






Sistema de interpretación de gestos manuales con sensores flexibles de grafeno sobre poliimida y adquisición en esp32

Hand gesture interpretation system with flexible graphene on polyimide sensors and data acquisition on esp32

J.A. Badillo-Hernández ^b, A. Olguín-Iglesias ^d, J. M. Mejía-Olguín ^a, V. Rodríguez-Lugo ^b, K. Alemán-Ayala ^{a,*}

^a Área Académica de Computación y Electrónica, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184, México.

^b Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184, México.

^c Departamento de Formación Básica Disciplinaria, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Hidalgo, Instituto Politécnico Nacional, Carretera Pachuca-Actopan Km 1+500, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación, San Agustín Tlaxiaca, 42162 Hidalgo, México.

Resumen

La detección de gestos manuales mediante sensores flexibles es crucial para interfaces hombre-máquina y asistencia biomédica. Entre estos, los sensores piezorresistivos destacan por su simplicidad y robustez. El grafeno, específicamente el generado por láser sobre poliimida (LIG), es un material ideal para ello, ya que combina conductividad, una estructura porosa y un sustrato flexible. Se determinó que una potencia de 3.5 W (equivalente al 7% de la potencia máxima de 50 W de un láser de CO₂ (CNC4040-L50W) y una velocidad de 40 mm/s son óptimas para producir LIG con propiedades eléctricas estables y repetibles en PI Kapton®. La selección de estos parámetros se basó en un barrido experimental donde se midió la resistencia eléctrica de las muestras mediante el método de cuatro puntas, seleccionando la combinación que proporcionó los valores de resistencia más bajos y estables. Con este material, se fabricó un sensor de presión basado en dos sustratos de LIG enfrentados. Su señal fue procesada por un microcontrolador ESP32, creando un sistema accesible y de bajo costo. Este sistema permite facilitar la comunicación de usuarios con movilidad limitada mediante simples movimientos de los dedos.

Palabras Clave: Grafeno inducido por láser; Gestos manuales; Sensores piezorresistivos; Dispositivos flexibles; Procesamiento de señales.

Abstract

The detection of hand gestures using flexible sensors is crucial for human-machine interfaces and biomedical assistive systems. Among these, piezoresistive sensors stand out for their simplicity and robustness. Graphene—specifically laser-induced graphene (LIG) formed on polyimide (PI)—is an ideal material because it combines conductivity, a porous structure, and a flexible substrate. It was determined that a power of 3.5 W (equivalent to 7% of the maximum power of a 50 W CO₂ laser (CNC4040-L50W) and a speed of 40 mm/s are optimal for producing LIG with stable and repeatable electrical properties on PI Kapton®. The selection of these parameters was based on an experimental sweep where the electrical resistance of the samples was measured using the four-point probe method, selecting the combination that provided the lowest and most stable resistance values. Using this material, a pressure sensor was fabricated from two facing LIG-coated PI substrates. Its resistive signal was processed by an ESP32 microcontroller, yielding an accessible, low-cost system that facilitates communication for users with limited mobility through simple finger movements.

Keywords: Laser-induced graphene; Hand gestures; Piezoresistive sensors; Flexible devices; Signal processing.

1. Introducción

La creciente necesidad de soluciones tecnológicas para mejorar la asistencia biomédica y los sistemas de interacción

humano-máquina ha impulsado el desarrollo de sensores flexibles de gestos. Entre las diversas tecnologías disponibles, los sensores piezorresistivos basados en materiales carbonosos destacan por su principio de funcionamiento sencillo y su

*Autor para la correspondencia: karina_aleman@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: angel_badillo@uaeh.edu.mx (Jorge Angel Badillo Hernández), aolguini@ipn.mx (Alejandro Olguín Iglesias), me464634@uaeh.edu.mx (José Miguel Mejía Olguín), ventura.rl65@gmail.com (Ventura Rodríguez Lugo), Karina Alemán Ayala (karina_aleman@uaeh.edu.mx)

Historial del manuscrito: recibido el 05/09/2025, última versión-revisada recibida el 27/10/2025, aceptado el 06/11/2025, publicado el 12/12/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial4.15938>



amplio rango de detección. Estos dispositivos ofrecen comodidad de uso, adaptabilidad y buen desempeño en aplicaciones como piel electrónica, detección de movimiento, monitorización sanitaria, robótica, tecnología vestible e interfaces hombre-máquina (Huang *et al.*, 2025).

En este contexto, el grafeno inducido por láser (LIG) emerge como un material de fabricación idóneo para dichos sensores. Este material se obtiene mediante la irradiación directa de precursores poliméricos, como la poliimida (PI), con un láser de CO₂, lo que provoca un calentamiento localizado capaz de alcanzar temperaturas superiores a 2500 °C. Este proceso induce la pirólisis del material, rompiendo enlaces químicos y eliminando átomos de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno en forma de compuestos volátiles (CO, CO₂, H₂O), mientras que los átomos de carbono remanentes se reorganizan en estructuras con hibridación sp² (Materón *et al.*, 2025). Como resultado, se forma una red tridimensional porosa de dominios gráficos con alta conductividad eléctrica y gran área superficial. Dado que su síntesis es directa, económica y escalable, el LIG se posiciona como una alternativa prometedora y práctica para la fabricación de sensores flexibles (Zhu *et al.*, 2025; Nankali *et al.*, 2025). Además, a diferencia de metodologías convencionales como la deposición química de vapor (CVD), el proceso LIG no requiere atmósferas controladas ni etapas de transferencia, lo que simplifica enormemente la integración del material en sustratos flexibles (Han *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2025; Ibarra-García *et al.*, 2021).

El fenómeno ocurre en condiciones ambientales, sin necesidad de atmósferas controladas ni catalizadores. Las propiedades finales del LIG dependen críticamente de parámetros como la potencia del láser y la velocidad de barrido, los cuales determinan el grado de grafitización y la morfología del material obtenido. Precisamente, la efectividad del LIG como sensor está directamente vinculada a su arquitectura interna, una característica que puede ajustarse mediante la modulación de estos mismos parámetros de procesamiento. La potencia y la velocidad de escaneo del láser controlan la morfología del material y en consecuencia, su respuesta eléctrica bajo carga mecánica, lo que habilita su funcionalidad piezorresistiva (Zhu *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2025). Esta versatilidad de fabricación ha permitido su adopción en diversas plataformas de sensado, incluyendo aplicaciones de temperatura y proximidad, así como su integración con diseños de electrodos interdigitales (Han *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2025).

De manera paralela, el desarrollo histórico de esta tecnología se remonta a las primeras demostraciones de LIG sobre polímeros comerciales (Lin *et al.*, 2014), a las que siguió su incorporación en materiales compuestos. Más recientemente, se ha explorado la obtención de LIG a partir de precursores biobasados, lo que abre rutas de fabricación sostenible (Chen *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2025; Moraila-Martínez *et al.*, 2024). Particularmente, los sensores de presión configurados con este material destacan en interfaces accesibles, ya que el aumento del área de contacto entre superficies activas bajo presión reduce las trayectorias de resistencia y genera una señal eléctrica proporcional a la fuerza aplicada (Zhao *et al.*, 2025; Huang *et al.*, 2025).

Para aprovechar estas propiedades en aplicaciones reales,

se requiere una plataforma electrónica capaz de acondicionar, procesar y comunicar las señales generadas por el sensor. En esta línea, el microcontrolador ESP32 representa una solución integral al combinar conectividad inalámbrica (WiFi/Bluetooth), modos de bajo consumo, capacidad de procesamiento y múltiples interfaces analógicas y digitales dentro de un ecosistema de desarrollo maduro y accesible. Estudios recientes respaldan su empleo como unidad central para la adquisición y análisis de variables eléctricas, así como para la transmisión de datos en tiempo real mediante plataformas IoT (El-Khozondar *et al.*, 2024).

En consecuencia, este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de detección flexible que integra un sensor de flexión basado en LIG, dispuesto en configuración de superficies enfrentadas, con una plataforma de control sustentada en el microcontrolador ESP32. El sistema se diseñó para activarse mediante gestos manuales, destacando la importancia de seleccionar parámetros de fabricación óptimos que permitan obtener la microestructura adecuada para maximizar el desempeño del sensor. La integración sinérgica entre la tecnología LIG y la plataforma ESP32 da como resultado una solución eficiente, de bajo costo y fácil acceso, capaz de procesar las señales generadas y de incorporarse en diversas aplicaciones de interacción humano-máquina.

2. Materiales y métodos

2.1. Generación de LIG por láser de CO₂ y ensamblaje del sensor

La fabricación del sensor comenzó con la preparación de sustratos de poliimida (Kapton®) de 125 μm de espesor. Previo al procesamiento láser, los sustratos se limpiaron meticulosamente con etanol al 95 % mediante un paño libre de pelusa para eliminar cualquier contaminante superficial que pudiera comprometer la calidad del grafeno inducido por láser (LIG).

La etapa de diseño consistió en la creación de un patrón rectangular mediante software de edición vectorial, optimizando su geometría para maximizar la sensibilidad del sensor. Este diseño se transfirió a la superficie de poliimida utilizando un sistema láser CNC de CO₂ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) con una potencia máxima nominal de 50 W. Se empleó un rango de velocidades de escaneo de 10–80 mm/s. Manteniendo el modo de operación continuo, se varió sistemáticamente la potencia del láser en el intervalo 6–7 % de la capacidad nominal, con el objetivo de evaluar la influencia de la velocidad y de la potencia en la morfología y en las propiedades eléctricas del LIG generado (véase la Figura 1).

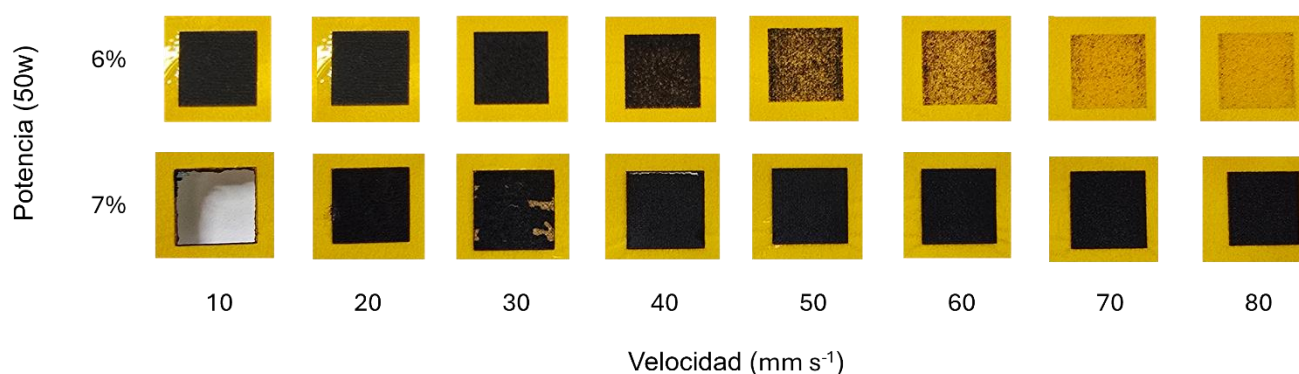


Figura 1. Matriz potencia-velocidad.

2.2. Caracterización por difracción de rayos X

La caracterización de los sustratos de poliimida y de las áreas modificadas mediante LIG se realizó mediante difracción de rayos X. Las mediciones se llevaron a cabo en un difractómetro equipado con radiación $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operado en un rango de barrido de 2θ entre 5° y 100° .

2.3. Lectura y procesamiento con ESP32

Para registrar la variación de la resistencia del sensor, éste se conectó en serie con una resistencia fija formando un divisor de voltaje (Thaloy et al., 2023), descrito mediante la ecuación:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_{fija}}{R_{fija} + R_{sensor}} \quad (1)$$

donde V_{in} corresponde al voltaje de alimentación, R_{sensor} a la resistencia dependiente del LIG y R_{fija} a la resistencia de referencia. De esta manera, los cambios en la resistencia del material se traducen en variaciones de V_{out} .

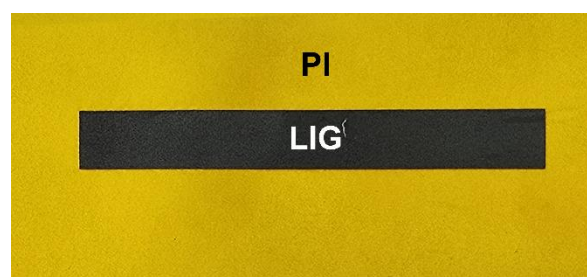
La señal resultante fue aplicada a las entradas analógicas del microcontrolador ESP32, el cual, mediante programación en Arduino IDE, se encargó de digitalizar el voltaje, procesar las variaciones registradas y mostrar en tiempo real los datos en el monitor serial. Adicionalmente, se implementó un procedimiento para almacenar las mediciones en un archivo (.CSV), lo que permite disponer de un registro sistemático para su posterior análisis.

3. Resultados y discusión

3.1. Configuración del sensor

En la Figura 2 se presenta la fotografía del patrón rectangular obtenido por láser sobre la película de PI. El área del patrón muestra bordes bien definidos y una separación homogénea, sin rebabas ni zonas oscurecidas fuera del trazo, lo que sugiere un control adecuado de la potencia y la velocidad de escaneo. La continuidad del trazo se mantiene en toda el área activa y no se aprecian estrechamientos críticos en las esquinas o cambios de

dirección, condición necesaria para evitar cuellos de botella de corriente durante la operación del sensor.

Figura 2. Patrón rectangular de LIG formado por láser CO_2 sobre PI.

Por su parte, el análisis visual de la superficie revela la conversión superficial tras el escaneo. Se observa un cambio de la tonalidad ámbar característica de la PI a un negro mate/gris gráfico en las regiones expuestas, acompañado de una textura porosa con brillo difuso a luz rasante. Esta transición cromática y de rugosidad es consistente con la formación de una red conductora asociada al LIG. La uniformidad del color a lo largo del patrón y el límite nítido entre zonas transformadas y áreas vírgenes de PI indican una conversión estable y bien confinada al diseño rectangular, lo cual es fundamental para favorecer la repetibilidad de la respuesta eléctrica.

Si bien la inspección visual (Figura 2) confirma la calidad morfológica y la conversión del material, la respuesta eléctrica resultante depende críticamente de los parámetros de fabricación (potencia y velocidad) mencionados. La Tabla 1 proporciona la caracterización cuantitativa de esta respuesta, detallando la resistencia eléctrica superficial obtenida.



Figura 3. Conexión de terminales de Cu sobre el patrón rectangular de LIG.

La Figura 3 presenta la interfaz entre el patrón rectangular de LIG sobre PI y el contacto de cobre dispuesto en su extremo.

Tabla 1. Variación de la resistencia eléctrica superficial del grafeno inducido por láser (LIG) sobre poliimida (Kapton®) en función de la velocidad de escaneo para potencias relativas del 6 % (≈ 3.0 W) y 7 % (≈ 3.5 W).

Velocidad (mm/s)	10	20	30	40	50	60	70	80
R_6% (Ω)	160	25.9	172	-----	-----	-----	-----	-----
R_7% (Ω)	-----	48	19	30.5	51.9	1.41 k	-----	-----

Se aprecia un solape uniforme en la zona de unión, caracterizado por bordes bien definidos y sin señales de laminación o levantamientos. La coincidencia geométrica entre el trazo de LIG y la lámina de cobre, junto con la ausencia de imperfecciones visibles, indica una unión firme con estabilidad mecánica suficiente para tolerar manipulaciones y flexiones ligeras.

3.2. Respuesta eléctrica del sensor con ESP32

La caracterización y adquisición de datos se organizaron en torno al divisor (véase la ecuación (1)) y al nodo de medida de la cadena LIG–divisor–ADC del ESP32. El sistema mostró tres niveles representativos en los datos de salida del ADC de 12 bits: reposo (0 cuentas), flexión ligera (≈ 2000 cuentas, $\sim 49\%$ de la escala completa) y flexión pronunciada (3.0×10^3 cuentas, $\sim 70\text{--}73\%$ de la escala). Estos estados de flexión del dedo con el sensor se observan en la Figura 4. La gráfica de los datos de salida del ADC de 12 bits vs. tiempo (véase Figura 5) evidencia dichos niveles. El sensor resistivo disminuye su resistencia al incrementar la carga; al medirse la señal sobre $R_{fija} = 10\ \Omega$, una reducción de R_{sensor} provoca un aumento del voltaje en el nodo de medida, lo que se refleja en un incremento del valor registrado por el ADC.

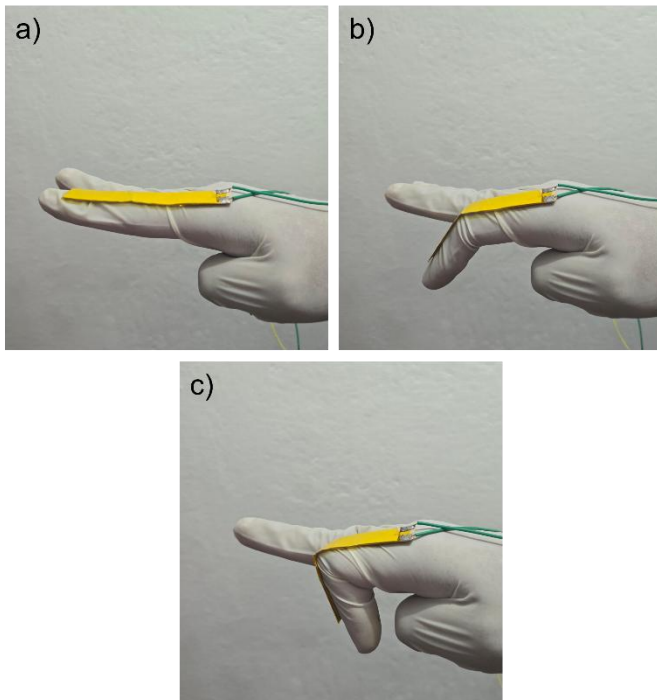


Figura 4. Estados de flexión del dedo con sensor flexible LIG/PI: (a) reposo, (b) flexión ligera y (c) flexión pronunciada.

En reposo no hay continuidad (circuito abierto), lo que resulta en una lectura de voltaje y un dato de salida cercano a

cero. Los valores de resistencia aproximados del sensor para cada estado fueron: Reposo (circuito abierto), Flexión Ligera ($\sim 15\Omega$) y Flexión Pronunciada ($\sim 3\Omega$).

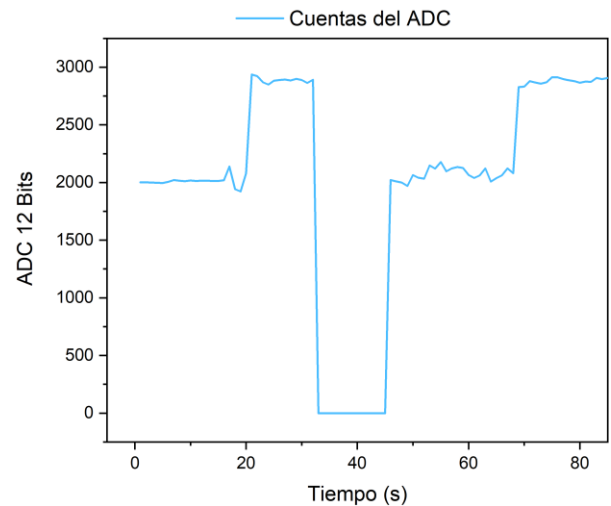


Figura 5. Variación de la lectura del ADC (12 bits, ESP32).

La gráfica V_{out} –tiempo (Figura 6) muestra transiciones rápidas entre tres estados, seguidas de segmentos de nivel estable mientras se mantiene la flexión mecánica; los intervalos sombreados identifican reposo (0 V, línea roja punteada), flexión ligera (≈ 1.5 V) y flexión elevada (≈ 2.5 V), en concordancia con la ecuación (1), al aplicar flexión disminuye R_{sensor} y V_{out} aumenta al medirse sobre R_{fija} . Esta representación temporal permite fijar los umbrales operativos para cada estado y verificar la respuesta del sensor directamente desde la señal de salida.

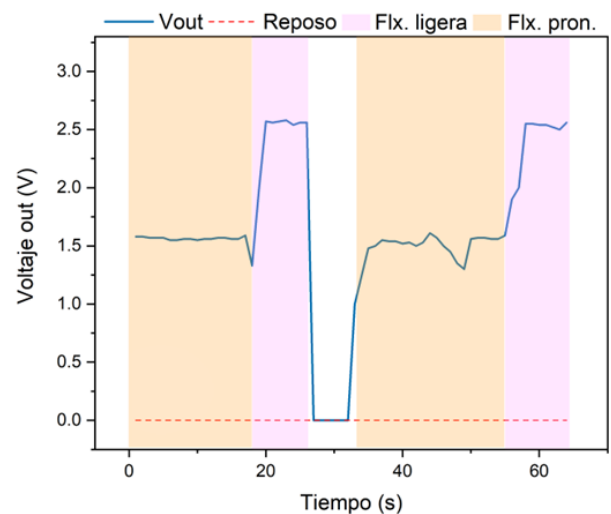


Figura 6. Transiciones entre reposo, presión ligera y presión elevada con referencia a 0 V.

Para garantizar la trazabilidad y facilitar el análisis cuantitativo, el sistema registra los datos en un archivo .CSV con las columnas timestamp, ADC_counts, Vout_V, Rsensor_ohm y etiqueta_evento. Este formato conserva el dato crudo (código del ADC) y las magnitudes derivadas (voltaje y resistencia), lo que permite recalibrar las mediciones si varían parámetros como V_{in} o R_{fija} , y asegura la comparabilidad entre distintos ensayos mediante criterios homogéneos. La evidencia conjunta de las señales representadas en las figuras 6 y 5 confirma la idoneidad de utilizar $R_{fija} = 10 \Omega$, ya que posiciona los niveles de voltaje bajo carga en un rango alto, pero sin saturación, optimizando así la resolución de la medida y la distinción entre los estados de reposo, presión ligera y presión elevada.

3.3. Análisis estructural del LIG en poliimida

La comparación de los difractogramas mostrados en la Figura 7 indica que la poliimida sin tratar (PI raw) presenta un pico ancho y poco definido con máximo en $2\theta \approx 21^\circ$, característico de una matriz mayoritariamente amorfa (Wu *et al.*, 2020). Tras la irradiación, el material resultante PI-LIG muestra un desplazamiento distintivo del pico a $2\theta \approx 26.5^\circ$, acompañado por un ensanchamiento del perfil y la aparición de un hombro. Estas modificaciones del perfil son coherentes con la formación de regiones con carácter gráfico (relacionadas con el apilamiento laminar (002)) y con un incremento del orden de corto alcance en la zona transformada (Muttaqin *et al.*, 2017).

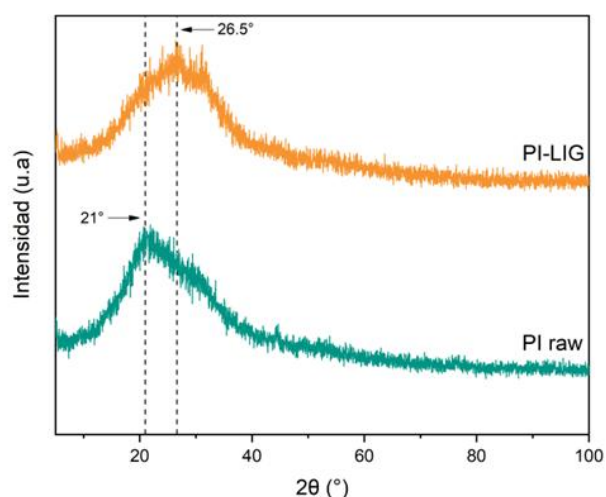


Figura 7. Patrones XRD comparativos: PI raw y PI-LIG

La persistencia de picos anchos y la ausencia de señales estrechas a ángulos mayores indican que no se desarrolla cristalización de largo alcance; el reordenamiento es superficial y limitado. En conjunto, la evolución del patrón respalda la conversión fototérmica hacia dominios sp^2 y es consistente con la mejora de la conectividad eléctrica que habilita trayectorias de conducción sensibles a la compresión, base del comportamiento piezorresistivo del sensor.

4. Conclusiones

Este trabajo demostró la fabricación de un sensor capaz de medir flexiones mecánicas de los dedos de las manos a partir de grafeno inducido por láser de CO_2 ($10.6 \mu m$) sobre poliimida (Kapton®). Mediante el análisis de la matriz potencia-velocidad se identificó una ventana de operación estable alrededor del 7 % de potencia (3.5 W) y velocidades de 10–80 mm/s, seleccionándose 40 mm/s como condición óptima para obtener LIG uniforme en un patrón rectangular. Esta configuración permitió generar un material con morfología continua y elevada densidad gráfica, evidenciada por difracción de rayos X y una resistencia eléctrica entre 3 y 15 Ω según el grado de flexión. Este valor se encuentra por debajo de los rangos típicos del orden de k Ω reportados para sensores PI-LIG más porosos o de menor continuidad, lo cual se atribuye a la alta compactación del LIG y al diseño de doble capa enfrentada. En conjunto, la ruta basada en irradiación láser y procesamiento con ESP32 se consolidó como un método simple, robusto y escalable, con aplicaciones potenciales en sistemas portátiles de rehabilitación, control de interfaces humano-máquina y dispositivos de asistencia para robótica blanda. Este desarrollo presenta un gran potencial para el desarrollo de interfaces táctiles accesibles dirigidas a usuarios con movilidad reducida.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo económico recibido a través de la beca de doctorado otorgada por SECIHTI (821314).

Reconocemos la invaluable colaboración de la Mtra. Yedid Del Ángel Monroy y del Ing. Mariano Augusto Castillo Maldonado, quienes aseguraron el correcto funcionamiento de las instalaciones del Centro de Electrónica y Desarrollo de Aplicaciones Inteligentes (CEDAI) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, donde se encuentra el Laboratorio de Fabricación y Caracterización de Semiconductores utilizado para este trabajo.

Asimismo, agradecemos la valiosa orientación del Dr. Juan Daniel Ramírez Zamora y del Mtro. José Manuel Fernández Ramírez en el uso del equipo CNC láser, ubicado en el taller de reparaciones de la Unidad Central de Laboratorios (UCL), de dicha institución.

Referencias

- Chen, X., Gan, K. W., Pu, S. H., Jalalvand, M., y Hamilton, A. R. (2025). Piezoresistive laser-induced graphene as a low-cost strain sensor for composite structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 116776.
- El-Khozondar, Hala Jarallah and Mtair, Shady Y and Qoffa, Khaled O and Qasem, Omer I and Munyarawi, Ahmad H and Nassar, Yasser F and Bayoumi, Ehab HE and Abd El, Ahmed Abd El Baset and others (2024). A smart energy monitoring system using esp32 microcontroller. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 9:100666.
- Han, R., Wang, L., Tang, X., Qian, J., Yu, J., Chen, X., y Huang, Y. (2021).

- Facile fabrication of rgo/lig-based temperature sensor with high sensitivity. *Materials Letters*, 304:130637.
- Huang, L., Tang, Y., Zhang, P., Li, Y., Liu, G., Zhang, Z., Zhang, Y., y Yang R. (2025). Flexible planar dual-mode capacitive sensor based on interdigital electrodes with vertical conductive ridges for human-computer interaction. *Chemical Engineering Journal*, p. 165659.
- Ibarra-García, V. G., Sánchez-Mendoza, A. V., Mendoza-Anaya, D., Vázquez-García, R. A., Alemán-Ayala, K., Ramírez-Cardona, M., Castaño-Meneses, V. M., (2021). One step mechanosynthesis of graphene oxide directly from graphite. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures* 29(5), 352–364.
- Lin, J., Peng, Z., Liu, Y., Ruiz-Zepeda, F., Ye, R., Samuel, E. L., Yacaman, M. J., Yakobson, B. I., y Tour, J. M. (2014). Laser-induced porous graphene films from commercial polymers. *Nature communications*, 5(1):5714.
- Materón, E. M., de Azevedo, L. M. L., Dias, J. M., Pereira, K. C. R., Sousa, G. M., Dias, M. S., Maroneze, C. M., Dias, D., y Silva, C. d. C. C. (2025). Advancing biomedical analysis: Harnessing laser-induced graphene for next- gen of low-cost sensor technology. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis Open*, p. 100077.
- Moraila-Martínez, C. L., Rodríguez-Ortega, A., Rodríguez, N., Olguín-Iglesias, A., Vázquez-García, R. A., Reyes-Valderrama, M. I., Badillo-Hernández, J. A., Reséndiz-Trejo, Y., Rodríguez-Lugo, V., Alemán-Ayala, K., (2024). Biofabrication of silk fibers with enhanced conductivity through silkworm feeding with reduced graphene oxide: Implications for smart textile innovations. *ACS Applied Nano Materials* 7(6), 6229–6241.
- Muttaqin, Nakamura, T., Nishina, Y., y Sato, S. (2017). Chemical surface modification of graphene oxide by femtosecond laser pulse irradiation in aqueous suspensions. *Journal of Materials Science*, 52(2):749–759.
- Nankali, M., Soleimani, M., Enrique, P., y Peng, P. (2025). Direct laser synthesis, tuning, and patterning of metal nanoparticles-decorated graphene for flexible temperature sensors. *Materials Today Nano*, 30:100617.
- Thaloy, J., Jansengrat, P., Janratchakool, W., Nooyimsai, S., Krohkaew, J., Cris- napati, P. N., y Thwe, Y. (2023). Solar-powered iot charging system for esp32 in organic rice field. En *2023 18th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAI-NLP)*, pp. 1–6. IEEE.
- Wu, X., Shu, C., He, X., Wang, S., Fan, X., Yu, Z., Yan, D., y Huang, W. (2020). Optically transparent and thermal-stable polyimide films derived from a semi-aliphatic diamine: synthesis and properties. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 221(5):1900506.
- Zhao, Y., Zhao, M., Guo, S., Chen, K., Guo, Y., y Zhao, J. (2025). Screen-printed cuo/lig nanocomposite-enabled bifunctional planar micro-supercapacitors with self-sensing piezoresistive capability. *Surfaces and Interfaces*, p. 106798.
- Zhu, X., Guo, X., Liang, Y., Chai, G., Han, T., Li, Y., Shen, S., y Zhang B. (2025). Microstructure selection and control of flexible laser-induced graphene (lig) based on strain response. *Journal of Manufacturing Processes*, 152:44–56.