

Diseño e implementación de un sistema mínimo neumático para robots suaves Design and implementation of a minimal pneumatic system for soft robots

Jim S. Palacios-Lazo ^{a,*}, Fabrizio R. Cahuas-Talledo ^b, Emanuel Ortiz-Ortiz ^c, Viridiana Luna-Zempoalteca ^b,
René Tolentino-Eslava ^d

^aEscuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica Unidad Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, 02250, CDMX, México.

^bUnidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional, 07340, CDMX, México.

^cCentro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo, Instituto Politécnico Nacional, 07738, CDMX, México.

^dEscuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, 07738, CDMX, México.

Resumen

La robótica suave, un campo emergente en la ingeniería robótica, ha avanzado significativamente en los últimos años. Estos robots, fabricados con materiales elastoméricos, pueden ejecutar movimientos altamente flexibles, imitando organismos biológicos. Son útiles en entornos médicos, asistencia personal, rehabilitación y manipulación de objetos delicados. Los robots suaves incluyen un actuador suave y un mecanismo de actuación, destacando los actuadores neumáticos tipo PneuNet, que funcionan con una red de cámaras de elastómero que se expanden con aire comprimido para generar movimientos precisos. El sistema neumático tradicional es complejo y voluminoso, lo que ha impulsado la necesidad de soluciones más compactas. Se propone el desarrollo de un prototipo neumático portátil que emplea microcompresores de aire capaces de suministrar presiones superiores a 200 KPa, junto con válvulas solenoides y sensores de presión controlados por microcontroladores. Esto permite una monitorización de la presión interna y el grado de deformación, reduciendo tamaño y costo de los componentes necesarios para el suministro de aire presurizado.

Palabras Clave: Robótica suave, PneuNet, Sistema de actuación neumática, Sistema embebido, Análisis FEM.

Abstract

Soft robotics, an emerging field, has made significant progress in recent years. These robots, made of elastomeric materials, can perform highly flexible movements that mimic biological organisms. They are useful in medical applications, personal assistance, rehabilitation, and manipulation of delicate objects. Soft robots include a soft actuator and actuation mechanism, most notably PneuNet pneumatic actuators, which operate with a network of elastomeric chambers that expand with compressed air to generate precise motions. The traditional pneumatic system is complex and bulky, which has driven the need for more compact solutions. The development of a portable pneumatic prototype is proposed, using miniature air compressors capable of delivering pressures in excess of 200 KPa, together with solenoid valves and pressure sensors controlled by microcontrollers. This will allow monitoring of the internal pressure and degree of deformation, reducing the size and cost of the components required to provide compressed air.

Keywords: Soft Robotics, PneuNet, Pneumatic System Actuation, Embedded System, FEM Analysis.

1. Introducción

Actualmente los robots suaves han demostrado tener ventajas sobre los robots convencionales, principalmente por replicar las características de los tejidos biológicos (Polygerinos *et al.*, 2017), (Qi *et al.*, 2020), (Xavier *et al.*, 2019) lo cual, permite tener interacciones seguras y adaptables con el cuerpo humano o en entornos sensibles y de difícil acceso.

A pesar de las grandes ventajas de aplicación que ofrecen los robots suaves, su construcción conlleva grandes retos. Uno de ellos es la selección de actuadores para generar movimientos de expansión, compresión y desplazamiento longitudinal o transversal (Yang *et al.*, 2020). Para tal complejidad el uso de sistemas de actuación neumáticos surgen como una solu-

*Autor para correspondencia: jpalacio12300@alumno.ipn.mx

Correo electrónico: jpalacio12300@alumno.ipn.mx (Jim Steven Palacios-Lazo), fcahuast2300@alumno.ipn.mx (Fabrizio Ricardo Cahuas-Talledo), eortizo1901@alumno.ipn.mx (Emanuel Ortiz-Ortiz), vlunaz2300@alumno.ipn.mx (Viridiana Luna-Zempoalteca), rtolentino@ipn.mx (René Tolentino-Eslava).

Historial del manuscrito: recibido el 30/06/2024, última versión-revisada recibida el 08/08/2024, aceptado el 05/08/2024, publicado el 30/11/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13333>



ción bastante empleada en diversos prototipos de robots suaves (Walker *et al.*, 2020), ya que, permiten regular los movimientos de los actuadores suaves empleando una cantidad controlada de aire o líquido. En (Pratap *et al.*, 2017) se implementa un prototipo de robot suave con un sistema de actuación neumático que permite al robot generar movimientos de flexión para trepar paredes con el objetivo de poder inspeccionar tuberías.

Existen diversos actuadores neumáticos, sin embargo, en el área de la robótica suave los más empleados son los actuadores neumáticos tipo PneuNet, los cuales se ilustran en la Figura 1. Estos actuadores consisten en una red neumática de canales o cámaras en el interior de un elastómero que se expanden al llenarse de aire comprimido, provocando movimientos de flexión y expansión unidireccional (Su *et al.*, 2022), (Jeong *et al.*, 2023). Los PneuNets emplean un sistema neumático compuesto por una red de bombas neumáticas y válvulas con accionamiento de doble efecto para un control óptimo del flujo en el sistema de cámaras de elastómero.

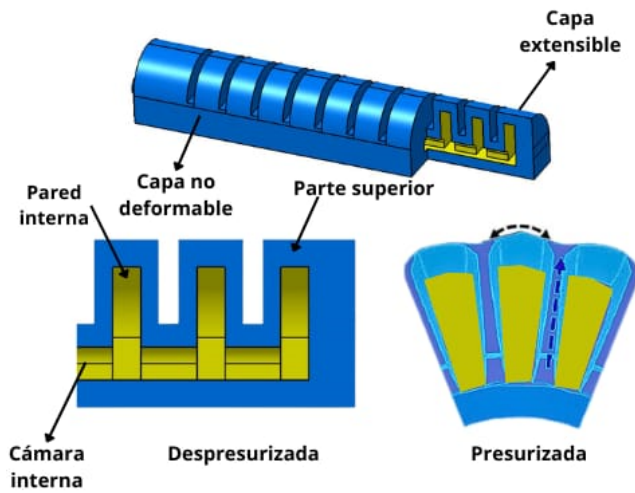


Figura 1: Partes de un actuador neumático tipo PneuNet y su comportamiento cuando está despresurizado y presurizado.

Para suministrar aire a estos actuadores, generalmente se utilizan instalaciones neumáticas fijas de tipo industrial, las cuales obligan al usuario a permanecer dentro de un laboratorio de pruebas. Además, estas instalaciones requieren componentes robustos con salidas de presión bastante elevadas (Rus y Tolley, 2015). Sin embargo, el uso de presiones altas puede ocasionar la ruptura de estos actuadores suaves.

Por lo anteriormente expuesto, se propone en este artículo el diseño y la instrumentación de un sistema mínimo neumático capaz de suministrar una cantidad determinada de aire a un actuador neumático suave, el cual, para efectos de prueba de este estudio, será de tipo gripper. Este sistema neumático busca ser portátil, de fácil manejo y adaptable a otros proyectos de robótica suave que requieran distintos niveles de presión. Estos niveles de presión dependerán del tipo de prototipo de actuador neumático que se emplee. Para definir el diseño del sistema neumático, primero se realiza un estudio de la presión máxima necesaria para deformar el actuador y, a partir de ello, se seleccionan los componentes electroneumáticos que permitan

satisfacer estas necesidades.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se presentan los antecedentes teóricos sobre los procesos termodinámicos que ocurren en el interior del sistema de actuación. La Sección 3 describe el diseño del actuador neumático suave, su fabricación mediante impresión 3D, así como el análisis y las simulaciones numéricas para estimar la deformación en función de la variación de presión. La Sección 4 detalla la selección de componentes realizada en función de los resultados obtenidos en la sección anterior. La Sección 5 explica el desarrollo de la instrumentación del sistema neumático propuesto. En la Sección 6, se examinan los resultados obtenidos, y finalmente, la Sección 7 concluye el artículo.

2. Antecedentes teóricos

En los actuadores neumáticos, los modelos termodinámicos permiten predecir el comportamiento del aire comprimido, incluyendo la relación entre presión, volumen y temperatura, así como el impacto de estos factores en el rendimiento del sistema.

La ley de los gases ideales:

$$PV = nRT, \quad (1)$$

describe la relación entre la presión, el volumen y la temperatura de un gas ideal, donde n es el número de moles de gas y R es la constante de los gases ideales ($R = 287 \text{ Nm/KgK}$) (Adami y Seibel, 2018), (Xavier *et al.*, 2020). Aunque los gases reales no se comportan exactamente como gases ideales, esta ecuación proporciona una aproximación útil para diseñar y analizar sistemas neumáticos.

Las reacciones químicas en recipientes cerrados que contienen un gas ideal pueden causar cambios en la presión. La variación de la presión depende de si las reacciones son exotérmicas o endotérmicas, lo cual se determina por el cambio de entalpía del sistema (Adami y Seibel, 2018). Estos procesos, que implican cambios de temperatura, pueden afectar la presión conforme a la ley de Gay-Lussac. Esta ley, derivada de la ley de los gases ideales, establece que a volumen constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}. \quad (2)$$

Durante una expansión isotérmica que transcurre del estado inicial 1 al estado final 2, con un número constante de moles de gas y temperatura constante ($T_1 = T_2$), se puede aplicar la Ley de Boyle. Esta ley indica que el volumen de un gas es inversamente proporcional a su presión.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2. \quad (3)$$

Este principio es fundamental para el diseño de robots suaves, ya que facilita el cálculo de la variación de la presión dentro de una cámara cuando el volumen cambia debido al movimiento de flexión del actuador. Esto depende significativamente de la dureza del material de fabricación, dado que mayor rigidez implica menor cambio en el volumen de las cámaras internas del actuador, permitiendo considerar el material como casi incompresible.

3. Análisis de requerimientos

Para realizar el diseño del sistema mínimo neumático, es necesario comenzar con el diseño del actuador neumático suave. Este artículo se limita a usar un solo tipo de actuador, el cual será en forma de gripper, y permitirá evaluar el rendimiento del sistema mínimo neumático, como se menciona anteriormente. Esta etapa de diseño permitirá obtener el modelo 3D necesario para realizar la estimación del rango de presión mediante simulaciones numéricas, bajo el cual deberá operar el sistema mínimo neumático propuesto.

3.1. Diseño del actuador neumático de prueba

El diseño del actuador neumático tipo PneuNet considera tres parámetros fundamentales que influyen significativamente en la presurización de este tipo de actuadores: la geometría de los canales internos y externos, el espesor de las paredes del actuador y las propiedades físicas y mecánicas del material, como la dureza.

La Figura 2 presenta el modelo CAD del actuador, elaborado en el software CATIA V5. La fabricación de este actuador integra el método de moldeo (Manns *et al.*, 2018), para obtener el cuerpo del actuador y la impresión 3D para obtener los moldes sobre los cuales se realizará el vaciado del elastómero líquido. Estos moldes se obtienen al diseñar el negativo del cuerpo del actuador y se fabrican usando PLA ya que este material no causa inhibición con la silicona al momento del curado.

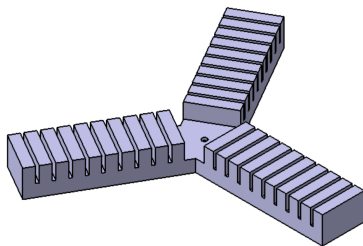


Figura 2: Diseño CAD del actuador neumático tipo PneuNet en forma de gripper.

La fabricación se llevó a cabo utilizando la silicona Ecoflex 00-30, un elastómero comúnmente empleado en la producción de actuadores suaves. Este material requiere un proceso de desgasificación al vacío para eliminar las burbujas y un tiempo de curado de 4 horas a temperatura ambiente, de acuerdo con las indicaciones del fabricante. El proceso realizado para la fabricación se muestra en la figura 3.

Para producir los diferentes movimientos del actuador es necesario contar con un sistema de actuación neumática que permita obtener un inflado rápido gracias a la baja viscosidad del aire, lo que permite un movimiento de flexión más rápido.

Para definir los requerimientos de presión del sistema neumático, es esencial realizar un análisis de elementos finitos (FEM) antes de la fabricación. Este análisis permite estimar la relación presión-deformación del actuador neumático utilizado en las pruebas del sistema de alimentación, lo que facilita el diseño de un sistema neumático que cumpla con los parámetros de rendimiento establecidos en simulación.

3.2. Análisis de la relación Presión-Deformación en el actuador

El uso del método de elementos finitos (FEM) en el diseño del actuador suave es importante para estimar las deformaciones del actuador bajo distintas presiones. Empleando el software Abaqus, es posible estudiar el comportamiento hiperelástico no lineal del elastómero utilizado (Silicona Ecoflex 00-30), basado en el modelo matemático de Yeoh (Xavier *et al.*, 2021). Este modelo se obtiene a partir de las curvas de tensión-deformación derivadas de ensayos uniaxiales de tracción, proporcionando una descripción detallada del comportamiento del material bajo diversas condiciones de carga.

En el método de elementos finitos es importante realizar un análisis de convergencia de malla para asegurar la precisión y estabilidad de los resultados. Un análisis de convergencia de malla garantiza que los resultados obtenidos no dependan del tamaño y la forma de los elementos de la malla, sino que representen de la manera más realista posible el comportamiento del sistema físico.

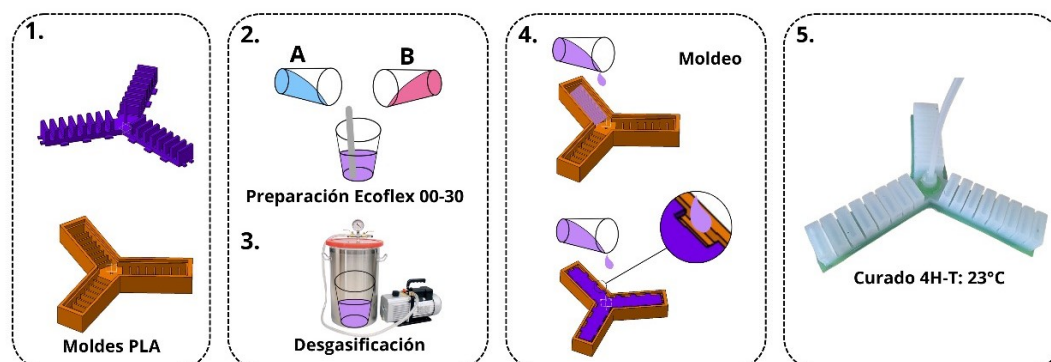


Figura 3: Proceso de fabricación del actuador neumático suave tipo gripper. 1. Diseño y fabricación de moldes en PLA mediante impresión 3D. 2. Preparación de la silicona y el catalizador en una mezcla 1A:1B. 3. Proceso de desgasificación al vacío a 1bar de presión negativa. 4. Proceso de Vaciado de la silicona en los moldes en dos tiempos. 5. Curado del actuador a temperatura ambiente durante 4H hasta la polimerización de la resina.

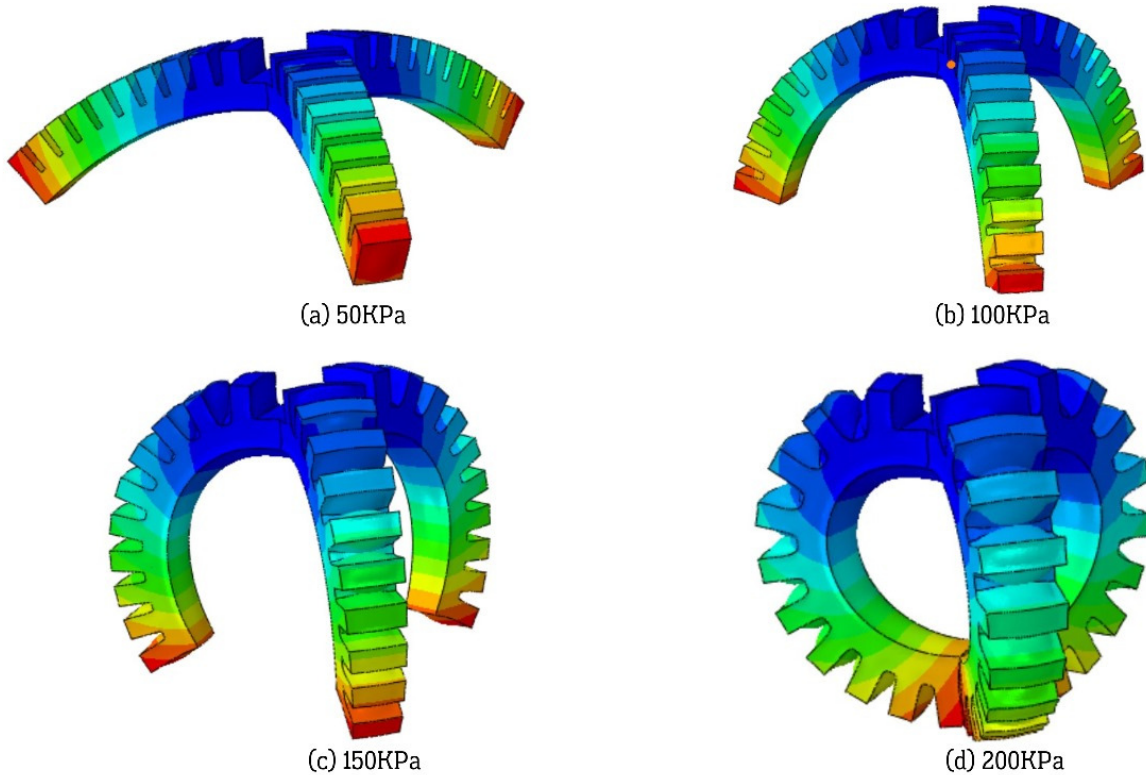


Figura 4: Simulaciones numéricas de elementos finitos, movimientos de flexión provocados por diferentes presiones de entrada.

Este proceso es empírico e implica refinar progresivamente la malla hasta que las variaciones en los resultados de deformaciones o acumulación de tensiones de las zonas críticas del actuador sean insignificantes, confirmando así la fiabilidad del modelo numérico. Para ello se siguieron las recomendaciones de convergencia dadas en (Xavier *et al.*, 2021).

Considerando los resultados obtenidos tras realizar este análisis, se concluye que un mallado con 292,749 elementos sólidos cuadráticos y una formulación híbrida C3D10H es adecuado para esta simulación. Se utiliza un tamaño global de elementos de 1.2 mm y un refinamiento en las zonas críticas de 0.8 mm.

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos mediante simulación numérica. En esta figura se observa la posición final del actuador tras deformarse como consecuencia de los distintos valores de presión aplicada. Con estos resultados, es posible estimar el valor de la presión necesaria para lograr la deformación completa del actuador. En particular, se determina que con una presión de 200 KPa, el actuador se deforma completamente hasta tocarse en sus extremos (Figura 4(d)).

Para poder suministrar dicha cantidad de presión es necesario contar con un sistema mínimo neumático. Para ello, se deben seleccionar adecuadamente los componentes electro-neumáticos que permitan obtener una salida de presión absoluta que satisfaga estas necesidades (200 KPa).

4. Componentes del Hardware

4.1. Microcompresor

Los microcompresores empleados en robótica suave son pequeñas bombas accionadas por un motor que comprimen aire para proporcionar presión neumática absoluta, la cual genera el movimiento de los actuadores neumáticos suaves (Wehner *et al.*, 2014).

El microcompresor seleccionado para el sistema mínimo neumático es de desplazamiento positivo mediante diafragma. Este dispositivo reduce el volumen de una cantidad determinada de aire ambiente en la cámara de compresión, lo que provoca un aumento de la presión interna hasta alcanzar el valor de diseño, y posteriormente libera el aire al sistema (Adami y Seibel, 2018). Dado su uso en entornos sensibles, los microcompresores suelen estar diseñados para operar con bajos niveles de ruido y vibración.



Figura 5: Microcompresor de aire de 12V DC, presión máxima de 220 KPa.

La figura 5 presenta el microcompresor de 12V DC seleccionado para este proyecto, debido a su capacidad para ofrecer una presión máxima de salida de 220 KPa y un flujo de aire de 15L/min. Este componente fue elegido debido a que cumple con los requerimientos de presión estimados a través de las simulaciones numéricas, cuyos resultados se muestran en la sección 3.2.

4.2. Válvula Solenoide de 3 vías

Las válvulas solenoides son dispositivos electromecánicos diseñados para controlar el flujo de fluidos mediante un campo magnético, generado por una bobina eléctrica. Cuando el solenoide es energizado por corriente continua (DC), la fuerza provocada por el campo magnético desplaza el vástago, permitiendo así la apertura del orificio de la válvula, lo que da paso al flujo de aire comprimido hacia el actuador.

En su posición inicial, la válvula bloquea el flujo de aire desde el puerto de entrada (I) y conecta el puerto de salida (O) con el puerto de escape (Atm). Cuando se energiza la bobina, la válvula cambia de posición, conectando el puerto de entrada (I) con el puerto de salida (O) y bloqueando el puerto de escape (Atm), como se observa en la figura 6.

Las características de la válvula seleccionada se muestran en la figura 6, estas incluyen una tensión de funcionamiento entre 5V y 6V, y una corriente de 100mA $\pm$ 10 %, lo que la hace óptima para su conexión a una de las salidas del Arduino. Además, cuenta con un diámetro de la boquilla de aire de $\varnothing$ 3mm.

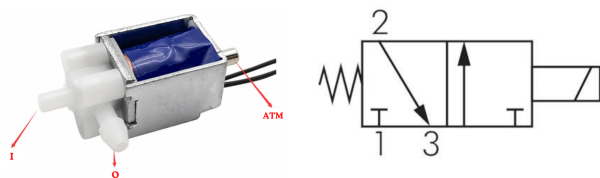


Figura 6: Válvula solenoide de 3 vías (3/2).

La función de esta válvula en el sistema mínimo neumático es controlar la cantidad de flujo de aire o la presión que deja pasar hacia el actuador, para ello es necesario utilizar una señal de PWM (Pulse Width Modulation) del Arduino. Esta señal PWM se genera en los pines específicos que están marcados con el símbolo (~).

4.3. Sensores de presión

El sistema neumático propuesto requiere únicamente de sensores de presión. Estos sensores son dispositivos que miden la presión de gases o líquidos y la convierten en una señal eléctrica para sistemas de control y monitoreo (Zhang *et al.*, 2022), (Vailati y Goldfarb, 2020). Estos dispositivos necesitan un circuito de conexión para funcionar correctamente, sin embargo, algunos modelos en el mercado ya incluyen estos circuitos integrados. Entre estos, la marca “CFSensor” ofrece dos modelos: el XGZP6847A100KPGPN, que trabaja con presiones de $\pm$ 100 KPa, y el XGZP6847A500KPG, que opera en el rango de 0–500 KPa los cuales se pueden observar en la Figura 7.

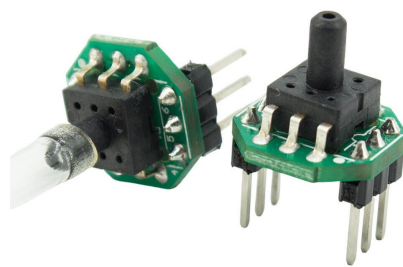


Figura 7: Sensor XGZP6847A500KPG de 500KPa.

Estos sensores de presión destacan por su alta sensibilidad y precisión, siendo especialmente adecuados para aplicaciones que requieren un monitoreo y control exactos de la presión. Basados en tecnología piezo-resistiva, son capaces de proporcionar mediciones exactas y fiables en un amplio rango de presiones. Emiten una señal de salida analógica proporcional a la presión medida y operan en un rango de voltaje de 2.7V a 5.5V.

Se seleccionaron estos sensores porque vienen calibrados de fábrica, lo que elimina la necesidad de realizar una etapa de calibración, y además ofrecen facilidad de instalación. El tiempo de muestreo del sensor de presión es de 2.5 ms, según el fabricante.

4.4. Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto (hardware y software). Por lo general esta plataforma está basada en un microcontrolador AVR-ATmega328P. Para programar esta plataforma, se usa el entorno de Arduino IDE basado en processing y en la estructura del lenguaje de programación Wiring. Esta plataforma cuenta con 14 pines de entrada y salida digitales, de los cuales 6 pueden ser utilizados para generar una señal de salida PWM y 6 son entradas analógicas.

La señal de PWM generada por el Arduino es una señal periódica, es decir, se repite con el tiempo y puede ser modificada a través de su ciclo de trabajo (Duty Cycle). El PWM de un pin del Arduino genera una señal binaria que es de 0V o 5V. Esta señal puede configurarse de manera que funcione durante un tiempo determinado en encendido (5V) y el resto del tiempo en Apagado (0V), repitiendo este procedimiento de forma infinita.

Dado que el microcontrolador del Arduino UNO tiene una resolución de 8 bits, la salida PWM cuenta con 256 niveles. Por lo tanto, el ciclo de trabajo se representa mediante un número del 0 al 255.

En este artículo se usará el Arduino Uno como fuente de alimentación para la válvula y los sensores, los cuales necesitan un voltaje de 5V. Además, se encargará de adquirir los datos del sensor de presión y enviar una señal PWM al microcompresor y/o a la válvula.

En la figura 8 se muestra la plataforma Arduino que se va a utilizar.

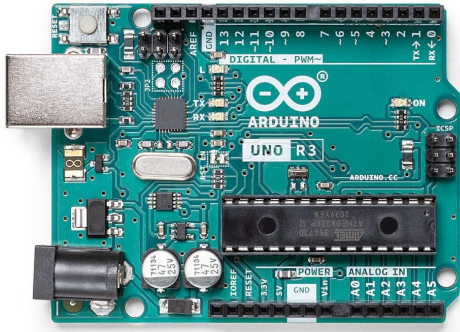


Figura 8: Arduino Uno.

$$P = \frac{(V_{salida} - 0,5)}{k}, \quad (4)$$

donde $K = 0,008$.

Dado que los pines digitales del Arduino solo pueden suministrar 0.2 W, se opta por agregar una etapa de potencia. Esta etapa está compuesta por un transistor que regula la señal de salida del Arduino, permitiéndole controlar cargas de mayor potencia.

En la figura 9 se muestra la conexión para el microcompresor de 12V y para una válvula de 3 vías 3/2 de 6V. Para el microcompresor se conecta la base del transistor *2n2222* al pin digital D3, el emisor se conecta a GND y el colector se conecta a 12V con el microcompresor y un diodo *1N4001* en paralelo. Es importante recordar que el GND de la fuente se conecta al GND del Arduino. En el caso de la válvula se conecta el pin digital D9 a la base del transistor *2n2222*, el emisor se conecta a GND y colector se conecta al pin de 5V del Arduino y los cables de la válvula se conectan en paralelo a un diodo *1N4001*.

Por cuestiones de seguridad se considera colocar en paralelo un diodo *1N4001* con los cables del microcompresor para evitar que la electricidad generada dañe al circuito. Otra conexión necesaria es colocar una resistencia a la salida del pin del Arduino, que se usa para activar el transistor. Esto se hace para limitar la corriente de salida del pin. Una resistencia de 220 Ω es suficiente ya que se usa una tensión de 5V. En este caso los pines digitales D9 y D3, tienen una resistencia conectada a su salida.

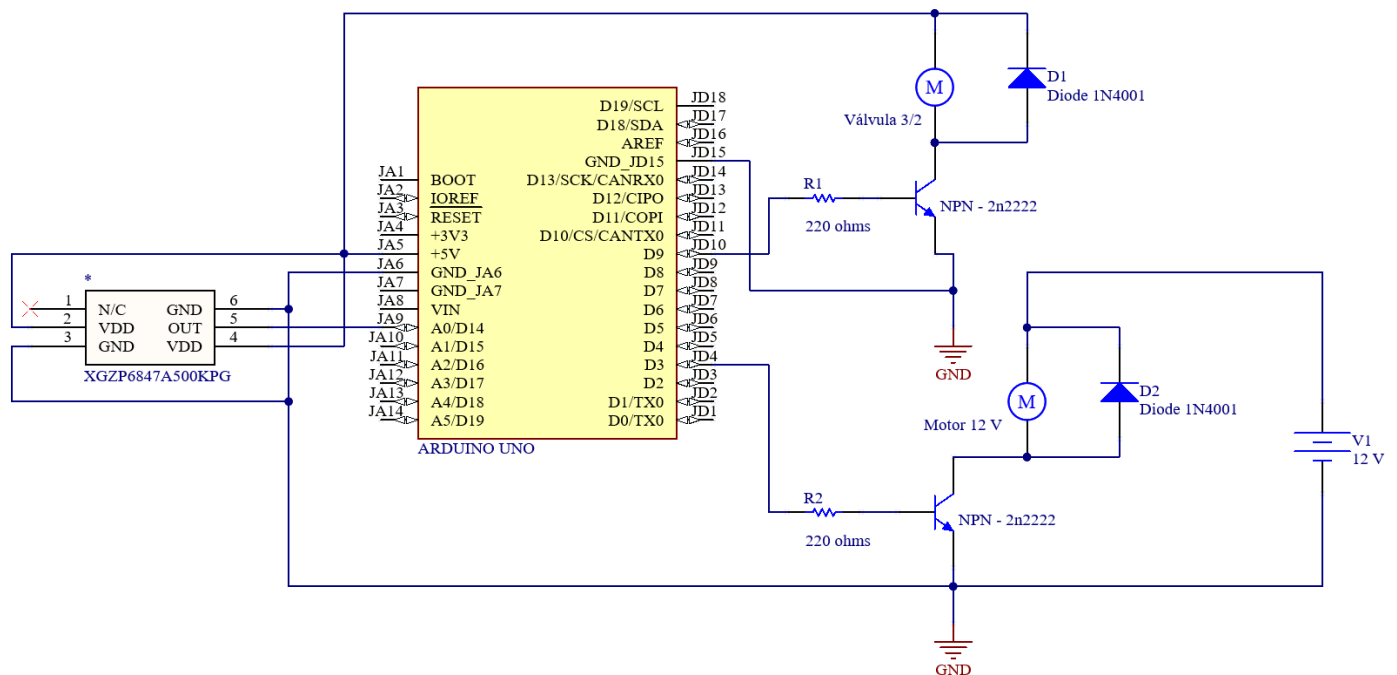


Figura 9: Esquemático del circuito de adquisición de datos y control.

5.2. Conexiones del circuito neumático

Se utiliza una fuente de 12V para suministrar energía al microcompresor. Para alimentar la válvula y el sensor se utilizó el pin de 5V del Arduino. En la figura 10 se muestra el PCB (Printed Circuit Board) del sistema mínimo neumático. En este PCB se integra un transistor, un diodo y una resistencia, según el esquemático mostrado en la figura 9 permitiendo así aplicar una señal de PWM al microcompresor. Además, se agregaron 3 borneras en el PCB, una es para la entrada de 12 V y las otras 2 son salidas de 5V y 12V respectivamente.

Comentario 1. En este artículo solo se va a utilizar una señal PWM para el microcompresor y no para la válvula. Sin embargo la etapa de potencia se dejará implementada para que el usuario pueda utilizar una señal PWM para cualquiera de los dos componentes.

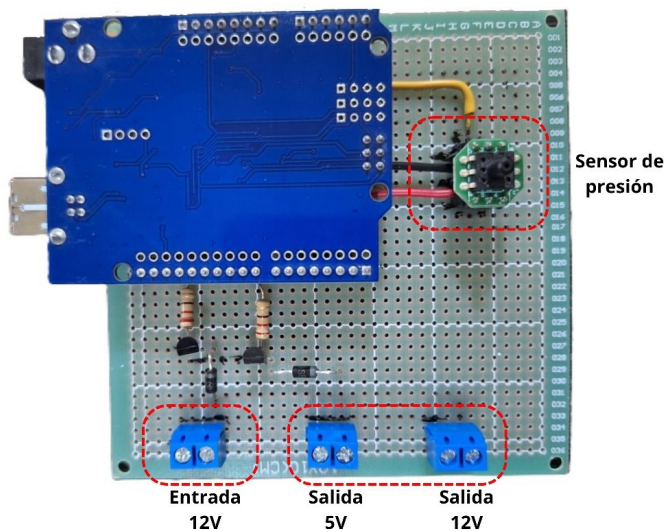


Figura 10: PCB del circuito de adquisición de datos y control.

La salida positiva de aire del microcompresor se conectó a través de una manguera de silicona de 3 mm de diámetro interior al puerto de entrada (I) de la válvula solenoide y a su salida se usó un conector en T para dirigir el aire hacia el sensor y hacia el actuador tal y como se muestra en la Figura 11.

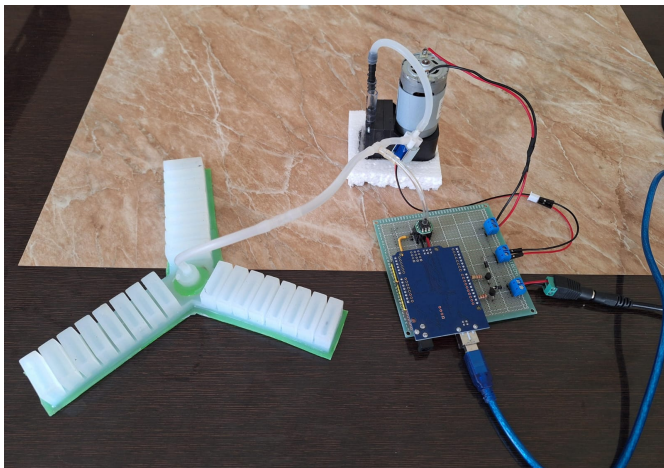


Figura 11: Sistema mínimo neumático conectado al actuador.

6. Análisis de resultados

6.1. Adquisición de datos

El IDE de Arduino permite graficar datos con respecto al tiempo. En este caso se aprovecha esta herramienta para visualizar los datos adquiridos del sensor de presión. Para adquirir esta información del sensor, se usa un pin analógico del Arduino y en el IDE se usa la función *analogRead()*, la cual permite leer datos analógicos. Para convertir esos datos analógicos a presión se usa la formula 4.

Inicialmente, se llevaron a cabo pruebas conectando únicamente el microcompresor y el sensor. El objetivo era verificar que el sensor midiera correctamente la variación de presión en el microcompresor inducida por el PWM. En la Figura 12, se presenta un ejemplo de los datos obtenidos al aplicar una variación en la señal PWM del microcompresor, ajustándola del 30 % al 70 % y viceversa.

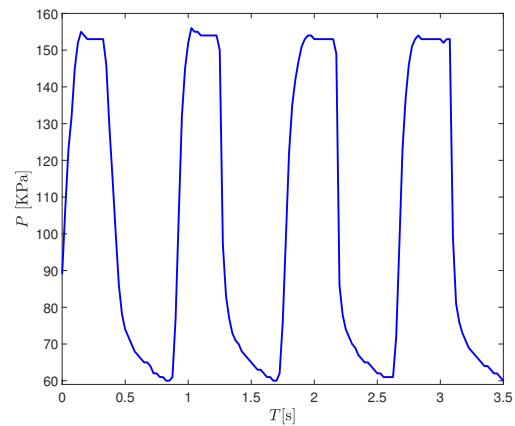


Figura 12: Adquisición de la presión mediante el sensor a distintos valores de PWM.

En la Figura 13 se verifica cual es la presión máxima que entrega el microcompresor cuando se envía el 100 % de la señal PWM, obteniendo una presión máxima de 216 KPa. Se observa en esta figura que la respuesta del microcompresor tiene un pequeño retardo para alcanzar la presión máxima.

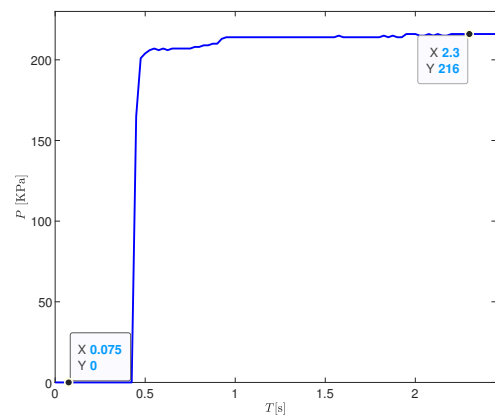


Figura 13: Adquisición de la presión máxima del microcompresor.

En las Figuras 12 y 13, se demuestra que es posible variar la presión generada por el microcompresor mediante la configuración presentada en la Figura 9, utilizando un pin de PWM del

Arduino. También se observa que el sistema es capaz de leer los datos del sensor.

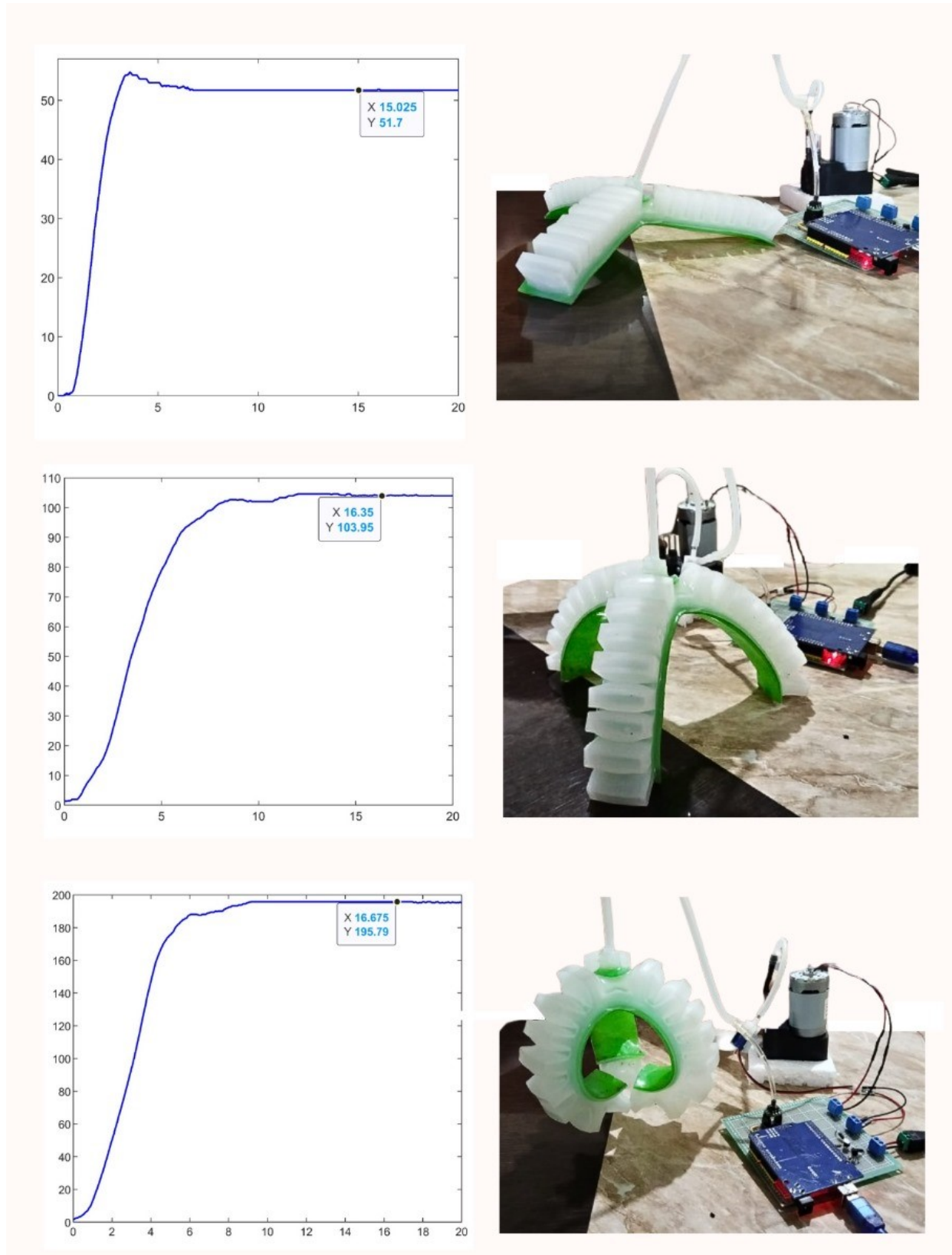


Figura 14: Resultados experimentales realizados con el sistema mínimo neumático propuesto a diferentes valores de PWM. A la izquierda se presentan los datos obtenidos por el Sensor de presión al variar el PWM de 25 %, 45 % y 90 %. A la derecha se muestran las deformaciones del actuador de prueba al aplicar dicho PWM al microcompresor.

En la Figura 14, se presentan los resultados experimentales obtenidos al implementar las diversas etapas del diseño del sistema mínimo neumático propuesto. La fabricación del actuador neumático suave permitió validar el sistema neumático al aplicar diferentes valores de PWM al microcompresor, lo que a su vez varió su salida de presión. Como resultado, se obtuvieron distintas deformaciones en el actuador, tal como se muestra en la figura. Estas imágenes ilustran la variación de los valores de presión hasta alcanzar la deformación completa del objeto de prueba. Estos resultados experimentales también permiten validar los comportamientos del actuador obtenidos mediante simulación, ya que muestran comportamientos muy similares.

Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante simulación numérica indican que se requiere un sistema neumático capaz de proporcionar una presión máxima de 200 kPa para lograr la deformación completa del objeto de prueba (gripper). Los resultados experimentales muestran que el sistema neumático mínimo propuesto es capaz de suministrar un rango de presión positiva de 0 a 216 kPa. Las pruebas realizadas con el actuador demuestran que se alcanza una deformación total con un PWM al 90 %, equivalente a una presión de 195 kPa. Esta ligera diferencia puede atribuirse a factores ambientales que no se consideran en la simulación. No obstante, el error relativo es del 2 %, lo que hace que los resultados sean considerados aceptables.

En la instrumentación del sistema mínimo neumático se logró implementar la etapa de potencia, lo que permitió que el Arduino pudiera accionar un microcompresor o una válvula mediante una señal PWM. Además, se implementó la etapa de adquisición de datos, donde se recuperó la gráfica de la presión generada por el microcompresor.

A partir del esquema presentado para la instrumentación y los componentes seleccionados, se puede concluir que el sistema mínimo neumático propuesto es portátil. Esto ofrece varias ventajas, como la posibilidad de utilizarlo en diversos entornos sin necesidad de infraestructura adicional, y la facilidad de transporte y almacenamiento, lo que lo hace ideal para incorporarlo en otros trabajos. Asimismo, su diseño compacto permite integrarlo fácilmente en sistemas más grandes y complejos, y su fácil manejo facilita el mantenimiento y la configuración.

El diseño del actuador neumático suave permitió validar el sistema mínimo neumático mediante pruebas experimentales, demostrando su eficacia y confiabilidad en condiciones controladas y reales. Esta validación experimental proporciona una

base sólida para futuras mejoras y aplicaciones del sistema en diversos campos industriales y de investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la secretaria de investigación y posgrado del Instituto Politécnico Nacional por los apoyos otorgados por medio de los proyectos SIP 20241197 y 2024-A317.

Referencias

- Adami, M. y Seibel, A. (2018). On-board pneumatic pressure generation methods for soft robotics applications. En *Actuators*, volumen 8, p. 2. MDPI.
- Jeong, H. B., Kim, C., Lee, A., y Kim, H.-Y. (2023). Sequential multimodal morphing of single-input pneu-nets. *Soft Robotics*, 10(6):1137–1145.
- Manns, M., Morales, J., y Frohn, P. (2018). Additive manufacturing of silicon based pneunets as soft robotic actuators. *Procedia Cirp*, 72:328–333.
- Polygerinos, P., Correll, N., Morin, S. A., Mosadegh, B., Onal, C. D., Petersen, K., Cianchetti, M., Tolley, M. T., y Shepherd, R. F. (2017). Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction. *Advanced engineering materials*, 19(12):1700016.
- Pratap, L. P., Shailendrasingh, P. M., Anand, A., y Tharun, V. (2017). Wall climbing robot using soft robotics. En *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, pp. 1860–1864. IEEE.
- Qi, X., Shi, H., Pinto, T., y Tan, X. (2020). A novel pneumatic soft snake robot using traveling-wave locomotion in constrained environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2):1610–1617.
- Rus, D. y Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553):467–475.
- Su, H., Hou, X., Zhang, X., Qi, W., Cai, S., Xiong, X., y Guo, J. (2022). Pneumatic soft robots: Challenges and benefits. En *Actuators*, volumen 11, p. 92. MDPI.
- Vailati, L. G. y Goldfarb, M. (2020). A method for mass flow and displacement estimation in a pneumatic actuation system using valve-based pressure sensing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26(1):235–245.
- Walker, J., Zidek, T., Harbel, C., Yoon, S., Strickland, F. S., Kumar, S., y Shin, M. (2020). Soft robotics: A review of recent developments of pneumatic soft actuators. En *Actuators*, volumen 9, p. 3. MDPI.
- Wehner, M., Tolley, M. T., Mengüç, Y., Park, Y.-L., Mozeika, A., Ding, Y., Onal, C., Shepherd, R. F., Whitesides, G. M., y Wood, R. J. (2014). Pneumatic energy sources for autonomous and wearable soft robotics. *Soft robotics*, 1(4):263–274.
- Xavier, M. S., Fleming, A. J., y Yong, Y. K. (2019). Image-guided locomotion of a pneumatic-driven peristaltic soft robot. En *2019 IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO)*, pp. 2269–2274. IEEE.
- Xavier, M. S., Fleming, A. J., y Yong, Y. K. (2020). Modelling and simulation of pneumatic sources for soft robotic applications. En *2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 916–921. IEEE.
- Xavier, M. S., Fleming, A. J., y Yong, Y. K. (2021). Finite element modeling of soft fluidic actuators: Overview and recent developments. *Advanced Intelligent Systems*, 3(2):2000187.
- Yang, Y., Wu, Y., Li, C., Yang, X., y Chen, W. (2020). Flexible actuators for soft robotics. *Advanced Intelligent Systems*, 2(1):1900077.
- Zhang, B., Chen, J., Ma, X., Wu, Y., Zhang, X., y Liao, H. (2022). Pneumatic system capable of supplying programmable pressure states for soft robots. *Soft robotics*, 9(5):1001–1013.