

Jornadas de Automática

Desarrollo de un actuador neumático tipo PneuNet para una pinza robótica blanda

Moisés Bolívar-Vivas^{a,*}, Andrés J. Serrano-Balbontín^a, Inés Tejado^a, Blas M. Vinagre^a, María Collado Caballero^b

^aEscuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06006 Badajoz, España.

^bCoveless Ingeniería, C/ Nevero Trece 24, 06006 Badajoz, España.

Bolívar-Vivas, M., Serrano-Balbontín, A.J., Tejado, I., Vinagre, B.M., Collado Caballero, M. 2026. Development of a PneuNet soft actuator for a soft robotic gripper. Jornadas de Automática, 47.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13739>

Resumen

Este trabajo presenta los avances alcanzados hasta la fecha en el desarrollo de un actuador tipo PneuNet para una pinza robótica blanda. Los PneuNet son un tipo de actuador neumático blando, fabricado con elastómeros, compuesto por múltiples cámaras interconectadas dispuestas sobre una base que contiene un componente inextensible. Estas cámaras se inflan mediante aire presurizado para generar movimiento y flexión, consiguiendo así que el actuador se adapte y cierre sobre los objetos a manipular. Gracias tanto a la estructura y composición del PneuNet como a su accionamiento neumático, se pueden diseñar pinzas constituidas por estos actuadores, que presentan una ventaja muy clara respecto a otros manipuladores rígidos. En comparación con enfoques más tradicionales, esta alternativa consigue una manipulación mucho más delicada, reduciendo significativamente el riesgo de dañar los objetos. Este documento describe los principales aspectos de diseño que deben considerarse al concebir y dimensionar actuadores neumáticos blandos tipo PneuNet.

Palabras clave: Manipuladores robóticos, Percepción y sensado, Robótica embebida, Sistemas robóticos autónomos, Robótica blanda, Actuadores neumáticos blandos

Development of a PneuNet soft actuator for a soft robotic gripper

Abstract

This work presents the progress achieved to date in the development of a PneuNet actuator for a soft robotic gripper. PneuNets are a type of soft pneumatic actuator manufactured from elastomeric materials and composed of multiple interconnected chambers arranged on a base containing an inextensible layer. These chambers are inflated by pressurized air to generate motion and bending, enabling the actuator to conform and close around the objects to be manipulated. Owing to both the structure and composition of the PneuNet and its pneumatic actuation principle, grippers based on these actuators can be designed, offering a clear advantage over conventional rigid manipulators. Compared with more traditional approaches, this alternative provides significantly gentler manipulation, substantially reducing the risk of damaging the handled objects. This paper describes the main design aspects that must be considered when conceiving and sizing PneuNet soft pneumatic actuators.

Keywords: Robots manipulators, Perception and sensing, Embedded robotics, Autonomous robotic systems, Soft robotics, Soft pneumatic actuators

1. Introducción

Conforme aumenta la robotización de los procesos industriales, surgen nuevas aplicaciones en cadenas de producción que hasta ahora eran realizadas de forma manual. Sin embar-

go, en sectores como la industria alimentaria, los sistemas de agarre rígidos utilizados en robots convencionales no son adecuados para manipular productos delicados como frutas o dulces. Ante este problema aparecen soluciones basadas en sistemas de agarre más adaptativos y, especialmente, en la robóti-

*Autor para correspondencia: mbolivar@unex.es

ca blanda. La robótica blanda engloba sistemas robóticos fabricados con materiales flexibles y deformables, capaces de adaptarse a la geometría de los objetos y minimizar los daños durante su manipulación. Según (Martín et al., 2018), un robot blando puede considerarse un robot hiperredundante, con un número muy elevado de grados de libertad y un comportamiento continuo.

En este contexto, este trabajo tiene como objetivo diseñar una pinza robótica blanda para la manipulación de fruta en entornos industriales. El desarrollo se plantea como respuesta a una posible necesidad identificada por la empresa Coveless Ingeniería en el ámbito de la automatización de procesos de manipulación. Considerando tanto los requisitos de la aplicación como las restricciones presupuestarias y la experiencia previa, se presenta una pinza compuesta por tres actuadores PneuNet, una de las arquitecturas de actuadores neumáticos blandos más extendidas en aplicaciones de agarre adaptativo.

Los actuadores PneuNet son clasificados en trabajos como (Awada et al., 2025) dentro de la familia de actuadores neumáticos blandos (soft pneumatic actuators, SPA), que a su vez pertenecen a los denominados actuadores elastoméricos fluidicos (fluidic elastomer actuators, FEA). Este tipo de actuador funciona mediante la presurización de cámaras internas conectadas entre sí, lo que provoca la deformación controlada del material y permite generar el movimiento de flexión característico.

Estos actuadores han sido ampliamente estudiados para el desarrollo de pinzas robóticas blandas y existen un gran número de variaciones en cuanto a métodos de fabricación, materiales y dimensiones, por lo que resulta necesario analizar previamente cuál es la configuración más adecuada para cada aplicación.

Este trabajo se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, se presenta un estado del arte en el que se revisan las principales líneas de investigación en robótica blanda. A continuación, se describe la pinza propuesta, así como los componentes electrónicos y neumáticos seleccionados para su actuación y control. Posteriormente, se exponen las principales consideraciones de diseño del actuador PneuNet y los avances alcanzados hasta la fecha. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Estado del Arte

La robótica blanda es un campo emergente y en constante desarrollo, con múltiples líneas de investigación abiertas. En (Santina et al., 2023) se identifican tres desafíos intrínsecos a este ámbito: la dinámica continua o multicuerpo, la presencia de un campo potencial elástico no despreciable y la diversidad de estrategias de sensado y actuación.

La dinámica continua o multicuerpo implica que los robots blandos presentan un número muy elevado de grados de libertad, en contraste con los robots rígidos discretos. Trabajos como (Santina et al., 2023) proponen modelos basados en la teoría de barras o en aproximaciones mediante deformaciones locales, donde la configuración del robot se describe a lo largo de un dominio espacial continuo. Este enfoque permite describir con precisión la forma del robot, aunque pueden resultar computacionalmente costosas. Para reducir esta carga

se han desarrollado modelos de orden reducido (ROM), que hacen más tratable el análisis y el control. También existen enfoques híbridos, como los descritos en (Laschi et al., 2023), que combinan un modelado analítico inicial con datos experimentales. La presencia de un campo potencial elástico no despreciable constituye otro rasgo distintivo de estos sistemas. A diferencia de los robots rígidos, en los que la elasticidad suele tener un papel secundario, en la robótica blanda la energía almacenada en el material elástico influye de manera significativa en el comportamiento dinámico. En este contexto se enmarca el concepto de computación morfológica, descrito en trabajos como (Hauser et al., 2023, 2014), donde el propio cuerpo del robot contribuye parcialmente al comportamiento funcional del sistema, reduciendo la carga del controlador.

En cuanto a las estrategias de actuación y sensado, la robótica blanda ofrece una gran variedad de alternativas. Entre los mecanismos de actuación destacan los actuadores neumáticos (Tang et al., 2025), los actuadores elastoméricos fluidicos (Shintake et al., 2018), los polímeros electroactivos y los materiales con memoria de forma. De forma complementaria, las estrategias de sensado abarcan desde sistemas externos hasta sensores embebidos en el propio actuador. Por ejemplo, (Elgeneidy et al., 2018) emplean cámaras externas de alta velocidad junto con sensores de flexión integrados en el actuador.

Estas características han motivado el desarrollo de estrategias de control adaptadas a la naturaleza deformable y altamente no lineal de los robots blandos. Los enfoques clásicos pueden presentar limitaciones a la hora de modelar con precisión la interacción con el entorno, especialmente en tareas de contacto. Por ello, técnicas basadas en aprendizaje automático, como el aprendizaje supervisado o el aprendizaje por refuerzo, han adquirido un interés creciente en este ámbito (Laschi et al., 2023), al permitir aproximar dinámicas complejas sin requerir modelos exactos del sistema.

Dentro de la robótica blanda, las pinzas blandas constituyen una de las aplicaciones más maduras y extendidas, al integrar de forma natural diseño mecánico, actuación, sensado y control. Revisiones como las de (Shintake et al., 2018), (Zhang et al., 2025) y (Otti et al., 2025) muestran una amplia variedad de arquitecturas y mecanismos de agarre. En particular, los actuadores tipo PneuNet han sido ampliamente utilizados por su simplicidad constructiva, su capacidad de deformación y su adecuación para tareas de agarre adaptativo. En esta línea, (Silva et al., 2024) proponen un método de fabricación en un solo paso mediante núcleos solubles impresos en 3D, lo que simplifica la obtención de geometrías internas complejas y reduce los ciclos de diseño. De forma similar, (Correia et al., 2024) validan el uso de pinzas multifuncionales en plataformas robóticas comerciales, demostrando la viabilidad de distintos materiales elastoméricos para manipular objetos sensibles. Por su parte, (Elgeneidy et al., 2018) presentan el modelado de un actuador PneuNet mediante un modelo analítico complementado con datos experimentales, orientado a mejorar la precisión del control.

Desde el punto de vista del rendimiento mecánico, (Awada et al., 2025) introducen el estudio de la resistencia al pandeo como una métrica crítica para optimizar diseños que requieren elevadas fuerzas de salida sin comprometer la estabilidad estructural. Finalmente, trabajos recientes como (Serrano-

Balbontín et al., 2025) y (Serrano-Balbontín et al., 2026) abordan las no linealidades propias de la actuación neumática mediante estrategias de modulación por pulsos y control por impulsos en bucle cerrado, orientadas a mejorar la regulación de presión y la fidelidad respecto a los modelos analíticos.

Sobre la base de estos antecedentes, el presente trabajo se centra en el desarrollo de un actuador neumático blando tipo PneuNet para su integración en una pinza robótica blanda, prestando especial atención a las decisiones de diseño, fabricación y selección de componentes necesarias para su implementación.

3. Diseño conceptual de la pinza robótica blanda

Como se ha mencionado en la introducción, el objetivo final de este trabajo es el desarrollo de una pinza robótica blanda para la manipulación de fruta. Su diseño 3D se muestra en la Figura 1(a), en la que pueden observarse los tres actuadores PneuNet que conformarán la pinza, distribuidos uniformemente a 120° alrededor del eje asociado al punto central de herramienta (TCP).

Para poder suministrar aire a presión a los actuadores y controlar su movimiento, se ha diseñado una arquitectura neumática y electrónica específica. Dentro del circuito neumático se consideran los siguientes componentes:

- Compresor CEVIK de 50 l y 1,5 HP. Constituye la fuente de aire comprimido del sistema, proporcionando aire a una presión aproximada de 0,8 MPa.
- Regulador SMC ITV1000. Recibe el aire que sale del compresor y lo regula hasta la presión de trabajo deseada para el actuador (máximo 400 kPa).
- Tanque de aire de 2 l. Se utiliza como depósito intermedio para amortiguar pequeñas oscilaciones de presión a la salida del regulador.
- Válvulas solenoides 3/2 SMC V114-5G-M5. Permiten conmutar entre la alimentación de aire al actuador y la descarga al exterior, regulando así la presión interna del PneuNet.
- Actuadores PneuNet, fijados mecánicamente por uno de sus extremos e interconectados al circuito neumático mediante un adaptador.

El sistema de control está compuesto por los siguientes elementos:

- Sensores de presión Honeywell. Miden la presión del aire a la entrada del actuador y transmiten dicha información al sistema de control.
- Sensores de flexión SpectraSymbol. Se fijan sobre el actuador y experimenta la misma deformación que este. La variación de su señal eléctrica permite estimar la flexión del sistema.
- Arduino Uno R4. Se encarga de la adquisición de datos procedentes de los sensores y de la comunicación con el ordenador de control.

- PC con MATLAB. Recibe los datos de los sensores a través del Arduino, calcula la acción de control y genera una señal IIPFM cuyo ciclo de trabajo es enviado de vuelta al Arduino. Este último acciona la válvula mediante un driver Cytron 5–30 V, cerrando así el bucle de control.

Dado que la pinza final estará compuesta por tres actuadores PneuNet, cada actuador requiere una válvula solenoide, un sensor de presión y un sensor de flexión dedicados, mientras que el resto de componentes son compartidos. La Figura 1(b) muestra el esquema correspondiente a la actuación y control de uno de los tres actuadores que integrarán la pinza.

4. Avances y resultados

Esta sección presenta las principales decisiones adoptadas durante el diseño del actuador PneuNet, incluyendo la selección de materiales y la definición de su geometría. Asimismo, se describen los avances alcanzados en las etapas de simulación mediante elementos finitos y en la fabricación de los primeros prototipos experimentales.

4.1. Consideraciones previas

Antes de abordar el diseño del actuador, resulta conveniente recordar los elementos que conforman la arquitectura típica de un PneuNet. Estos actuadores están compuestos por un cuerpo principal con cámaras de aire segmentadas que se expanden al ser presurizadas, y una base que incorpora una capa inextensible (habitualmente papel u otros materiales inextensibles) embebida en el elastómero. Esta capa es la responsable de impedir una expansión uniforme de la estructura y provocar la flexión del actuador.

Teniendo esto en cuenta, a la hora de diseñar un actuador PneuNet es necesario considerar ciertos aspectos que afectan tanto a su capacidad de flexión como a las prestaciones mecánicas obtenidas. Los principales factores de diseño son el material con el que se fabricará el actuador y su morfología, que se resumen a continuación.

4.1.1. Materiales

Los materiales más utilizados para los PneuNet son los elastómeros. Sus propiedades mecánicas condicionan directamente la presión necesaria para producir la flexión y la fuerza que el actuador es capaz de ejercer sobre el objeto manipulado. En general, los elastómeros con un módulo de Young (E) más elevado o con una mayor dureza Shore presentan una mayor rigidez. Como consecuencia, requieren presiones superiores para alcanzar una determinada deformación, aunque pueden generar mayores fuerzas de agarre. Por el contrario, los materiales más flexibles comienzan a deformarse a presiones inferiores, pero suelen proporcionar fuerzas de salida más reducidas.

En este caso particular, al estar este trabajo enfocado a un eventual brazo robótico para manipular fruta, la selección de materiales se ha basado principalmente en su compatibilidad con la industria alimentaria. Para ello, se han buscado elastómeros con certificación *Food Safe*, con objeto de garantizar su aptitud para aplicaciones con contacto directo con alimentos. Siguiendo este criterio se seleccionaron dos elastómeros comerciales: el SORTA-CLEAR 18 de Smooth-On, con

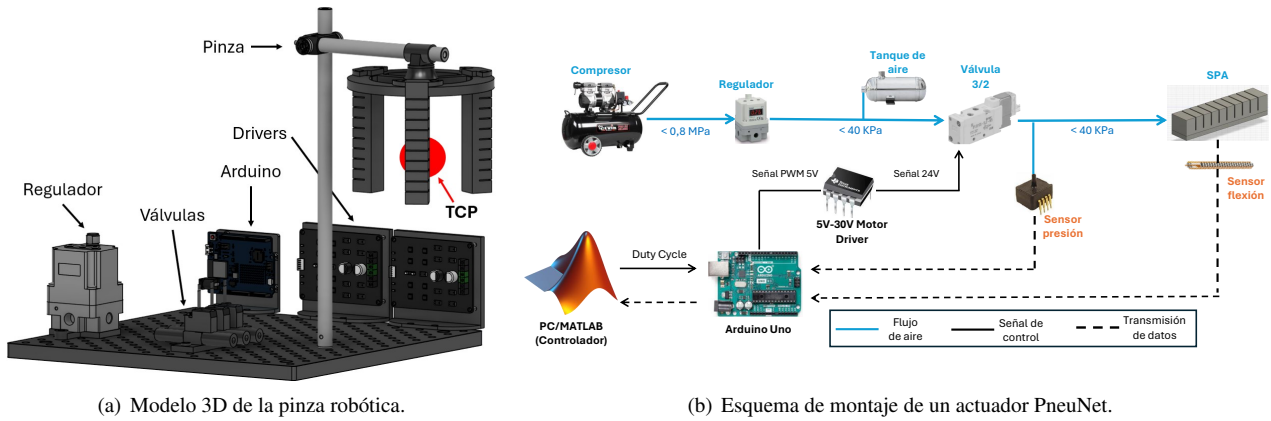


Figura 1: Diseño de la pinza robótica blanda para manipulación de fruta.

$E = 2,9$ MPa y dureza Shore A de 18, y el EASYL-925-FDA de Feroca, con dureza Shore A de 25 (el fabricante no proporciona el valor de E para este material).

Con estos dos materiales se pretende fabricar varios prototipos y realizar pruebas para determinar cuál de ellos resulta más adecuado para la aplicación planteada.

4.1.2. Geometría

A partir de la bibliografía consultada (Correia et al., 2024; Yang et al., 2023; Awada et al., 2025), se identificaron varios parámetros geométricos con una influencia significativa sobre el comportamiento del actuador, que fueron considerados durante el proceso de diseño:

- Las dimensiones de las cámaras influyen tanto en la capacidad de flexión como en la fuerza desarrollada por el actuador. En particular, un incremento de su altura y anchura tiende a aumentar la deformación angular y la fuerza ejercida en la punta. Asimismo, diversos estudios han mostrado que las cámaras con sección transversal aproximadamente cuadrada presentan un comportamiento favorable en términos de flexión frente a configuraciones excesivamente estrechas o anchas.
- El espesor de las paredes constituye un factor crítico para determinar la deformación máxima alcanzable. En general, espesores reducidos disminuyen la rigidez estructural del actuador y favorecen mayores deformaciones para una misma presión de entrada.
- El número de cámaras también influye de forma significativa en el comportamiento mecánico del PneuNet. Un número reducido limita la capacidad de flexión y el par generado, mientras que una cantidad excesiva puede favorecer fenómenos de pandeo y reducir la capacidad del actuador para transmitir fuerzas útiles durante el agarre.

A partir de las recomendaciones encontradas en la literatura, se seleccionó una geometría inicial basada en configuraciones PneuNet convencionales. La Figura 2 muestra el modelo CAD del actuador diseñado, con los siguientes detalles:

- Consta de 10 cámaras neumáticas, una configuración habitual en la literatura que proporciona un compromiso adecuado entre capacidad de flexión y complejidad

constructiva. Cada cámara presenta unas dimensiones de 3 mm de ancho, 14 mm de longitud y 13 mm de altura. Asimismo, se optó por paredes relativamente delgadas para favorecer la deformación del actuador y por una altura de cámara suficiente para incrementar la fuerza generada durante el agarre.

- Las dimensiones globales son de 20 mm de ancho, 103 mm de longitud y 15 mm de altura. Las paredes exteriores presentan espesores comprendidos entre 2 y 3 mm, salvo en la primera y última cámara, donde se incrementaron ligeramente para mejorar la robustez mecánica del conjunto.

El diseño propuesto no pretende constituir una solución optimizada para la aplicación final, sino un punto de partida para validar los procesos de simulación, fabricación y caracterización experimental

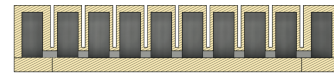


Figura 2: Sección transversal del primer diseño de PneuNet.

4.1.3. Comparación con otros diseños PneuNet recientes

En comparación con otros diseños PneuNet descritos en la literatura reciente, la propuesta presentada en este trabajo se plantea como una primera aproximación experimental orientada a una aplicación concreta de manipulación delicada de fruta. A diferencia de trabajos centrados en la optimización geométrica para maximizar fuerza de salida o resistencia al pandeo, como (Awada et al., 2025), el diseño aquí considerado prioriza una geometría sencilla, reproducible mediante moldes impresos en 3D y compatible con un proceso de fabricación de bajo coste. Asimismo, frente a enfoques de fabricación más integrados, como el uso de núcleos solubles impresos en 3D propuesto por (Silva et al., 2024), en este trabajo se emplea un proceso de moldeo en dos fases que permite fabricar las cavidades internas sin requerir técnicas de fabricación adicionales.

Otra diferencia relevante respecto a otros trabajos es la selección de materiales. Mientras que numerosos diseños PneuNet se centran principalmente en la respuesta mecánica del

elastómero, en este caso la elección del material se ha condicionado por la compatibilidad con aplicaciones alimentarias, lo que ha motivado el uso de materiales como SORTA-CLEAR 18 y EASYL-925-FDA.

4.2. Simulación del PneuNet

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del actuador antes de su fabricación, se desarrolló un modelo 3D en Autodesk Fusion y se exportó a Ansys Workbench, donde fue posible realizar las primeras simulaciones del actuador.

La Figura 3 muestra una primera estimación de la deformación experimentada por el actuador fabricado en SORTA-CLEAR sometido a una presión interna de 29 kPa. Estos resultados permitieron realizar una validación preliminar del diseño geométrico antes de proceder a la fabricación de los primeros prototipos.

La simulación se configuró como un análisis estructural estático no lineal con grandes deformaciones, considerando la acción de la gravedad y una presión interna aplicada sobre las superficies de las cámaras neumáticas. La resolución se realizó mediante el método de Newton–Raphson completo utilizando un solucionador directo *sparse*. La discretización del modelo incluyó 157.891 nodos y 114.373 elementos, empleándose elementos SOLID187 para el cuerpo elastomérico, SHELL281 para la lámina inextensible y SURF154 para la aplicación de la presión. Asimismo, se utilizó control automático de subpasos entre 20 y 1000 hasta un tiempo final de análisis de 2 s.

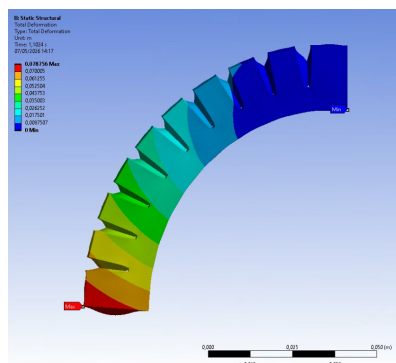


Figura 3: Resultado obtenido en Ansys con 29 kPa de presión de entrada.

4.3. Fabricación de prototipos

La fabricación de los prototipos requirió el diseño previo de moldes específicos mediante Autodesk Fusion. El proceso de fabricación adoptado se estructuró en dos etapas de vertido y curado. En una primera fase se fabrican de forma independiente la parte superior del actuador y la base que incorpora la capa inextensible. Para ello, se emplean dos de las piezas del molde para conformar las cámaras neumáticas, mientras que una tercera pieza se utiliza para fabricar la base junto con una lámina de papel embebida en el elastómero. Una vez completado el curado de ambas partes, se realiza una segunda operación de vertido que permite unir las partes en una única estructura y generar las cavidades neumáticas internas del actuador. La Figura 4 resume gráficamente las distintas etapas del proceso.

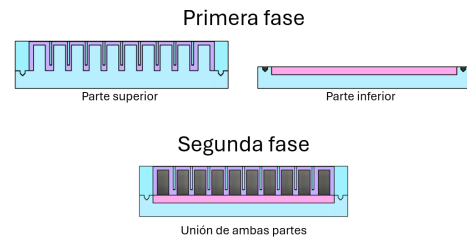


Figura 4: Proceso de fabricación del PneuNet en dos fases.

Los primeros ensayos de fabricación se realizaron utilizando el elastómero SORTA-CLEAR 18, pero este resultó dar bastantes problemas debido a la acumulación de burbujas de aire dentro del material al curarse. Los prototipos fabricados presentaron defectos que comprometían su funcionamiento. Con esto posteriormente se seleccionó el elastómero EASYL-925-FDA, empleando una proporción de mezcla 1A:1B en peso. Paralelamente, se introdujo una modificación en el diseño del PneuNet consistente en ampliar la primera cámara neumática e incorporar un conducto de conexión con el exterior, facilitando así la integración del adaptador neumático de entrada.

Los ensayos realizados con EASYL-925-FDA mostraron una mejora significativa del proceso de fabricación debido a su menor viscosidad, lo que favoreció tanto la evacuación de burbujas como el llenado uniforme de los moldes. Como resultado, fue posible obtener el primer prototipo funcional del actuador. En este contexto, se considera funcional un prototipo capaz de mantener la estanqueidad de las cámaras neumáticas y generar el movimiento de flexión previsto al ser presurizado. Dicho prototipo y moldes se muestran en la Figura 5.



Figura 5: Primer prototipo funcional fabricado con EASYL-925-FDA junto con sus moldes.

4.4. Limitaciones actuales del prototipo

La validación experimental realizada hasta el momento es preliminar y se ha centrado principalmente en comprobar la viabilidad del proceso de fabricación, la ausencia de fugas y la capacidad del actuador para inflarse y flexionarse sin sufrir daños visibles. Una vez incorporado a la plataforma descrita en el apartado 3, el actuador permitirá realizar control de presión mediante los sensores Honeywell. Sin embargo, el prototipo actual todavía no permite implementar un control de

flexión, ya que el sensor de flexión no se encuentra integrado en el actuador ni calibrado. Se plantea embeber en la base del PneuNet el sensor SpectraSymbol indicado en el apartado 3, de modo que pueda estimarse la deformación del actuador durante su funcionamiento.

5. Conclusiones

Este trabajo ha presentado los primeros avances en el desarrollo de un actuador neumático blando tipo PneuNet destinado a su integración en una pinza robótica para la manipulación de fruta. A lo largo del trabajo se han analizado los principales criterios de diseño relacionados con la selección de materiales y la definición de la geometría del actuador, así como las primeras etapas de simulación y fabricación de prototipos.

Como primer resultado, se han diseñado y fabricado mediante impresión 3D los moldes necesarios para la construcción del actuador. Los ensayos realizados han puesto de manifiesto la influencia de las propiedades reológicas del elastómero empleado sobre el proceso de fabricación. En particular, el material SORTA-CLEAR 18 presentó dificultades asociadas a su elevada viscosidad y reducido tiempo de trabajo, mientras que el uso de EASYL-925-FDA permitió obtener un primer prototipo funcional. Dicho prototipo fue capaz de mantener la estanqueidad de las cámaras neumáticas y generar el movimiento de flexión previsto durante sucesivos ciclos de inflado y desinflado.

Como segundo resultado, se desarrolló un modelo numérico del actuador mediante Ansys Workbench, obteniéndose las primeras estimaciones de su comportamiento mecánico frente a diferentes niveles de presión. Estas simulaciones constituyen una herramienta de apoyo para futuras tareas de optimización geométrica y validación experimental.

Como trabajo futuro, será necesario completar la validación experimental del actuador mediante ensayos de presión-flexión, fuerza de salida y repetibilidad, así como comparar estos resultados con el modelo numérico desarrollado en Ansys Workbench. Una vez caracterizado el comportamiento individual del actuador, el siguiente paso consistirá en integrar tres unidades PneuNet en la pinza robótica blanda propuesta y evaluar su desempeño en tareas de manipulación de fruta.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia e Innovación) a través del proyecto PID2022-141409OB-C22/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE, por la Consejería de Educación, Ciencia y Formación Profesional (Junta de Extremadura) a través de la Ayuda a Grupos GR24059, y por Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER).

Moisés Bolívar Vivas agradece a la Consejería de Economía, Empleo y Transformación Digital de la Junta de Ex-

tremadura por el “Programa Atraigo Talento” (expediente 2025/35992Q).

Referencias

- Awada, Z., Haddab, Y., Gouttefarde, M., 5 2025. PneuNet actuators design: Trade-offs between deformation, force, and resistance to buckling. *Sensors and Actuators A: Physical* 386. DOI: 10.1016/j.sna.2025.116307
- Correia, A., Charters, T., Leite, A., Campos, F., Monge, N., Rocha, A., Mendes, M. J., 12 2024. Design, control, and testing of a multifunctional soft robotic gripper. *Actuators* 13. DOI: 10.3390/act13120476
- Elgeneidy, K., Lohse, N., Jackson, M., 4 2018. Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors – a data-driven approach. *Mechatronics* 50, 234–247. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2017.10.005
- Hauser, H., Fuchslin, R., Nakajima, K., 2014. *Morphological Computation: The Body as a Computational Resource*. Self-published, Ch. 20, pp. 226–244.
- Hauser, H., Nanayakkara, T., Forni, F., 6 2023. Leveraging morphological computation for controlling soft robots: Learning from nature to control soft robots. *IEEE Control Systems* 43, 114–129. DOI: 10.1109/MCS.2023.3253422
- Laschi, C., Thurnethel, T. G., Lida, F., Merzouki, R., Falotico, E., 6 2023. Learning-based control strategies for soft robots: Theory, achievements, and future challenges. *IEEE Control Systems* 43, 100–113. DOI: 10.1109/MCS.2023.3253421
- Martín, A., Terrile, S., Barrientos, A., Cerro, J. D., 2018. Hyper-redundant robots: Classification, state-of-the-art and issues. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* 15, 351–362. DOI: 10.4995/riai.2018.9207
- Otti, M., Monsalve, D., Chapelle, F., Bouzgarrou, C., Lapusta, Y., 1 2025. Recent improvements in the development of soft grippers capable of dexterous manipulation. DOI: 10.3390/app15010275
- Santina, C. D., Duriez, C., Rus, D., 6 2023. Model-based control of soft robots: A survey of the state of the art and open challenges. *IEEE Control Systems* 43, 30–65. DOI: 10.1109/MCS.2023.3253419
- Serrano-Balbontín, A. J., Tejado, I., Vinagre, B. M., Aphale, S. S., San-Millan, A., 12 2025. Open-loop characterisation of soft actuator pressure regulated by pulse-driven solenoid valve. *Robotics* 14. DOI: 10.3390/robotics14120177
- Serrano-Balbontín, A. J., Tejado, I., Vinagre, B. M., Member, S., Aphale, S. S., San-Millan, A., 2026. Spiking control of a solenoid valve for high-precision pressure regulation in soft robotics. *IEEE CONTROL SYSTEMS LETTERS* 12, 2026. DOI: 10.13039/501100011033/FEDER
- Shintake, J., Caccuciolo, V., Floreano, D., Shea, H., 7 2018. Soft robotic grippers. DOI: 10.1002/adma.201707035
- Silva, A., Fonseca, D., Neto, D. M., Babinschi, M., Neto, P., 2024. Integrated design and fabrication of pneumatic soft robot actuators in a single casting step. *Cyborg and Bionic Systems* 5. DOI: 10.34133/cbsystems.0137
- Tang, D., Zhu, Z., Zhang, Y., 12 2025. Pneumatic soft actuator: A review of design, modeling and applications. DOI: 10.1177/09544062251370852
- Yang, W. T., Stuart, H. S., Tomizuka, M., 2023. Mechanical modeling and optimal model-based design of a soft pneumatic actuator. In: *2023 IEEE International Conference on Soft Robotics, RoboSoft 2023*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 1000. DOI: 10.1109/RoboSoft55895.2023.10122083
- Zhang, Y., Man, J., Liu, X., Li, S., Cao, B., Yu, L., Tan, X., 2025. Soft robotic grippers: a review. DOI: 10.3389/fmats.2025.1692206