



Simulación de los Movimientos de un Robot Flexible Utilizando Actuadores Piezoeléctricos

Francisco Jesús Ramos García, Josué Gómez Casas, Esteban Guerra Bravo, Carlos Alberto Toro Arcila, Juan Carlos Anaya Zavaleta, Enoc Isai Martínez Jiménez, Jonathan Sebastian Obregón Flores, Juan Carlos Ortiz Cuellar y Oziel Gómez Casas

Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila.
*J. Gómez Casas: jogomezc@uadec.edu.mx.

Resumen

Los robots flexibles son diseñados con materiales hiperelásticos llamados elastómeros, con los cuales se logra la imitación del movimiento de sistemas biológicos como los tentáculos de un pulpo, la trompa de un elefante y el deslizamiento de una serpiente. El uso de actuadores tradicionales basados en principios neumáticos e hidráulicos es inadecuado por las grandes presiones y deformaciones que generan en las paredes del elastómero, en aplicaciones a pequeña escala en robótica flexible. La propuesta de este proyecto se basa en la simulación de actuadores de material piezoeléctrico para la generación de los movimientos de expansión, doblez y torsión de un robot flexible a pequeña escala. Para realizar la propuesta del diseño del robot flexible se utilizaron simulaciones de elementos finitos mediante el programa ANSYS para estudiar y validar sus movimientos, considerando la teoría de materiales piezoeléctricos para el actuador y materiales hiperelásticos para el cuerpo del robot.

Palabras clave: Robot flexible, material hiperelástico, actuadores, piezoeléctrico y sistemas biológicos.

1. Introducción

Las tendencias actuales en el uso de sistemas robóticos en nuestra vida diaria han dado paso al estudio de nuevas estructuras para satisfacer las demandas actuales de la robótica en aplicaciones domésticas e industriales. En los últimos años las aplicaciones de robots flexibles han aumentado por su versatilidad para imitar movimientos biomecánicos, además de su interacción en tareas con humanos como en cirugías no invasivas, rehabilitación y tareas de cooperación en la industria [1], [2]. Además, los robots flexibles son capaces de adaptarse a distintos entornos [3], siendo utilizados en la exploración de ambientes no estructurados como en el caso de búsqueda, rescate y manejo de residuos peligrosos. Los robots flexibles se diseñan con base en material hiperelástico conocido como elastómero, el cual puede deformarse y extenderse al aplicar fuerzas externas de tensión y compresión sin perder sus propiedades elásticas [4]. Por lo tanto, el uso de elastómero como material de diseño permite a los robots flexibles imitar el movimiento de sistemas biológicos como los tentáculos de un pulpo, la trompa de un elefante, el deslizamiento de una serpiente y el nado de un pez [5],[6]. Los robots flexibles se inspiran en el diseño de los mecanismos biológicos y sus sistemas de locomoción como el sistema óseo, el sistema articular y el sistema muscular [7], [8].

Por otra parte, los robots flexibles son accionados con actuadores tradicionales basados en principios neumáticos e hidráulicos, que son inapropiados en robots flexibles a pequeña escala, debido a que generan grandes presiones y deformaciones en las paredes del elastómero provocando su desgaste y ruptura durante la ejecución de sus tareas [5], [9]. El objetivo de este proyecto es analizar los movimientos de desplazamiento, doblez y torsión para la locomoción de un robot flexible



creado con material hiperelástico basado en el accionamiento de actuadores piezoeléctricos mediante simulaciones de elementos finitos en el programa ANSYS.

La estructura del artículo está organizada de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la propuesta del diseño del actuador piezoeléctrico y del robot flexible, en la Sección 3 se muestran los resultados de las simulaciones y finalmente en la Sección 4 se discuten los resultados y se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación.

2. Propuesta y Diseño

A continuación, en esta Sección se presenta la metodología empleada en esta investigación, como se observa en la Figura 1.

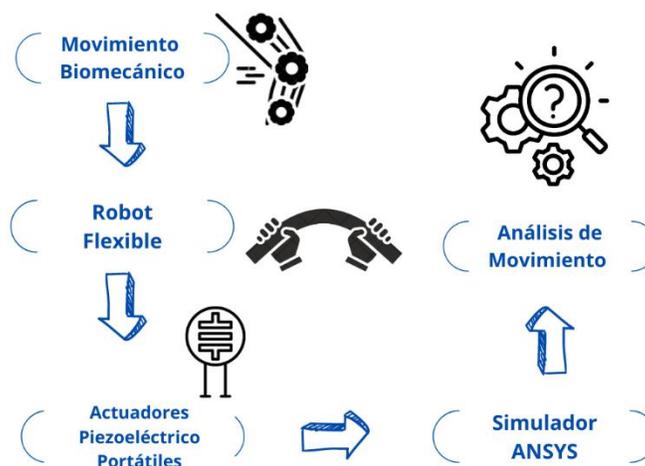


Figura 1. Metodología.

La propuesta de este proyecto nace del concepto de biomecánica como un campo de estudio interdisciplinario que comprende el funcionamiento de los movimientos generados por el cuerpo humano y otros seres vivos, desde una perspectiva mecánica como en el caso de los cefalópodos, los cuales son animales invertebrados, estos logran hazañas de manipulación y locomoción pese a no contar con un esqueleto. Además, su suavidad y flexibilidad corporal busca la simplicidad y refleja una reducida complejidad en sus interacciones con el entorno [1]. En otras palabras, la biomecánica analiza y describe los movimientos de los organismos vivos como los humanos, animales y plantas, considerando cómo interactúan sus sistemas musculares, óseos y articulares.

La ventaja de los robots flexibles radica en su biomecánica para adaptarse a entornos no estructurados o cambiantes, por lo cual son utilizados en aplicaciones tales como procedimientos médicos, en los cuales pueden navegar de manera segura en el interior del cuerpo humano. Además, son utilizados en la industria en tareas de manipulación de objetos con geometrías variadas, sin producir grandes fuerzas debido a su estructura elástica [10]. Su versatilidad y capacidad de movimiento suave y controlado los hacen idóneos para una amplia variedad de aplicaciones donde la seguridad es primordial, debido a la capacidad de absorción de impactos del material utilizado (elastómero), reduciendo así el riesgo de lesiones por colisiones en comparación con los robots rígidos [11].



En este proyecto se propone el diseño de un robot flexible de 62.83 mm de largo, 30 mm de ancho y 2 mm de espesor. El objetivo es generar movimientos mediante la deformación del elastómero. Para las propiedades del material hiperelástico se utiliza el análisis de elementos finitos no lineales del modelo Yeoh de tercer orden con las siguientes condiciones $C10 = 0.57382$ MPa, $C20 = -7.4744e-2$ MPa, $C30 = 1.1321e-2$ Mpa. Los actuadores piezoeléctricos propuestos son de 3 mm de ancho, 25 mm de largo y 0.5 mm de espesor. Para la simulación de los movimientos del robot flexible, se analizaron arreglos de dos y cuatro actuadores sobre la estructura del robot, aplicando 1.5 volts en cada uno mediante el lenguaje APDL de ANSYS.

El efecto piezoeléctrico es el fenómeno por el cual, al aplicar una fuerza mecánica sobre un material, se genera una carga eléctrica en su estructura. En estado de equilibrio, sin la presencia de estrés externo, las cargas positivas y negativas en cada celda del material están balanceadas, manteniéndolo eléctricamente neutro. Sin embargo, al someter el material a una tensión o presión mecánica, su estructura se deforma, provocando la separación de las cargas positivas y negativas en cada molécula, lo que genera pequeños dipolos. Esta deformación da lugar a un campo eléctrico, el cual puede ser aprovechado para convertir la energía mecánica en energía eléctrica, útil para diversas aplicaciones [12].

La polarización iónica promedio por unidad no existirá en materiales enlazados covalentemente en los que no estén presentes iones. La polarización promedio por unidad de volumen, \vec{P} producida por N pequeños dipolos eléctricos donde todos están alineados, se expresan:

$$\vec{P} = \frac{1}{VOLUMEN} \sum_{k=0} \vec{P}_k \quad (1)$$

Las ecuaciones constitutivas de los materiales piezoeléctricos relacionan las variables mecánicas (esfuerzo y deformación) con las variables eléctricas (campo y desplazamiento eléctrico). Estas ecuaciones pueden expresarse de diferentes maneras, pero la forma más común es la siguiente:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

donde ϵ es el vector de deformaciones, este vector tiene seis componentes, correspondientes a las seis posibles deformaciones independientes en un medio tridimensional. Matriz S (matriz de conformidad) que se define como $S = 1/C$ donde la matriz C es la matriz de constantes elásticas y relaciona las deformaciones y los esfuerzos. Esta matriz es simétrica y describe las propiedades elásticas del material. El vector σ representa los esfuerzos normales y cortantes que actúan sobre el material. La matriz d de constantes piezoeléctricas describe cómo los esfuerzos mecánicos σ generan un desplazamiento eléctrico D en el material. Cada coeficiente d de la matriz indica la contribución de una componente específica del esfuerzo a una componente específica del desplazamiento eléctrico. El vector E representa el campo eléctrico aplicado al material y tiene tres componentes correspondientes a las direcciones espaciales E_1, E_2, E_3 .

La ecuación constitutiva piezoeléctrica es fundamental para el diseño y análisis del dispositivo piezoeléctrico en diferentes condiciones, donde es crucial entender como el material piezoeléctrico se deforma bajo una carga mecánica y campo eléctrico aplicado. Esta puede ser expresada como:



$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} \\ \xi_{31} & \xi_{32} & \xi_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (3).$$

donde D es el vector de desplazamiento eléctrico, ξ es la matriz de permitividad que describe cómo el material responde a un campo eléctrico aplicado E_i generando un desplazamiento eléctrico D_i . Estas ecuaciones son fundamentales, ayudan a entender y diseñar dispositivos piezoeléctricos. Determinando las tensiones mecánicas y los desplazamientos eléctricos del material en relación con la deformación del material o al campo eléctrico al que está expuesto. Las ecuaciones (2) y (3) en forma compacta pueden ser representadas como:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}^E \sigma_{kl} + d_{ijk} E_k \quad (4).$$

$$D_i = d_{ikl} \sigma_{kl} + \xi_{ik}^T E_k \quad (5).$$

ε representa los componentes de deformación, S^E es la matriz de conformidad relacionada con las constantes de elasticidad (m^2/N), σ representa los componentes de esfuerzo o tensión (N/m^2), d son las constantes piezoeléctricas (C/N), E es el campo electromagnético (V/m), D representa el desplazamiento eléctrico (C/m^2) y ξ es la permitividad del material (Fm^{-1}).

El modo d_{31} representa la constante que describe la relación entre los esfuerzos mecánicos aplicados y la respuesta eléctrica generada, como se observa en la Figura 2(a). Por otro lado, en el modo d_{33} , el material piezoeléctrico responde a una deformación en la misma dirección del campo eléctrico aplicado, tal como se ilustra en la Figura 2(b).

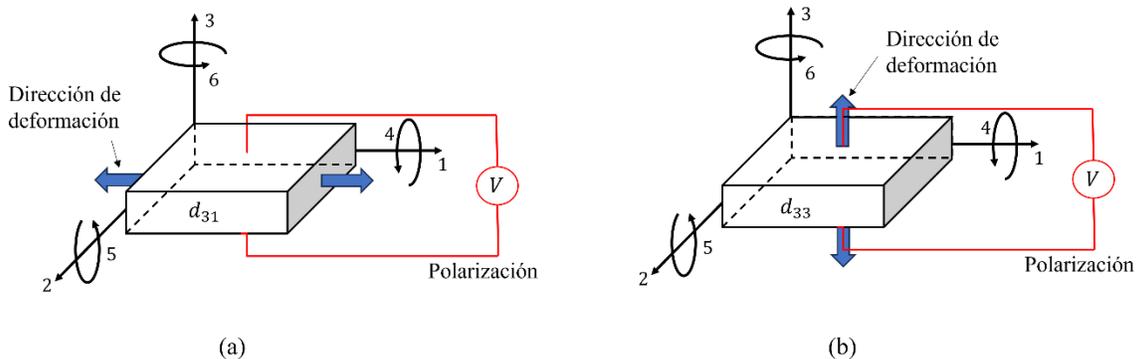


Figura 2. (a) Se aprecia el modo d_{31} donde la deformación ocurre en la dirección perpendicular a la dirección de polarización, (b) muestra el efecto d_{33} donde la deformación ocurre en la dirección de polarización.

El transductor macrofibra (MFC), compuesto por fibras piezocerámicas (PZT), fue desarrollado en 1996 en el Centro de Investigación Langley de la NASA. El MFC es un material de actuación en



capas y plano que consiste en una sección transversal rectangular con fibras piezocerámicas unidireccionales incrustadas en una matriz de polímero termoestable. La capa activa de fibras reforzadas está entre capas de película de kapton y materiales revestidos de cobre que tienen un patrón de electrodos interdigitados. La geometría del MFC es uniforme, incluyendo la separación y continuidad de las fibras PZT y los electrodos. El propósito de las fibras rectangulares es mejorar el contacto entre la piezocerámica y el electrodo adyacente para asegurar una transferencia más eficiente del campo eléctrico. Los actuadores y sensores MFC utilizados en este artículo eran dispositivos de tipo P1, operando de acuerdo con el mecanismo de acoplamiento electromecánico d_{33} , donde "d" es la polarización generada por unidad de estrés mecánico (T) aplicado a un material piezoeléctrico.

- Mecanismo d_{31} : La polarización inducida está en la dirección 3 y el estrés se aplica en la dirección 1 (Fig. 2(a)).
- Mecanismo d_{33} : La polarización inducida y el estrés aplicado están en la dirección 3 (Fig. 2(b)).

Ahora se describen las condiciones, diseño y características de la propuesta para el actuador piezoeléctrico. Se eligió el tipo MFC 2503-P1 (ver Fig. 3) con efecto d_{33} (3 mm de ancho, 25 mm de largo y 0.5 mm de espesor) debido a su mayor rango de voltaje operativo de -500V a +1500V, a diferencia del tipo P2, que tiene un rango de -60V a 360V. Este rango más amplio permite una mayor flexibilidad en aplicaciones de campo. Las propiedades mecánicas y eléctricas se enumeran en la Tabla 1.

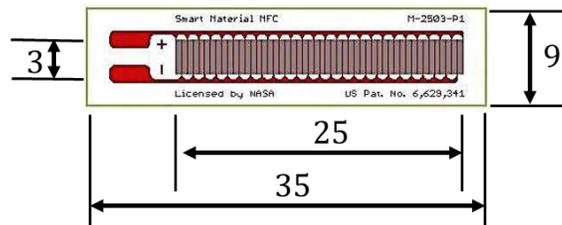


Figura 3. Dimensiones del actuador MFC.

Tabla 1. Propiedades mecánicas y eléctricas del MFC 2814-P1 utilizadas en el análisis numérico (Collet et al., 2011).

Coefficientes de rigidez mecánica:

$C_{11}^E = 39.4 \text{ GPa}$	$C_{22}^E = 20.3 \text{ GPa}$
$C_{33}^E = 32.5 \text{ GPa}$	$C_{12}^E = 12.9 \text{ GPa}$
$C_{13}^E = 8.3 \text{ GPa}$	$C_{23}^E = 5.3 \text{ GPa}$
$C_{44}^E = 5.5 \text{ GPa}$	$C_{55}^E = 5.5 \text{ GPa}$
$C_{66}^E = 13.1 \text{ GPa}$	

Coefficientes de acoplamiento de tensión piezoeléctrica:

$e_{31} = 13.62 \text{ cm}^2$	$e_{33} = -4.1 \text{ cm}^2$
$e_{32} = 0.55 \text{ cm}^2$	$e_{24} = -17.03 \text{ cm}^2$
$e_{15} = -17.03 \text{ cm}^2$	

Coefficientes de permitividad a tensión constante:

$\epsilon_{11} = 141.2 \epsilon_0 \text{ C V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$\epsilon_{22} = 141.2 \epsilon_0 \text{ C V}^{-1} \text{ m}^{-1}$
--	--



$\epsilon_{33}=141.2\epsilon_0\text{C V}^{-1}\text{m}^{-1}$	
---	--

Uno de los principales retos de los enfoques analíticos tradicionales para modelar materiales piezoeléctricos es su limitación a geometrías y propiedades simples, como las de los cerámicos PZT convencionales. Aunque son útiles, estos enfoques no son adecuados para modelar transductores de mayor complejidad.

El Método de Elementos Finitos (FEM) se presenta como una solución efectiva a las limitaciones de los enfoques analíticos tradicionales, ofreciendo una mayor flexibilidad en la representación de geometrías complejas y diversas propiedades de los materiales. A diferencia de los modelos analíticos, el FEM permite modelar transductores más complejos al discretizar el dominio del problema en una malla de elementos finitos, aproximando la solución de manera numérica. A través del método de trabajo virtual, se obtiene un sistema de ecuaciones de movimiento para cada elemento del modelo.

En términos generales, el proceso de FEM se puede describir mediante tres fases principales: preprocesamiento, solución y posprocesamiento. En la Figura 4 se ilustra este esquema, detallando los componentes clave de cada etapa. El preprocesamiento involucra la creación del modelo geométrico y la definición de las propiedades del material. La fase de solución se centra en resolver las ecuaciones generadas para cada elemento de la malla. Finalmente, el posprocesamiento permite interpretar los resultados mediante visualización y análisis de los datos obtenidos, lo cual ha sido esencial en el desarrollo de este trabajo.

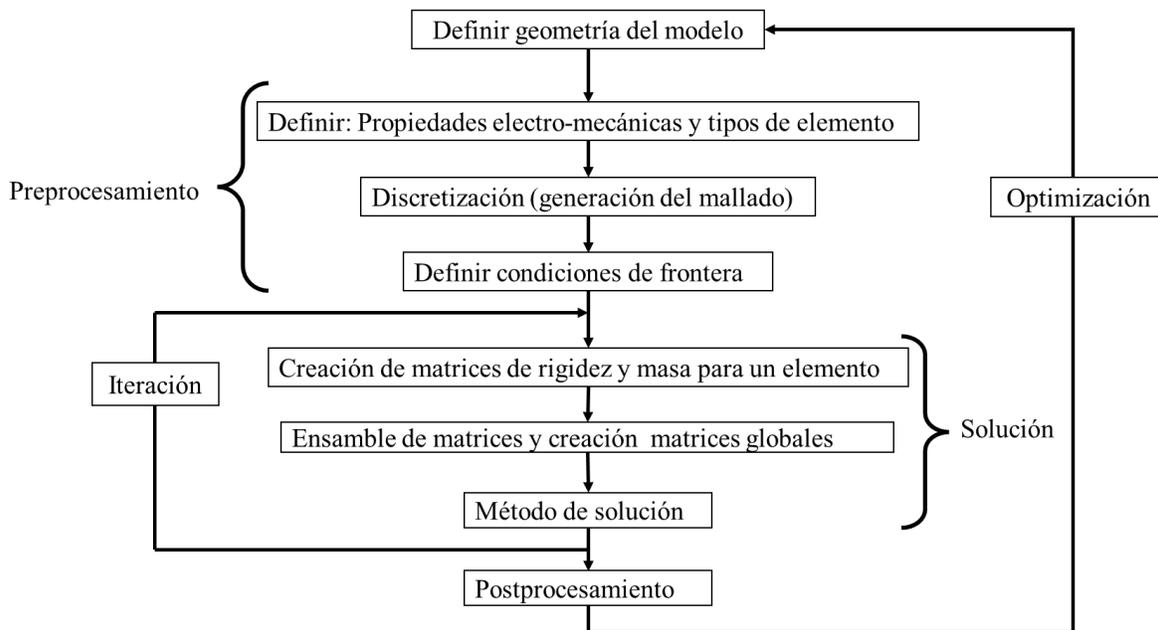


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de análisis por el método de elementos finitos.

Como parte del preprocesamiento, para asegurar la continuidad de desplazamientos y tensiones, la interacción entre el MFC y la placa se modeló como una condición de unión perfecta, debido a la interacción de dos materiales (MFC y el elastómero). La discretización se realizó utilizando 2 elementos a través del espesor con el elemento unitario SOLID186 de comportamiento de desplazamiento cuadrático. Este elemento está definido por 20 nodos con tres grados de libertad por nodo (u_x , u_y , u_z). Para modelar el material piezoeléctrico se usó el elemento SOLID5. Se utilizaron elementos CONTA174 para modelar la condición de unión entre el MFC y la placa usando la configuración ("siempre unido"). Se utilizaron elementos de contacto según se define en FEM.



Con estas dimensiones se propuso un arreglo de 2 y 4 piezoeléctricos para un primer análisis de movimiento ubicados estratégicamente sobre cada esquina del cuerpo flexible para simular su actuación en ANSYS. El mallado con el que se analizó el actuador piezoeléctrico es hexaédrico con 300 elementos como se muestra en la Figura 5.

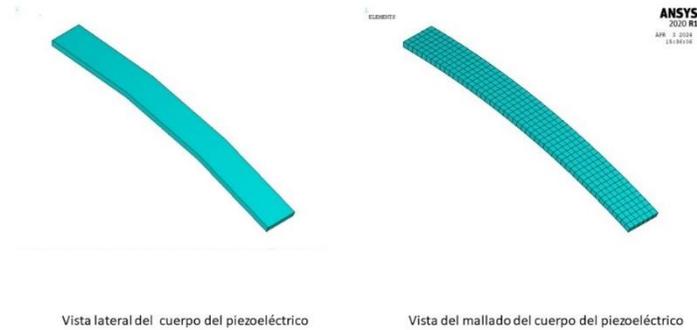


Figura 5. Geometría del cuerpo del actuador piezoeléctrico.

En la Figura 6 se observa una prueba preliminar de aplicar el actuador piezoeléctrico con un voltaje de 1.5 v, donde se observa la deformación del material que genera un cambio en el desplazamiento del cuerpo del actuador.

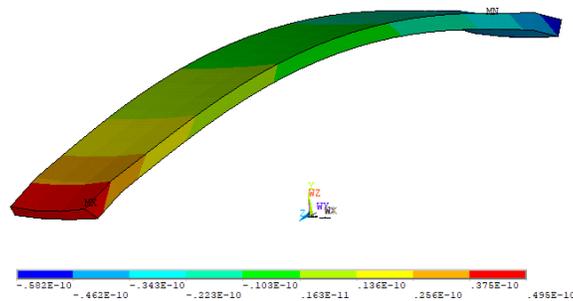


Figura 6. Simulación del actuador piezoeléctrico cuando se le aplica voltaje para su deformación.

Tabla 2. Propiedades del elastómero.

Material Propiedades		
Propiedad	Valor	Unidad
3er Orden		
Material constante C10	0.53782	Mpa
Material constante C20	-0.074744	Mpa
Material constante C30	0.011321	Mpa



Las propiedades del elastómero utilizadas para el análisis y simulación se pueden apreciar en la Tabla 2. Para las propiedades del material hiperelástico se utiliza el análisis de elementos finitos no lineales del modelo Yeoh de tercer orden.

En la Figura 7 se muestra la ilustración de la geometría del cuerpo del robot flexible. Las dimensiones utilizadas para su diseño son de 30 mm de ancho, 62.832 mm de largo y 2 mm de espesor. Los 4 piezoeléctricos para un primer análisis de movimiento ubicados estratégicamente en la geometría del robot en cada una de las esquinas sobre el cuerpo del robot flexible. El mallado con el que se analizó el robot flexible es hexaédrico con 1752 elementos del elastómero, piezoeléctrico y de contacto.

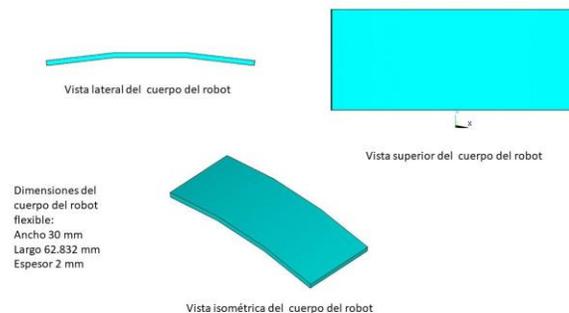


Figura 7. Geometría del cuerpo del robot flexible.

3. Resultados y Discusión

Para el análisis y simulación del robot flexible accionado por piezoeléctricos, se utilizó la versión educativa del software de simulación de ingeniería y ciencia Ansys. Esta plataforma altamente especializada permite realizar análisis numéricos y simulaciones de fenómenos físicos en una variedad de campos, basándose en métodos matemáticos y computacionales para modelar el comportamiento de sistemas físicos complejos.

En particular, se utilizó ANSYS Mechanical APDL, una herramienta que permite realizar análisis térmicos, estructurales, acústicos, piezoeléctricos, electrostáticos y electromagnéticos, acoplados incluso a circuitos eléctricos. El lenguaje Paramétrico Ansys APDL, con su interfaz de línea de comandos, facilita la definición y ejecución de simulaciones avanzadas. Esto resulta útil para diseñar geometrías específicas del robot flexible, ajustando los valores asignados para las dimensiones del elastómero y el piezoeléctrico, elementos clave en su construcción y funcionamiento.

El proceso de modelado numérico con FEM en APDL se muestra a continuación siguiendo las etapas del diagrama en la Figura 4: preproceso, solución y postproceso.

Preproceso:

1. Definición de tipo de elementos:

- **SOLID186:** Elemento 3D de 20 nodos adecuado para modelado no lineal y grandes deformaciones, ideal para materiales hiperelásticos como el elastómero.
- **SOLID5:** Elemento de 8 nodos para modelar materiales piezoeléctricos en 3D, con capacidades estructurales y eléctricas.

2. Definición de propiedades de los materiales:

- **Elastómero:**



- Matriz de elasticidad: Comportamiento elástico no lineal.
- Densidad: Masa por unidad de volumen.
- **Piezoeléctrico:**
 - Matriz de elasticidad, de permitividad y piezoeléctrica: Relacionan el campo eléctrico con la deformación mecánica y las propiedades elásticas.
 - Densidad: Masa por unidad de volumen.
- 3. **Creación de geometría paramétrica:** Permite ajustar el diseño fácilmente modificando parámetros clave como las dimensiones del robot flexible.
- 4. **Definición de parámetros de mallado:** Tamaño de elementos y selección del tipo adecuado para cada material y región.
- 5. **Definición de contactos:** Uso de **CONTA175** para modelar el comportamiento entre superficies en contacto, como entre el elastómero y el piezoeléctrico.
- 6. **Aplicación de señal de voltaje:** Definir y cargar la señal de voltaje que se aplicará al piezoeléctrico durante la simulación.

Solución:

1. **Aplicación de condiciones de frontera:**
 - Fijaciones: Restringir grados de libertad en nodos específicos.
 - Voltaje: Aplicar la señal definida en las superficies del material piezoeléctrico.
2. **Parámetros de solución transitoria:**
 - Duración de simulación, incrementos de tiempo y habilitación de grandes desplazamientos para capturar el comportamiento dinámico.

Postproceso:

1. **Visualización de resultados:** Generar gráficos de contorno para visualizar tensiones, deformaciones y potencial eléctrico.
2. **Análisis detallado:** Extraer curvas de nodos específicos para estudiar el comportamiento en áreas críticas.

La Tabla 3 compara las dimensiones de dos componentes clave en sistemas de robots flexibles: el material piezoeléctrico y el elastómero. El piezoeléctrico, con un ancho de 3 mm y un espesor de 0.5 mm, es significativamente más delgado y estrecho que el elastómero, que presenta un ancho de 30 mm y un espesor de 2 mm. Estas diferencias dimensionales sugieren que el piezoeléctrico está optimizado para aplicaciones de alta precisión y pequeña escala, mientras que el elastómero, con su estructura más robusta, es ideal para funciones que requieren mayor flexibilidad y soporte estructural.

En cuanto a la longitud, el piezoeléctrico mide 25 mm, mucho menos que los 62.832 mm del elastómero, lo que indica que este último está diseñado para abarcar áreas más amplias o para proporcionar una mayor superficie de contacto. A pesar de su pequeño radio interno de 0.06 mm, este detalle puede ser esencial para garantizar la precisión en los ajustes o conexiones entre ambos materiales. En conjunto, estas dimensiones muestran cómo cada material cumple un rol específico dentro del sistema robótico flexible, aprovechando sus propiedades geométricas y físicas para mejorar el rendimiento del robot.



Tabla 3. Valores precisos de la geometría del robot flexible.

Medidas del elastómero (robot flexible) y piezoeléctrico.	
Ancho Piezoeléctrico	3 mm
Ancho Elastómero	30 mm
Espesor Piezoeléctrico	0.5 mm
Espesor Elastómero	2 mm
Radio Interno	0.06 mm
Largo Elastómero	62.832 mm
Largo del piezoeléctrico	25 mm

Se hizo un análisis avanzado de materiales, incluyendo el material hiperelástico en una estructura no lineal, donde se obtuvieron deformaciones, del robot flexible propuesto en la Figura 8. Se definieron los elementos, el elastómero y el parche piezoeléctrico.

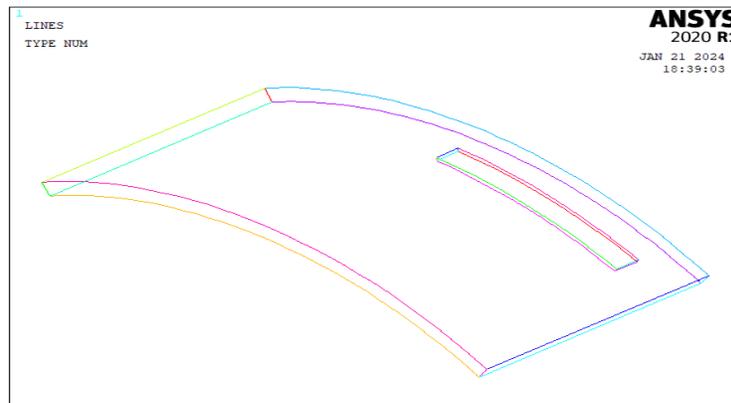


Figura 8. Robot flexible, áreas, volúmenes y un actuador piezoeléctrico en la parte superior.

Se establecieron contactos que tendrán el elastómero con los cuatro actuadores piezoeléctrico en el área del robot flexible, como se aprecia en la Figura 9.

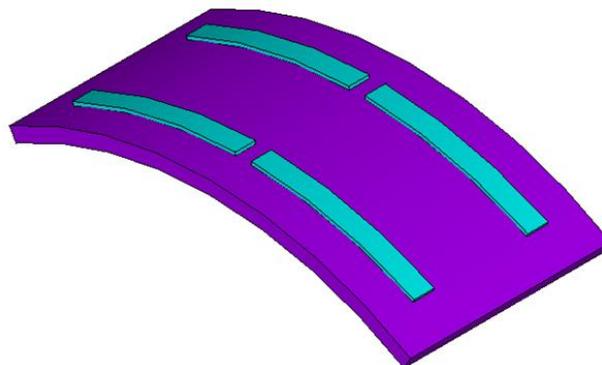


Figura 9. Ensamble de los actuadores piezoeléctricos en la parte superior del robot flexible (elastómero).



Se procedió al mallado del piezoeléctrico Figura 10. De igual manera el del robot flexible, fue analizado por los elementos finitos (FEM) donde se definió el tamaño del elemento, en este caso de 0.4 mm.

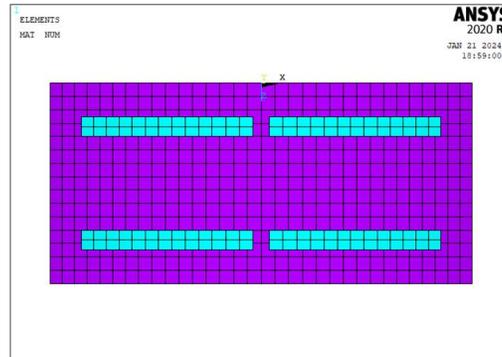


Figura 10. Mallado por elemento finito (división del cuerpo del robot flexible y actuadores piezoeléctricos).

Para el modelado del sistema, se definieron los materiales, propiedades y zonas de contacto, estableciéndose las condiciones de frontera para la aplicación del voltaje en los piezoeléctricos. El electrodo se ubicó en la zona de contacto con el elastómero, donde se asumió un voltaje de 0 v, mientras que en la superficie superior del piezoeléctrico se aplicó un voltaje diferente de 0. Los extremos del elastómero se fijaron para restringir su movimiento, lo que permitió observar como la diferencia de potencial generaba deformaciones controladas en el elastómero. En la Figura 11 se ilustra como estas condiciones generan la deformación deseada en el elastómero al aplicar la diferencia de potencial.

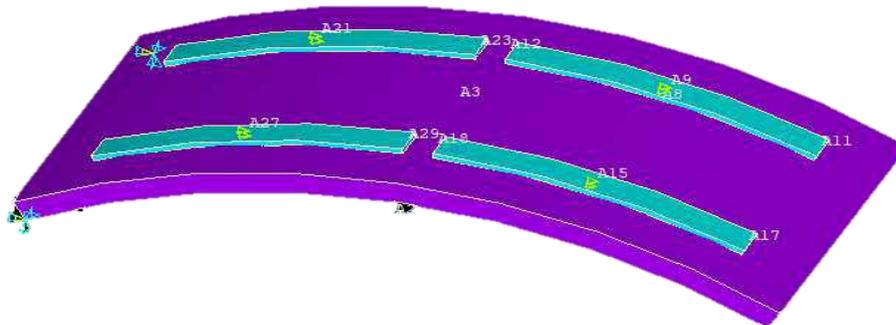


Figura 11. Condiciones de frontera.

En la Figura 12 se muestra el resultado del efecto en el elastómero en dos estados. En (a), se muestra el elastómero en su condición inicial sin deformación, es decir, antes de la aplicación de voltaje. En (b), se observa el elastómero deformado como resultado de la aplicación de voltaje al material piezoeléctrico flexible acoplado, lo que genera una deformación mecánica inducida por la interacción eléctrica y mecánica en el sistema.

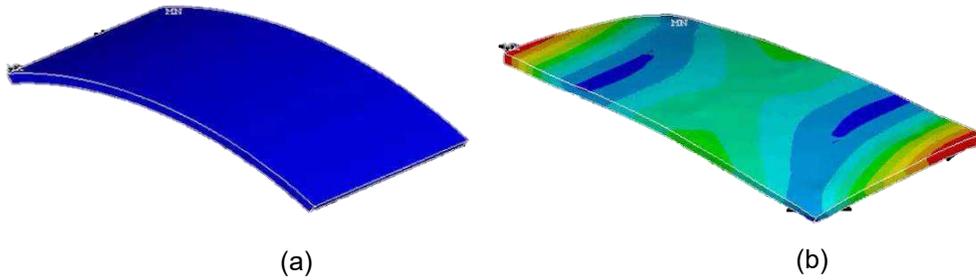


Figura 12. (a) Elastómero en su condición inicial, (b) elastómero deformado al aplicar voltaje al MFC adherido.

En la Figura 13 tenemos la solución representada como contornos que ayudan a interpretar los resultados, en este caso se muestran resultados de la resultante de desplazamiento desde el mínimo (cero) que está representado con contornos en color azul y el rojo siendo su desplazamiento máximo. El resultado muestra que la mayor deformación se da en la parte central del elastómero y son desplazamientos en la dirección Z, lo que se interpreta como movimiento de contracción de los extremos del elastómero.

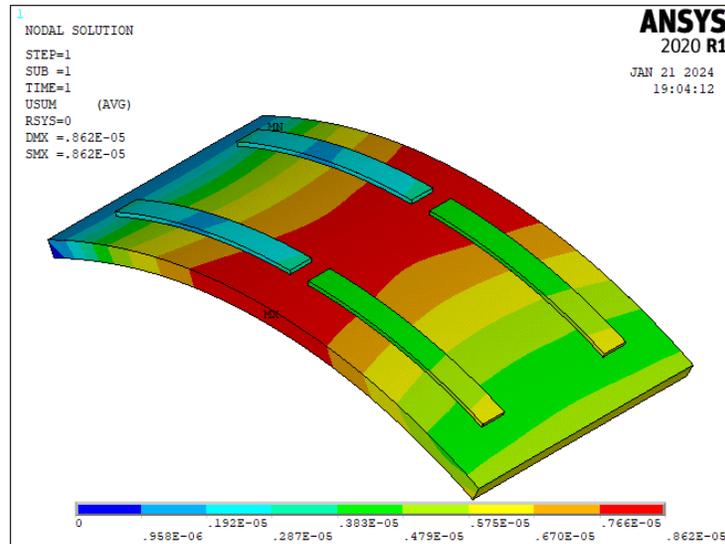


Figura 13. Desplazamientos mínimos y máximos.

En la siguiente Figura 14 podemos observar los nodos en la sección del elastómero. Para este análisis, se seleccionaron específicamente los nodos en la sección transversal del elastómero, enfocándose en la cara exterior. Al analizar estos nodos en relación con el arco del elastómero, se puede visualizar cómo se distribuyen los desplazamientos a lo largo de la geometría curvada, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento del material bajo la influencia de las señales de voltaje aplicadas. Esta selección y análisis permiten una interpretación precisa de los efectos de la activación en la deformación del elastómero.



Figura 14. Selección de nodos para graficar desplazamientos.

En los resultados del análisis se presenta la suma de los desplazamientos experimentados por los nodos distribuidos en el robot flexible, lo que permite visualizar cómo cada punto del robot se ha movido o deformado bajo las condiciones del estudio. La Figura 15 muestra un desplazamiento máximo en el centro de la cara superior del robot cuando se aplica un voltaje de 1.5 V. El análisis a lo largo de una línea central en esta misma cara revela que el mayor desplazamiento ocurre en la zona central, donde los cuatro piezoeléctricos, al aplicar el voltaje, inducen una deformación significativa, demostrando la eficiencia del sistema para generar movimiento controlado en el robot.

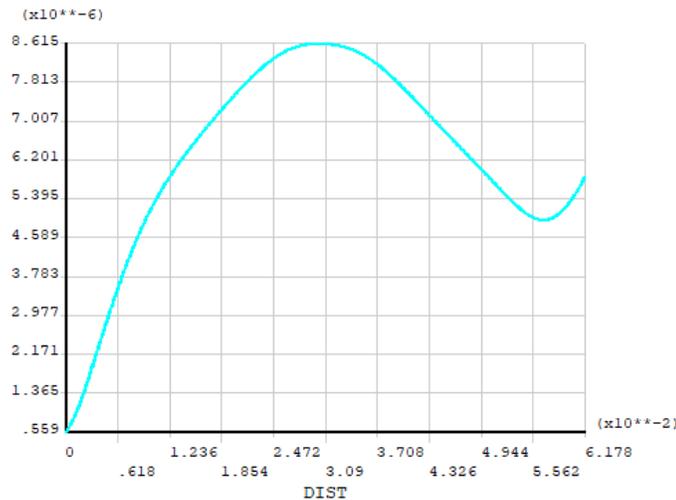


Figura 15. Resultado de desplazamientos y análisis de los nodos en la vista frontal.

En la Figura 16 se muestra la secuencia del video del movimiento del robot. El robot flexible se mueve en un tiempo de un segundo, variando a su movimiento o desplazamiento y regresando a su posición inicial donde en las esquinas de atrás se restringe el voltaje al utilizar la configuración de cuatro actuadores piezoeléctricos. Estas muestran cómo el elastómero se deforma de manera sincronizada en respuesta a las señales de voltaje en fase aplicadas a los MFCs en diferentes momentos. La variación de colores representa el nivel de deformación, donde el azul indica menor deformación y el rojo indica mayor deformación. Esta visualización permite entender cómo las señales de voltaje en fase influyen en la deformación del elastómero a lo largo del tiempo, crucial para aplicaciones en las que se necesita un control preciso del movimiento, como en los actuadores piezoeléctricos.

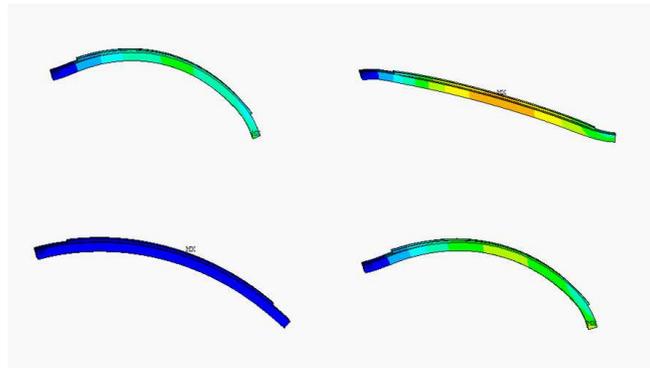


Figura 16. Secuencia de movimiento del robot flexible.

En la Figura 17 el robot flexible tiene un tiempo de un segundo, ejerce un movimiento de doblez y de torsión que simula un movimiento de locomoción, aplicando un voltaje con una configuración de dos actuadores piezoeléctricos manteniendo restricción de cero voltajes en uno mientras se aplica voltaje en el otro.

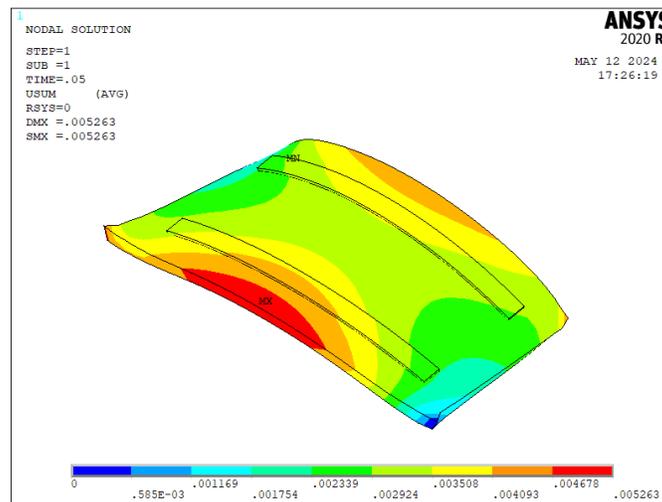


Figura 17. Resultado del movimiento del robot flexible.

Las Figura 18 se muestran los resultados transitorios del modelo para una activación secuencial senoidal de dos MFCs y el efecto que tienen en un elastómero. Las cuatro subfiguras representan diferentes instantes de tiempo, utilizando un esquema de colores para ilustrar el desplazamiento y la deformación del elastómero, donde los colores van del azul (mínimo desplazamiento) al rojo (máximo desplazamiento). La señal de entrada es una señal senoidal aplicada de forma desfasada en los MFCs, lo que genera un efecto de deformación progresiva. Este enfoque permite que el robot suave simule un movimiento de caminata, mostrando cómo las señales senoidales secuenciales y desfasadas producen deformaciones complejas en el elastómero, cruciales para el diseño y funcionamiento de actuadores y sensores piezoeléctricos en aplicaciones robóticas.

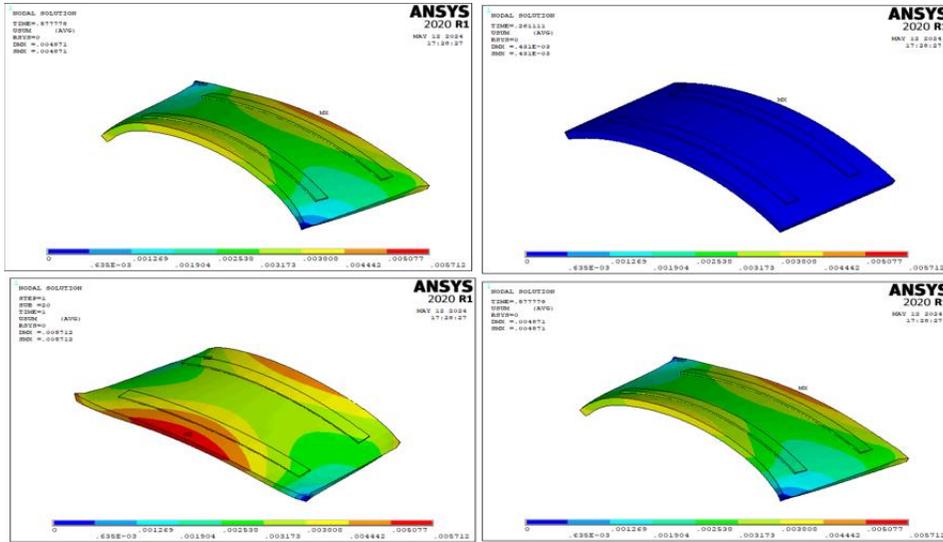


Figura 18. Simulación del movimiento de caminata del robot flexible.

4. Conclusiones

El enfoque de esta investigación se centra en el uso de actuadores de materiales piezoeléctricos como una alternativa a la portabilidad y bajo consumo de energía para aplicaciones en robótica flexible a pequeña escala. El cual se validó con análisis de elementos finitos utilizando la teoría de materiales piezoeléctricos para el diseño del actuador y materiales hiperelásticos en el cuerpo del robot flexible. Se presentó el diseño de un robot a pequeña escala con dimensiones de 62.83 mm de largo, 30 mm de ancho y con un espesor de 2 mm, lo anterior para generar movimientos mediante la deformación del elastómero, utilizando las propiedades del material hiperelástico se utiliza el análisis de elementos finitos no lineales del modelo Yeoh de tercer orden. Se presentó el diseño de un actuador piezoeléctrico con las dimensiones de 3 mm de ancho, 25 mm de largo y 0.5 mm de espesor, con lo que se selecciona un arreglo de cuatro y dos piezoeléctricos en la parte superior del robot flexible y en las esquinas para probar distintas configuraciones de activación de 1.5 V en cada uno de ellos. Para la primera simulación, con la configuración de cuatro piezoeléctricos en las esquinas, se aprecia claramente un mayor desplazamiento en la zona central de la cara frontal y lateral del robot flexible al aplicar 1.5 V de entrada. Para la segunda simulación, con la configuración de dos actuadores piezoeléctricos, se muestran los resultados transitorios del modelo de Elementos Finitos (FEM) para una activación secuencial senoidal de dos MFCs para demostrar el desplazamiento y la deformación del elastómero, lo que genera un efecto de deformación progresiva. Este enfoque permite que el robot suave simule un movimiento de avance crucial para el diseño y funcionamiento de actuadores y sensores piezoeléctricos en aplicaciones robóticas.

Como trabajo a futuro se propone construir el prototipo del robot flexible en físico, realizando el diseño del molde para el vaciado del elastómero utilizando impresión 3D en material de resina. Además, utilizar una bomba de vacío para evitar formación de burbujas en las paredes del robot creadas por el elastómero. Además, se plantea realizar pruebas con diferentes configuraciones de activación, con dos y cuatro actuadores piezoeléctricos en la estructura del robot.

Bibliografía

Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. In *Nature* (Vol. 521, Issue 7553, pp. 467–475). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nature14543>



Schmitt, F., Piccin, O., Barbé, L., & Bayle, B. (2018). Soft robots manufacturing: A review. In *Frontiers Robotics AI* (Vol. 5, Issue JUN). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00084>

Lee, C., Kim, M., Kim, Y. J., Hong, N., Ryu, S., Kim, H. J., & Kim, S. (2017). Soft robot review. In *International Journal of Control, Automation and Systems* (Vol. 15, Issue 1, pp. 3–15). Institute of Control, Robotics and Systems. <https://doi.org/10.1007/s12555-016-0462-3>

Chen, Y., Zhao, H., Mao, J., Chirarattananon, P., Helbling, E. F., Hyun, N. seung P., Clarke, D. R., & Wood, R. J. (2019). Controlled flight of a microrobot powered by soft artificial muscles. *Nature*, 575(7782), 324–329. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1737-7>

Medina, J. H., & Vélez, P. N. (2014). “Soft Robotic”: Una nueva generación de robots (Vol. 109).

Pataranutaporn, P., De La Vega, J. S., Chowdhury, A., Ng, A., & Mihaleva, G. (2018, August). Toward growable robot: Exploring and integrating flexible–Biological matter with electronics. In *2018 International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC)* (pp. 1-4). IEEE.

Pal, A., Restrepo, V., Goswami, D., & Martinez, R. V. (2021). Exploiting mechanical instabilities in soft robotics: control, sensing, and actuation. *Advanced Materials*, 33(19), 2006939.

Shankar, N. V. S., Kamma, T., Krishna, B. M., Kumar, C. H., & Shalem, B. (2021). Smart Actuators: A Review. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 2226-2238).

Wang, J. L., Song, J. L., Liu, A. R., Liang, J. Q., Zhou, F. B., Liang, J. J., ... & Chen, B. C. (2024). Design and architecture of a slender and flexible underwater robot. *Intelligent Service Robotics*, 1-20.

Duchaine, V., Lauzier, N., Baril, M., Lacasse, M. A., & Gosselin, C. (2009, May). A flexible robot skin for safe physical human robot interaction. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 3676-3681). IEEE.

Dahiya, R. S., Adami, A., Pinna, L., Collini, C., Valle, M., & Lorenzelli, L. (2014). Tactile sensing chips with POSFET array and integrated interface electronics. *IEEE Sensors Journal*, 14(10), 3448-3457.