

Jornadas de Automática

Sensor de fuerza basado en gel para aplicaciones robóticas

José García-Delgado^{a,*}, Juan Á. Benito-Cerdeño^a, Álvaro Moreno-Jiménez^a, Ismael Payo^a, Carlos M. Andreu^b, Ester Vázquez^b

^aEscuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial de Toledo, Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Real Fábrica de Armas, 45071 Toledo, España

^bInstituto Regional de Investigación Científica Aplicada (IRICA). Universidad de Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, España

To cite this article: García-Delgado, J., Benito-Cerdeño, J.Á., Moreno-Jiménez, Á., Payo, I., Andreu, C. M., Vázquez, E., 2026. Gel-Based Force Sensor for Robotic Applications. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13794>

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo, caracterización y validación de un sensor táctil distribuido de alta sensibilidad basado en organogeles conductores de acrilamida y dimetilsulfóxido (AM-DMSO) para aplicaciones en robótica blanda. Para superar limitaciones como la polarización iónica del gel y las impedancias eléctricas parásitas en la interfaz entre el gel y los electrodos, los autores proponen un circuito de acondicionamiento de señal que implementa el método de los cuatro electrodos en corriente alterna. Mediante diversos ensayos experimentales, se demuestra que el sensor exhibe un excelente comportamiento lineal durante la fase de carga y variaciones de sensibilidad según la distribución y distancia entre los electrodos, aunque presenta histéresis debido a la naturaleza viscoelástica del material. Finalmente, la viabilidad práctica del dispositivo se valida al integrarlo en una pinza robótica de dedos flexibles para la manipulación de objetos frágiles, utilizando una estrategia de control adaptativo por planificación de ganancias que ajusta los parámetros del regulador de fuerza en tiempo real según la zona de contacto identificada por el organogel.

Palabras clave: Sensores blandos, Percepción y detección, Procesamiento de señales, Control adaptativo, Planificación de ganancia

Gel-Based Force Sensor for Robotic Applications

Abstract

This article presents the development, characterisation and validation of a highly sensitive distributed tactile sensor based on conductive acrylamide and dimethyl sulphoxide (AM-DMSO) organogels for applications in soft robotics. To overcome limitations such as ionic polarisation of the gel and parasitic electrical impedances at the interface between the gel and the electrodes, the authors propose a signal conditioning circuit that implements the four-electrode method in alternating current. Through various experimental tests, it is demonstrated that the sensor exhibits excellent linear behaviour during the charging phase and variations in sensitivity depending on the distribution and distance between the electrodes, although it exhibits hysteresis due to the viscoelastic nature of the material. Finally, the practical viability of the device is validated by integrating it into a robotic gripper with flexible fingers for handling fragile objects, using an adaptive control strategy based on gain planning that adjusts the force controller parameters in real time according to the contact area identified by the organogel.

Keywords: Soft sensing, Perception and sensing, Signal processing, Adaptive control, Gain scheduling

1. Introducción

La evolución de la robótica contemporánea hacia entornos colaborativos y la manipulación automatizada de objetos delicados ha impulsado la transición desde actuadores rígidos

convencionales hacia estructuras blandas y adaptables, enmarcadas en el campo de la *robótica blanda*. En este escenario, disponer de sistemas de sensorización táctil distribuida capaces de integrarse en superficies curvas y registrar interacciones

*Autor para correspondencia: Jose.GarciaDelgado@uclm.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

físicas con una elevada resolución y fidelidad es un requisito indispensable como se estudia en (Cui et al., 2025). Los sensores de fuerza comerciales basados en tecnologías tradicionales (galgas extensiométricas estándar o elementos piezoeléctricos rígidos) presentan serias limitaciones debido a su rigidez estructural, su elevado coste para coberturas distribuidas, su propensión a la rotura ante impactos y su incapacidad para amoldarse a geometrías irregulares.

Como alternativa, se ha desarrollado el uso de geles conductores piezorresistivos como transductores mecánicos intrínsecamente blandos como se muestra en (Li et al., 2021). Si bien los hidrogeles (redes poliméricas saturadas con agua) han sido ampliamente investigados en aplicaciones biomédicas, su inestabilidad termodinámica y la rápida evaporación del disolvente acuoso degradan drásticamente sus propiedades eléctricas e idoneidad a largo plazo bajo condiciones ambientales ordinarias. Como alternativa, los organogeles como los estudiados en (Xu et al., 2024), donde el medio líquido se sustituye por un disolvente orgánico polar de alta temperatura de ebullición, demuestran una elevada estabilidad físico-química frente al envejecimiento y baja interacción con la humedad ambiental.

A pesar de las prometedoras propiedades del material, el uso del organogel como un sensor de fuerza de alta sensibilidad viable para la industria robótica exige resolver desafíos científicos de gran envergadura. El primero de ellos se asocia al fenómeno de polarización electroquímica e iónica que ocurre cuando el material es excitado con tensiones en corriente continua (CC), lo que provoca una acumulación de carga iónica y la degradación del sensor. El segundo reto se deriva de las impedancias eléctricas de contacto en la interfaz electrodo-gel, que enmascaran la variación real de la resistencia eléctrica provocada por la deformación mecánica del gel. Finalmente, un aspecto crítico poco abordado en la literatura es el acoplamiento espacial y la variación intrínseca de la sensibilidad en función de la coordenada geométrica exacta donde se ejerce la fuerza a lo largo de un mismo gel.

En este artículo se presenta el desarrollo integral de un sensor táctil distribuido de alta sensibilidad basado en organogeles AM-DMSO para aplicaciones robóticas. Se describe un circuito de acondicionamiento de señal que implementa el método de los cuatro electrodos en corriente alterna (CA) con varias etapas: fuente de corriente de excitación, amplificación y filtro paso-alto con corrector de offset, rectificador de precisión y filtro paso-bajo. Asimismo, se evalúa experimentalmente la influencia del punto de aplicación de la carga mecánica sobre el gel. Por último, se demuestra el impacto científico de esta sensorización blanda integrada mediante su incorporación en una pinza robótica flexible para manipulación de objetos frágiles, controlada a través de una estrategia adaptativa por planificación de ganancias que ajusta en tiempo real los parámetros del regulador de fuerza en función de la zona de contacto identificada por el organogel.

2. Descripción del organogel empleado

El organogel utilizado en este estudio está constituido por una red tridimensional basada en el monómero acrilamida (AM), obtenida mediante fotopolimerización ultravioleta (UV). Para ello, se empleó *N,N'*-metilenbisacrilamida (MBA)

como agente reticulante y 2-hidroxi-4'-(2-hidroxietoxi)-2-metilpropiofenona (IG) en calidad de fotoiniciador. La fase líquida confinada corresponde al dimetilsulfóxido (DMSO), disolvente de alta polaridad y elevada estabilidad térmica que minimiza la tasa de evaporación en condiciones de operación ordinarias. Dado que la matriz polimérica no se dopa con partículas nanométricas conductoras (e.g., grafeno o plata), el mecanismo de conducción eléctrica es de naturaleza puramente iónica, gobernado por la movilidad y concentración de portadores de carga dentro del disolvente orgánico. Para más información acerca de este gel, véase (Payo et al., 2021).

El principio de transducción piezorresistivo se fundamenta en la relación entre la resistencia eléctrica macroscópica (R) del gel y sus parámetros geométricos, definida matemáticamente según:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

donde ρ representa la resistividad eléctrica intrínseca del material, L denota la longitud del camino de conducción iónica, y S es el área de la sección transversal de la muestra. Al evaluar las variaciones relativas mediante diferenciación total respecto a un estado basal en reposo (R_0, ρ_0, L_0, S_0), se obtiene la ecuación diferencial:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} + \frac{\Delta L}{L_0} - \frac{\Delta S}{S_0} \quad (2)$$

Asumiendo que la resistividad del gel permanece invariante, y la longitud del camino de conducción no cambia ($\Delta \rho \approx 0, \Delta L \approx 0$), la expresión se simplifica a:

$$\frac{\Delta R}{R_0} \approx - \frac{\Delta S}{S_0} \quad (3)$$

El signo negativo formaliza matemáticamente el comportamiento del gel: cuando una fuerza externa ejerce una compresión local sobre el organogel, la matriz polimérica experimenta una disminución de la sección transversal (S) aumentando localmente la resistencia eléctrica.

Para medir estos cambios resistivos de forma precisa sin la interferencia crítica de las caídas de tensión parásitas provocadas por las impedancias del cableado y las impedancias de la interfaz electrodo-gel, resulta imprescindible utilizar el método de los cuatro electrodos como se estudia en (Payo et al., 2021).

Bajo esta configuración, se utilizó un gel con forma cilíndrica cuya longitud es mucho mayor que su diámetro para desarrollar un sensor de fuerza distribuido. Un par de electrodos exteriores situados en los extremos longitudinales del gel se encargan de inyectar una corriente de CA senoidal conocida. De forma desacoplada, uno o varios pares de electrodos interiores se disponen a lo largo del gel para registrar la caída de tensión en la zona de sensado, conectándose a un circuito electrónico de acondicionamiento de señal.

3. Circuito de acondicionamiento de señal

La obtención de lecturas robustas y precisas de fuerza a partir de geles conductores requiere un minucioso diseño electrónico para contrarrestar las impedancias eléctricas en la interfaz gel-electrodo y los fenómenos de polarización electroquímica que pueden aparecer en el gel. En este artículo se

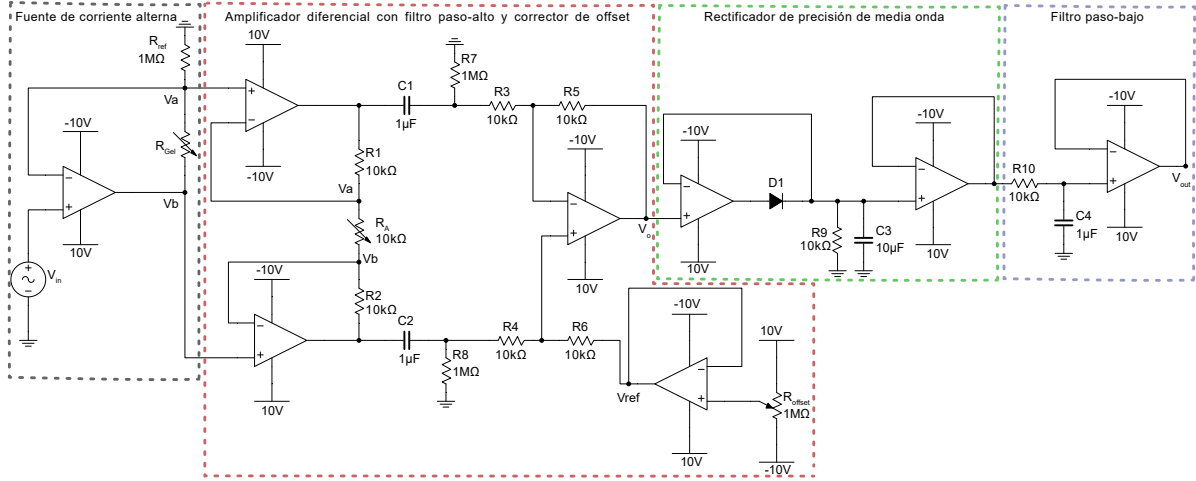


Figura 1: Esquema del circuito de acondicionamiento de señal

presenta una arquitectura de acondicionamiento de señal unificada (véase Figura 1) que perfecciona y optimiza los diseños previos realizados en (Lopez-Diaz et al., 2022). El esquema completo de bloques se divide en cuatro etapas fundamentales interconectadas: fuente de corriente de excitación en corriente alterna (CA), amplificador de instrumentación diferencial con filtro paso-alto y corrector analógico de offset integrados, rectificador de precisión de media onda acoplado a una red de suavizado RC, y una etapa final de adaptación de impedancias provista de filtrado paso-bajo.

La primera etapa comprende una fuente de corriente alterna senoidal orientada a estabilizar el flujo iónico dentro del organogel. Para evitar la degradación irreversible del material provocada por la migración electroquímica unidireccional de portadores, se inyecta una señal puramente alterna mediante un generador que excita el terminal no inversor de un amplificador operacional (dentro de un integrado de bajo consumo TL084ACN) realimentado negativamente a través del propio gel. Fijando una tensión de entrada senoidal con una frecuencia de 1 kHz y una amplitud de 1 V, $V_{in} = 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 10^3 t)$ V, y disponiendo una resistencia límite de referencia a tierra, $R_{ref} = 1 \text{ M}\Omega$, la corriente de excitación inyectada en el gel queda definida mediante la relación de Ohm:

$$i(t) = \frac{V_{in}(t)}{R_{ref}} = 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 10^3 t) [\mu\text{A}] \quad (4)$$

Esta limitación a una amplitud de $1 \mu\text{A}$ garantiza la integridad del gel ante sobrecalentamientos por efecto Joule o saturación iónica. Las tensiones analógicas alternas resultantes a ambos lados de la zona de medición del gel se denotan como V_a y V_b .

Para procesar la sutil diferencia de tensión $\Delta V = V_b - V_a$ inducida por los cambios piezorresistivos del organogel al ser presionado, se implementa una etapa de amplificación, un filtrado paso-alto y una corrección del offset en una topología optimizada. Definiendo un diseño simétrico donde las resistencias de la red restadora se igualan a un valor nominal ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_9 = R_{10} = 10 \text{ k}\Omega$), las resistencias de filtrado se fijan en $R_7 = R_8 = 1 \text{ M}\Omega$, y las capacidades adoptan un valor de $C_1 = C_2 = 1 \mu\text{F}$, se obtiene una frecuencia de corte para el filtro paso alto de:

$$f_{c,alto} = \frac{1}{2\pi R_7 C_1} \approx 0,16 \text{ Hz} \quad (5)$$

La tensión de salida en el dominio de Laplace de esta etapa intermedia (V_o) se expresa como:

$$V_o(s) = \left[\frac{2 \frac{R_1}{R_A} + 1}{1 + \frac{1}{s C_1 R_7} + \frac{1}{s C_1 R_1}} \right] \cdot [V_b(s) - V_a(s)] + V_{ref} \quad (6)$$

donde R_A representa un potenciómetro de precisión multivuelta lineal de $10 \text{ k}\Omega$ encargado de regular la ganancia estática ($A = 2 \frac{R_1}{R_A} + 1$). Ajustando el potenciómetro a su valor máximo de $10 \text{ k}\Omega$, se define una ganancia mínima de $A = 3$. Simultáneamente, un circuito corrector analógico de offset inyecta una tensión continua de referencia ajustable (V_{ref}), permitiendo desplazar la señal y suprimir voltajes de offset residuales antes de la rectificación.

A continuación, la señal alterna modulada en amplitud por la fuerza táctil es rectificada a un nivel continuo mediante un rectificador de precisión de media onda. La inclusión de un diodo (1N4007) dentro del lazo cerrado de realimentación del amplificador operacional anula analíticamente la caída de tensión directa del diodo ($\approx 0,7 \text{ V}$), permitiendo rectificar señales con amplitudes del orden de milivoltios sin distorsión por zona muerta. La señal rectificada alimenta una red pasiva RC de suavizado ($C_3 = 10 \mu\text{F}$, $R_9 = 10 \text{ k}\Omega$) diseñada bajo un compromiso entre la mitigación del rizado residual de la señal alterna a 1 kHz y la agilidad de la respuesta transitoria del sensor ante la deformación dinámica del gel.

Finalmente, para resguardar la electrónica y dotar de robustez al sistema, se utiliza una etapa de adaptación de impedancias con un seguidor de tensión acoplada a un filtro paso bajo de topología RC de primer orden ($R_{10} = 10 \text{ k}\Omega$, $C_4 = 1 \mu\text{F}$). Este bloque se ha diseñado para establecer una atenuación del ruido eléctrico en 15.9 Hz, filtrando, p.e., el ruido ocasionado por la red eléctrica comercial (50 Hz).

$$f_{c,bajo} = \frac{1}{2\pi R_{10} C_4} \approx 15,9 \text{ Hz} \quad (7)$$

La respuesta final acondicionada en corriente continua es óptima para su digitalización a través de tarjetas de adquisición de datos (DAQ) estándar.

4. Validación experimental

Con el propósito de caracterizar rigurosamente la viabilidad del organogel AM-DMSO como transductor de fuerza distribuido, se desarrollaron una serie de ensayos experimentales orientados a cuantificar la dependencia de la respuesta eléctrica respecto a la localización geométrica espacial de la carga mecánica. Como se muestra en la Figura 2, la plataforma experimental de ensayos se estructuró mediante una arquitectura geométrica de tres orificios equidistantes (separación entre orificios de 31 mm), por los que se ejerce presión con una clavija (carga mecánica) a lo largo del gel.

La aplicación de fuerzas se realizó mediante émbolos guiados que permiten alojar pesos calibrados para inducir escalones de fuerza. Tanto la inyección de corriente como el registro de la diferencia de potencial se realizaron a través de terminales de cobre integrados en la estructura que actúan como electrodos del sensor.

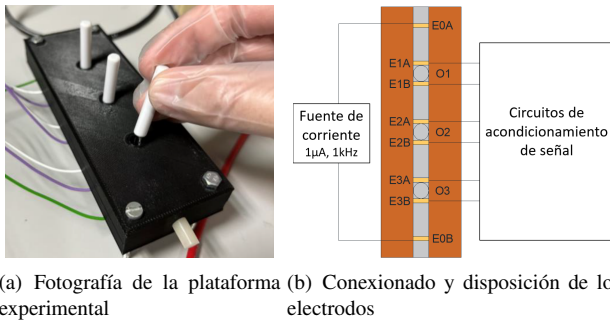
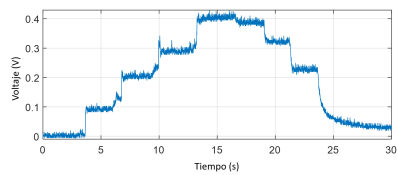


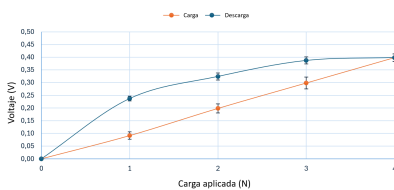
Figura 2: Plataforma experimental para validar el uso del gel como sensor de fuerza.

4.1. Ensayo de linealidad e histéresis

El primer bloque de ensayos tuvo como objetivo determinar la sensibilidad del material y evaluar su comportamiento durante ciclos completos de carga y descarga. El experimento se llevó a cabo aplicando incrementos discretos y secuenciales de fuerza normal sobre un único sensor (orificio), empleando escalones de 1 N hasta alcanzar una cota máxima segura de



(a) Curva de carga y descarga de un ciclo del sensor 2



(b) Gráfico de dispersión resultante de los 10 ciclos

Figura 3: Resultados del ensayo de linealidad e histéresis del sensor situado debajo del orificio 2.

4 N, para posteriormente revertir el proceso de forma simétrica decreciente. Para dotar de validez estadística al estudio, se completaron 10 ciclos por cada muestra de gel.

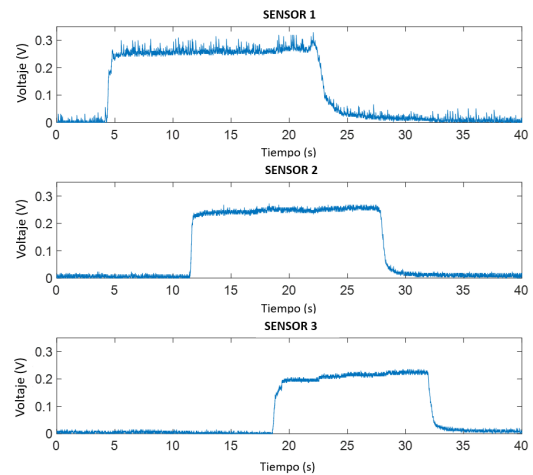
Los resultados experimentales (Figura 3) demostraron una excelente proporcionalidad lineal durante la fase de carga. El modelo de regresión lineal obtenido para el sensor situado debajo del orificio 1 exhibió una recta de calibración de:

$$V_{out} = 0,4179 \cdot F \quad (8)$$

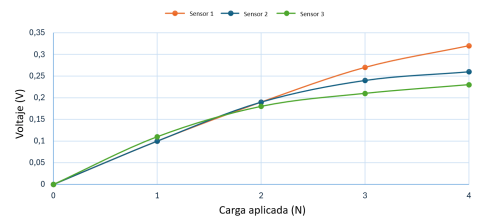
con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,989$, mientras que el resto de los sensores presentaron pendientes de $k_{G2} = 0,3087 \text{ V/N}$ y $k_{G3} = 0,3226 \text{ V/N}$ respectivamente. Sin embargo, al analizar la fase de descarga se constató una desviación sistemática en la tensión de salida, manifestando un fenómeno de histéresis. La amplitud de esta histéresis demostró ser independiente de factores externos y se identificó como una propiedad reológica intrínseca ligada a los tiempos de relajación elástica de la matriz macromolecular del organogel al recuperar su volumen basal.

4.2. Ensayo de independencia de las medidas

El segundo experimento tuvo como objetivo evaluar la diafonía (o interferencia mutua) entre los diferentes sensores del gel situados debajo de los tres orificios. Específicamente, se analiza si la aplicación de cargas mecánicas en un sensor altera la respuesta de los sensores adyacentes, con el propósito de determinar el grado de independencia espacial y la fidelidad de las mediciones del sistema sensor.



(a) Señales de los tres sensores durante la aplicación de 3 N



(b) Gráfica de la tensión de salida frente a la carga aplicada en los tres puntos diferentes del gel

Figura 4: Resultados del ensayo para evaluar la independencia de las medidas.

Los resultados muestran que, durante la aplicación y retirada de la fuerza, no hay interferencia en las señales de los diferentes puntos (sensores), como se observa en la Figura 4(a).

Este resultado indica que el gel mantiene la independencia de las mediciones en los diferentes puntos, incluso cuando se aplica o retira peso en otros puntos. Al reunir los resultados de todas las pruebas, se obtiene el gráfico de la Figura 4(b). En los puntos 2 y 3, a medida que aumenta el peso, se observa una menor variación de tensión. Esto puede atribuirse al hecho de que el gel, cuando el punto 1 se encuentra inicialmente bajo presión, sufre una redistribución interna de fuerzas que afecta a la capacidad del gel para deformarse posteriormente de manera uniforme en los puntos 2 y 3.

4.3. Ensayo de carga concentrada y distribuida

Este experimento fue diseñado con el propósito de caracterizar la respuesta del organogel bajo dos configuraciones distintas de carga. Se evalúa y compara la señal resultante de aplicar una carga constante de 3 N, administrada de forma concentrada en un único punto o distribuida simétricamente en tres puntos de la matriz del sensor. Los ensayos revelaron que la dispersión de la carga induce una magnitud significativamente mayor en la variación del voltaje de salida en comparación con la respuesta obtenida ante una fuerza puntual equivalente como se muestra en la Figura 5.

Este comportamiento se fundamenta en los principios de la piezorresistividad geométrica del organogel, donde la resistencia eléctrica es inversamente proporcional al área de la sección transversal del material conductor. Al presionar en varios puntos a la vez, el grosor y la sección del gel cambian en muchas más zonas entre los electrodos. Al final, esta acumulación de pequeñas deformaciones hace que la resistencia eléctrica varíe más, lo que se traduce directamente en una señal de tensión más alta.

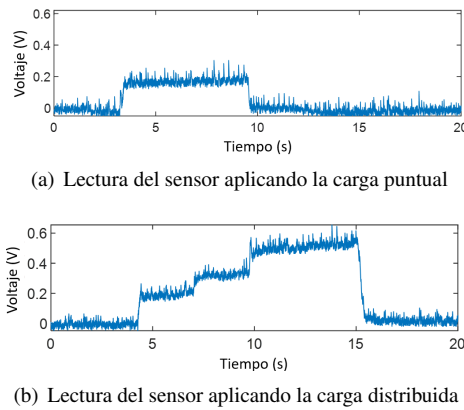


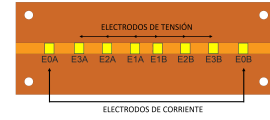
Figura 5: Resultados del ensayo para evaluar los efectos de aplicar una carga de manera puntual o distribuida.

4.4. Influencia de la distancia entre electrodos

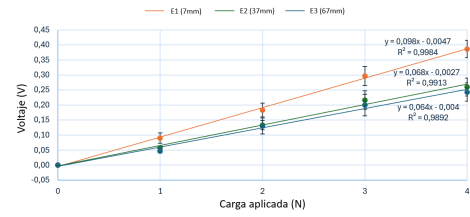
Finalmente, se analizó la influencia de la separación entre los electrodos de medición de tensión interiores. Cambiando la configuración de los electrodos de la carcasa inferior como se observa en la Figura 6(a), se pueden obtener diferentes distancias de separación simétrica respecto al orificio del centro. El par de electrodos E_1 se encuentran a una separación de 7 mm mientras que los pares E_2 y E_3 están a 37 mm y 67 mm, respectivamente.

Se demostró que el par de electrodos con menor distancia de separación (E_1) proporciona la máxima variación de

tensión eléctrica ante la aplicación de una fuerza concentrada. Cuanto menor es la distancia entre electrodos, mayor es la variación relativa de la sección transversal local ($\Delta S/S_0$). A medida que los electrodos interiores se distancian longitudinalmente, la resistencia eléctrica promedio zonas deformadas con zonas en reposo, reduciendo drásticamente la variación resistiva equivalente y atenuando la sensibilidad del sistema.



(a) Disposición de los electrodos para la realización del ensayo



(b) Rectas de tensión frente a carga aplicada para las tres distancias estudiadas

Figura 6: Resultados del ensayo para evaluar la influencia de la distancia entre los electrodos de medición de tensión.

4.5. Aplicación del sensor en una pinza robótica

En (García-Delgado et al., 2025) se validó el sensor analizado, donde se integró en una pinza robótica de dos dedos flexibles (fabricados en TPU Shore 95A), accionada mediante un motor de CC con transmisión de piñón y cremallera. La Figura 7 muestra el prototipo diseñado. El dedo cuenta con galgas extensiométricas en su base para medir el par neto y un sensor táctil basado en el organogel, distribuido en cuatro zonas táctiles, para identificar la localización geométrica del contacto.

El lazo de control opera bajo una arquitectura híbrida Posición/Fuerza en tiempo real. Tras una aproximación inicial con el control de posición, el contacto se detecta cuando las galgas superan un umbral de fuerza. En ese instante, el sistema conmuta al lazo de control de fuerza y el algoritmo identifica la zona de contacto a partir de la lectura del organogel. El regulador utilizado para el control de posición/fuerza fue un regulador proporcional-integral.

Como es bien sabido, la rigidez elástica del dedo (barra flexible) varía de forma inversamente proporcional al cubo de la distancia a la que se aplica la fuerza, ($k_{fuerza} = 3EI/l^3$), modificando drásticamente la ganancia según el punto de contacto. Por consiguiente, la función de transferencia que relaciona la fuerza de agarre con la tensión eléctrica aplicada al motor exhibe una ganancia variable y dependiente de la coordenada espacial del contacto (l):

$$G_{fuerza}(s) = \frac{F(s)}{V(s)} = \left(\frac{3EI}{l^3} \right) \cdot \frac{22,1278}{s(s + 4,6882)} \quad (9)$$

Por tanto, si el contacto ocurre cerca de la base del dedo (menor longitud l), la ganancia de la planta aumenta y mantener fijas las ganancias del regulador provocaría una amplifi-

cación drástica del par motor, saturando el servoamplificador de corriente que alimenta al motor, e induciendo inestabilidad o sobreesfuerzos mecánicos sobre el objeto agarrado. Por esta razón, se implementó un control adaptativo por planificación de ganancias que reajusta dinámicamente los parámetros del regulador PI (K_p y K_i) en función del valor del punto de contacto l estimado por el gel.

La robustez y efectividad del prototipo de la pinza se validó mediante ensayos experimentales de agarre en tiempo real sobre cuerpos frágiles. En el agarre de una bola de Navidad (contacto en Zona 3, $l = 5,5$ cm) el controlador se sintonizó a $K_p = 1,2$, y $K_i = 0,24$; mientras que ante un huevo de gallina natural (contacto en Zona 2, $l = 4$ cm) adaptó las ganancias a valores más restrictivos ($K_p = 0,9$, $K_i = 0,18$). En ambos escenarios se reguló la fuerza suavemente hasta la consigna de 1,5 N sin provocar daños estructurales, demostrando la viabilidad del sensor blando en la manipulación de objetos delicados. Para más información, consultar (García-Delgado et al., 2025).

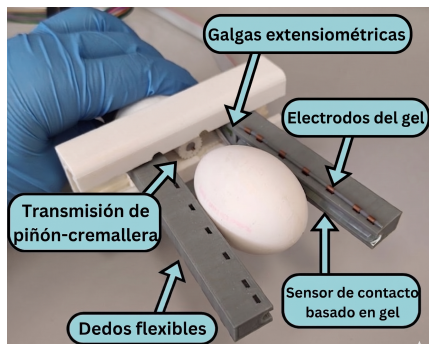


Figura 7: Fotografía del prototipo de la pinza con el organogel embutido en el dedo.

5. Conclusiones

En este artículo se ha presentado el desarrollo, la caracterización y la validación de un sensor de fuerza distribuido de alta sensibilidad basado en organogeles de acrilamida y dimetilsulfóxido (AM-DMSO) para aplicaciones en robótica blanda. Los resultados demuestran que la implementación de la técnica de los cuatro electrodos, integrada en una arquitectura de acondicionamiento de señal en corriente alterna (CA), constituye una solución eficaz frente a las limitaciones de los geles conductores. Esta configuración electrónica anula las impedancias parásitas de la interfaz electrodo-gel y suprime de forma drástica la polarización iónica en el gel, lo que permite aislar la respuesta piezorresistiva intrínseca del material con una elevada precisión y optimizar la resolución global del sistema de medida.

La caracterización experimental ha permitido evaluar la respuesta del sensor y evaluar las dependencias espaciales que condicionan su funcionamiento. A través de los ensayos estáticos se ha ratificado que el organogel presenta un excelente

comportamiento lineal en la fase de carga. Asimismo, se observó la aparición de histéresis en la fase de descarga que responde a la naturaleza viscoelástica intrínseca del polímero. Por otra parte, se demostró que no existe interferencia entre las señales de los sensores distribuidos a lo largo del gel, y se analizó la respuesta del sensor ante cargas concentradas y distribuidas, así como la influencia de la distancia entre electrodos.

Finalmente, la viabilidad práctica de este sensor blando se validó mediante su incorporación en un dedo flexible de una pinza robótica. La combinación del organogel con una estrategia adaptativa de planificación de ganancias permitió adaptar el regulador de fuerza de agarre en función de la coordenada del punto de contacto, garantizando la integridad de objetos de extrema fragilidad.

Agradecimientos

Este estudio es parte de los proyectos PID2023-151681OB-I00 y PDC2025-165474-I00, financiados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU)/Agencia Estatal de Investigación (AEI)/10.13039/501100011033 y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), Unión Europea (UE); y en parte por el proyecto SBPLY/24/180225/000078, financiado por la UE a través del FEDER, y por el Gobierno Regional de Castilla-La Mancha a través de la Agencia de Investigación e Innovación de Castilla-La Mancha (INNOCAM).

Referencias

- Cui, X., Zhang, W., Lv, M., Huang, T., Xi, J., Yuan, Z., Aug. 2025. Flexible and wearable tactile sensors for intelligent interfaces. *Materials* 18 (17), 4010. DOI: 10.3390/ma18174010
- García-Delgado, J., Payo, I., Nevado, A., Andreu, C. M., Patiño, F. J., Vázquez, E., Apr. 2025. Conductive gel-based contact sensor embedded in a low-cost 3d-printed two-flexible-finger gripper for grasping fragile objects. In: 2025 IEEE 8th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, p. 1–6. DOI: 10.1109/robosoft63089.2025.11020821
- Li, G., Li, C., Li, G., Yu, D., Song, Z., Wang, H., Liu, X., Liu, H., Liu, W., Oct. 2021. Development of conductive hydrogels for fabricating flexible strain sensors. *Small* 18 (5). DOI: 10.1002/smll.202101518
- Lopez-Diaz, A., Braic, A., Ramos, F., Payo, I., Vazquez, E., Vazquez, A. S., Apr. 2022. Hydrogel-based soft pneumatic bending actuator with self-healing and proprioception capabilities. In: 2022 IEEE 5th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, p. 370–375. DOI: 10.1109/robosoft54090.2022.9762200
- Payo, I., Polo, J. L., López, B., Serrano, D., Rodríguez, A. M., Herrero, M. A., Martín-Pacheco, A., Sánchez, I., Vázquez, E., nov 2021. Signal conditioning circuit for gel strain sensors. *Smart Materials and Structures* 31 (1), 015020. DOI: 10.1088/1361-665X/ac36fa
- Xu, L., Li, X., Gao, J., Yan, M., Wang, Q., Aug. 2024. Environment-tolerant gelatin based ionic conductive organohydrogel for flexible sensor. *Materials Today Communications* 40, 109542. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109542