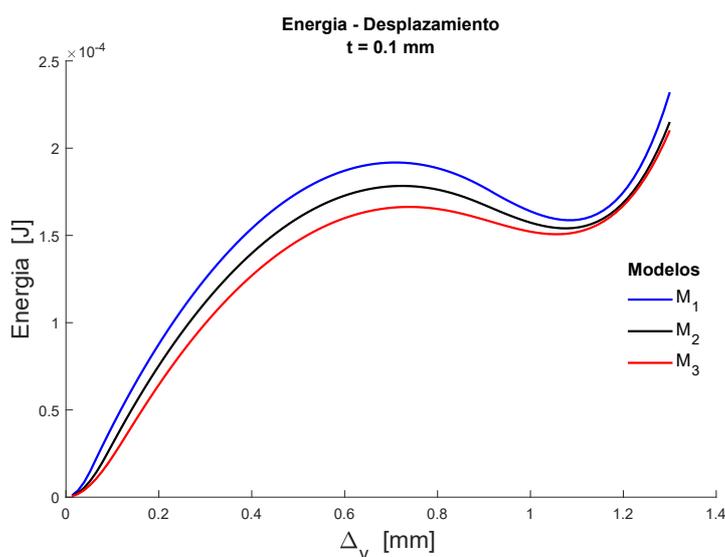


Figura 8: Comparación de la energía almacenada en modelos con comportamiento biestable

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado la síntesis y análisis de mecanismos flexibles planos para pines Braille. El problema es desafiante en términos de disponer de un espacio muy pequeño, desplazamientos que son grandes comparados a la longitud de las vigas y por el requerimiento de biestabilidad. Se realizó un diseño de experimentos inicial mediante análisis por elementos finitos y se obtuvieron importantes conclusiones sobre el problema para estudios de optimización posteriores. Principalmente, se propuso una nueva topología de mecanismo flexible traslacional plano con parantes en cantiléver no esbeltos y se determinó que supera en prestaciones a los más recientes de la literatura. Si bien un espesor de 0,1 mm obtenido en las soluciones biestables es difícil de fabricar, pensando en manufactura aditiva de bajo costo, el mismo provee una base para proponer nuevas topologías y nuevos materiales que permitan incrementarlo, facilitar su manufactura y hacerlo robusto a la fatiga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento del proyecto UTN-PID 8723, la beca BINID de R.T. González, las becas UTN-Rectorado de M.P. Bertorello y T.I. Sosa, y la beca UTN-FRC SAE de F. Olmedo.

REFERENCIAS

- Abbasi A., Chen T., Aymon B., y Reis P. Designing a Braille reader using the snap buckling of bistable magnetic shells, 2023. Unpublished archives: arXiv:2307.10933 [cond-mat.soft].
- El Khoury M., Nakic C., Winterstein T., y Schlaak H.F. Electrothermal out-of-plane-drive with novel bistable mechanism for portable Braille displays. En *2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, páginas 1137–1140. 2016. doi: 10.1109/MEMSYS.2016.7421836.
- Hussein H. y Younis M.I. Analytical Study of the Snap-Through and Bistability of Beams With Arbitrarily Initial Shape. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 12(4):041001, 2020. ISSN 1942-4302. doi:10.1115/1.4045844.
- Liu T. y Hao G. Design of deployable structures by using bistable compliant mechanisms.

Micromachines, 13(5), 2022. ISSN 2072-666X. doi:10.3390/mi13050651.

Pucheta M., Bertorello M., Gaydou D., Restrepo Blandón F., Gallardo A., González R., Sosa T., y Olmedo F. Sistemas mecatrónicos para interfaces táctiles braille: Revisión y requerimientos de diseño. En S. Rusillo, A. Giuliani, V. Marelli, y R. Leurino, editores, *Actas del VII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica - III Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria, CAIM-CAIFE 2023*. AJEA, 13-15 de septiembre, Santa Fe, 2023. (En prensa.).

Yang W., Huang J., Wang R., Zhang W., Liu H., y Xiao J. A Survey on Tactile Displays For Visually Impaired People. *IEEE Transactions on Haptics*, 14(4):712–721, 2021. ISSN 2329-4051. doi:10.1109/TOH.2021.3085915. Conference Name: IEEE Transactions on Haptics.

Zirbel S., Tolman K., Trease B., y Howell L. Bistable mechanisms for space applications. *PLoS ONE*, 11(12):e0168218, 2016. doi:10.1371/journal.pone.0168218.