

Banco de ensayos de bajo costo para la caracterización de materiales piezorresistivos

Mena, L.K., González-Menocal, J.*, Sánchez, C., Muñoz, J., Monje, C.A.

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911, Leganés, España

Resumen

La caracterización electromecánica de materiales piezorresistivos resulta esencial para el desarrollo de sensores destinados a aplicaciones en robótica blanda, electrónica flexible y monitorización estructural. No obstante, los sistemas comerciales de ensayo suelen implicar elevados costes y no siempre están optimizados para muestras filamentosas de pequeño diámetro. En este trabajo se presenta el diseño y validación de un banco de ensayos compacto y de bajo coste para la caracterización de materiales piezorresistivos filamentosos. El sistema integra un mecanismo de desplazamiento lineal accionado por motor paso a paso, un sensor magnético de posición de alta resolución y un sistema de adquisición de resistencia eléctrica en configuración de cuatro hilos. La sincronización entre subsistemas permite registrar simultáneamente desplazamiento y variación de resistencia. La validación experimental, realizada mediante ensayos cíclicos sobre filamentos de nanotubos de carbono, demuestra una elevada repetibilidad y estabilidad, confirmando la idoneidad del sistema como plataforma experimental robusta para investigación en sensores flexibles.

Palabras clave: Instrumentación y sistemas de control, Sistemas de control embebidos y aplicaciones, Sistemas multisensor, Sensores y actuadores inteligentes, Sistemas de control de movimiento.

Low-Cost Test Bench for Piezoresistive Material Characterization

Abstract

The electromechanical characterization of piezoresistive materials is essential for the development of sensors used in soft robotics, flexible electronics, and structural monitoring applications. However, commercial testing systems often involve high costs and are not always optimized for small-diameter filamentary samples. This work presents the design and validation of a compact and low-cost test bench for the characterization of filamentary piezoresistive materials. The system integrates a stepper-motor-driven linear displacement mechanism, a high-resolution magnetic position sensor, and an electrical resistance acquisition setup based on a four-wire configuration. Synchronization between subsystems enables simultaneous recording of displacement and resistance variation. Experimental validation, carried out through cyclic tests on carbon nanotube filaments, demonstrates high repeatability and stability, confirming the suitability of the platform as a robust experimental tool for research in flexible sensing technologies.

Keywords: Instrumentation and control systems, Embedded computer control systems and applications, Multi-sensor systems, Smart sensors and actuators, Motion control systems.

1. Introducción

Los materiales piezorresistivos se caracterizan por experimentar una variación en su resistencia eléctrica cuando son sometidos a una deformación mecánica (Hollander et al. (1960)). Este cambio responde fundamentalmente a variaciones en la resistividad (ρ) o en la geometría del material según la ley de Ohm. En los semiconductores, el fenómeno ocurre por la alteración de las bandas electrónicas debido a tensiones en su estructura (Manzeli et al. (2015)), mientras que en materiales

compuestos la resistividad depende del grado de contacto o percolación entre sus refuerzos conductores (Li et al. (2018); Xu et al. (2019)). En metales, la variación es predominantemente geométrica, ligada al coeficiente de Poisson y al cambio en la sección transversal. La sensibilidad de los materiales piezorresistivos se mide mediante el Factor de Galga (*Gauge Factor*, GF), que relaciona el cambio relativo de resistencia con la tensión mecánica; un factor elevado permite detectar tensiones mecánicas mucho menores (Chung (2020); Yang and Lu

*Autor para correspondencia: jgmenoca@ing.uc3m.es

(2013)). Este acoplamiento electromecánico ha impulsado el desarrollo de sensores en aplicaciones como la monitorización estructural, la electrónica vestible, la robótica blanda, los dispositivos biomédicos y los textiles inteligentes. La posibilidad de integrar detección de deformación en sistemas ligeros, flexibles y de bajo consumo energético ha incrementado la necesidad de caracterizar con precisión el comportamiento eléctrico de estos materiales bajo sollicitaciones mecánicas controladas.

La caracterización de materiales engloba el conjunto de técnicas experimentales destinadas a evaluar sus propiedades y determinar su comportamiento bajo distintas condiciones. Este proceso comprende la preparación de la muestra, la realización de ensayos en equipamiento específico y el análisis de los resultados, garantizando su validez y reproducibilidad (Callister and Rethwisch (2000)).

En este sentido, la caracterización resulta especialmente relevante en materiales avanzados, cuya respuesta funcional depende de su estructura y de las condiciones de ensayo. Una evaluación adecuada permite determinar su desempeño y su potencial en aplicaciones específicas. Entre los materiales piezorresistivos emergentes, los filamentos basados en nanotubos de carbono (*Carbon Nanotube Fiber*, CNTF) han despertado un notable interés debido a su elevada conductividad, flexibilidad mecánica y sensibilidad a la deformación. Estos filamentos están compuestos por redes entrelazadas de nanotubos de carbono cuya respuesta eléctrica depende de la reorganización estructural inducida por la carga mecánica, afectando a la alineación de los nanotubos, a las resistencias de contacto y a los caminos de percolación conductiva (González et al. (2017)). Como consecuencia, pequeñas deformaciones pueden producir variaciones en la resistencia eléctrica, lo que permitiría usarlos para fabricar sensores de deformación de alta sensibilidad. No obstante, su comportamiento depende del método de fabricación, el grado de compactación o el trenzado del filamento, lo que hace imprescindible una caracterización electromecánica precisa para evaluar la posibilidad de su uso como sensor. La caracterización de filamentos piezorresistivos requiere la medición de la deformación mecánica y de la variación de resistencia eléctrica de manera simultánea y bajo condiciones de carga controladas. Las máquinas universales de ensayo disponibles comercialmente ofrecen sistemas de actuación mecánica de alta precisión y pueden combinarse con instrumentación eléctrica para este propósito. Sin embargo, estos equipos suelen estar orientados al ensayo de materiales volumétricos, presentan elevados costes de adquisición y mantenimiento, y requieren infraestructuras específicas de laboratorio. Además, su configuración no siempre resulta óptima para muestras filamentosas de pequeño diámetro que demandan sistemas de fijación compactos. En este contexto, surge la necesidad de plataformas de ensayo específicas, compactas y de bajo coste que estén adaptadas a la caracterización electromecánica de materiales filamentosos piezorresistivos.

En este trabajo se presenta un banco de ensayos compacto y de bajo coste para la caracterización precisa de filamentos piezorresistivos. El sistema desarrollado integra un mecanismo de desplazamiento lineal controlado, un sensor magnético de posición de alta resolución y un sistema de adquisición sincronizada de la resistencia eléctrica en una única plataforma experimental. Esta integración permite obtener mediciones simultáneas de

deformación y resistencia con la resolución necesaria para la determinación fiable del factor de galga. El funcionamiento del banco se valida mediante ensayos cíclicos de elongación realizados sobre probetas de CNTF trenzadas, demostrando su capacidad para registrar de manera consistente la respuesta electromecánica acoplada de materiales piezorresistivos.

El artículo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe el diseño y la implementación del banco de ensayos; la Sección 3 presenta los resultados experimentales, la validación del sistema y sus aplicaciones; y en la Sección 4 se exponen las conclusiones y líneas futuras.

2. Materiales y métodos

El banco de ensayos desarrollado permite aplicar deformaciones lineales controladas a muestras piezorresistivas y registrar simultáneamente el desplazamiento aplicado y la variación de resistencia eléctrica. El sistema completo integra tres subsistemas principales: sistema mecánico de desplazamiento lineal, sistema de control y adquisición eléctrica y sistema de medición de posición lineal.

2.1. Sistema mecánico de desplazamiento

La aplicación de deformación se realiza mediante un motor paso a paso Nema 17HS4401 acoplado a un husillo de bolas mediante un acoplamiento flexible, garantizando la correcta alineación entre ejes y evitando esfuerzos indeseados. El motor Nema 17HS4401 presenta un ángulo de paso de 1.8° , una corriente nominal de 1.7 A, una resistencia de fase de 1.5Ω y un par máximo de 40 N-cm. Una vuelta del motor produce un desplazamiento lineal de 2 mm, lo que permite un control preciso del movimiento.

Con el fin de mejorar la robustez y precisión del sistema inicial, se implementó una segunda versión del banco basada en un robot de un eje KK5002P300A1F0 del fabricante HIWIN (Figura 1). Este sistema proporciona una precisión nominal de 0,02 mm y una repetibilidad de $\pm 0,003$ mm, adecuadas para la caracterización de materiales piezorresistivos.

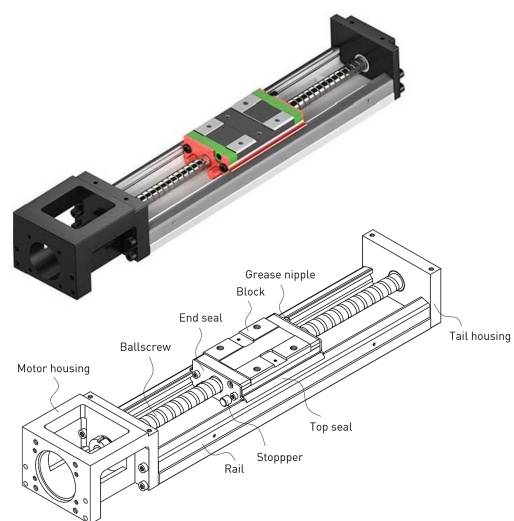


Figura 1: Robot de un eje KK5002P300A1F0 del fabricante HIWIN.

Las especificaciones principales del sistema se recogen en la Tabla 1. Para adaptar el motor Nema 17 al sistema HIWIN fue necesario incorporar los elementos mecánicos adicionales mostrados en la Figura 2, incluyendo el elevador de bancada, la interfaz bancada–motor y el acoplamiento motor–husillo. El montaje final del sistema mecánico se muestra en la Figura 3.

Tabla 1: Información técnica del robot de un eje KK5002P300A1F0 de HIWIN.

Precisión	0.020	mm
Repetibilidad	± 0.003	mm
Paralelismo de la guía	0.01	mm
Velocidad máxima sin motor	270	mm/s
Longitud del perfil del raíl	300	mm

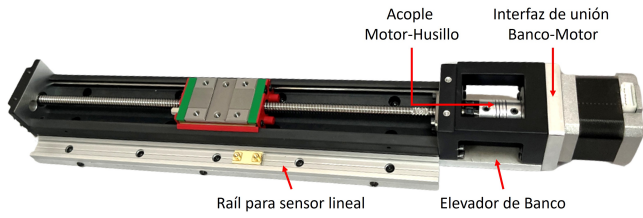


Figura 2: Banco de ensayos mejorado. Componentes mecánicos adicionales.

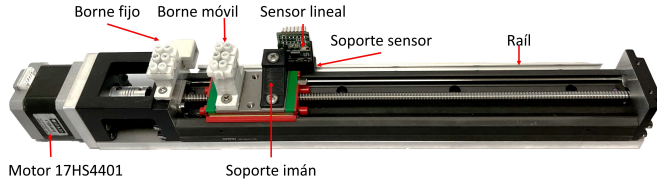


Figura 3: Banco de ensayos mejorado con todos los componentes ensamblados.

2.2. Sistema de control del movimiento

El motor paso a paso es gestionado mediante un driver A4988 controlado por una placa Arduino Mega. Se emplea una resolución de 1/16 de paso, obteniendo 3200 pasos por vuelta completa. La corriente del driver se calibró según la Ecuación 1.

$$I_{MAX} = \frac{V_{REF}}{8R_s} \quad (1)$$

A partir de la corriente nominal del motor (1,7 A) y una resistencia del driver $R_s = 0,1 \Omega$, se obtuvo un valor teórico $V_{REF} = 1,36 V$, ajustándose al 70 % para un funcionamiento estable, resultando $V_{REF} = 0,952 V$.

El diagrama de conexión del sistema electrónico se muestra en la Figura 4.

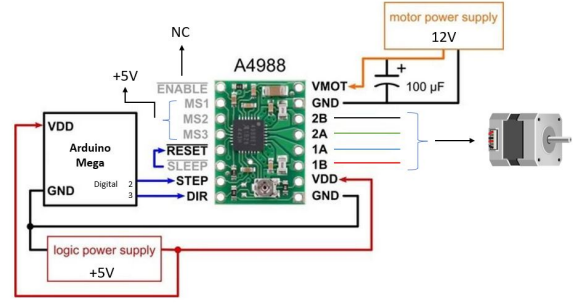


Figura 4: Diagrama de conexión del driver A4988 empleado en el banco de ensayos, incluyendo el motor paso a paso y la placa de desarrollo Arduino Mega.

2.3. Sistema de medición de posición lineal

El desplazamiento lineal se registra mediante un sensor magnético AS5311, integrado en el banco de ensayos (Figura 5). Este sensor proporciona información absoluta de posición con una resolución de 488 nm dentro de cada par de polos magnéticos (2 mm).

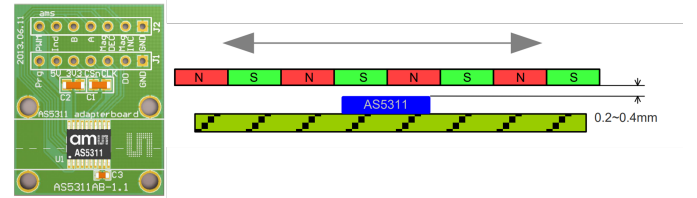


Figura 5: Sensor lineal AS5311 y detalle de la polarización del imán para la lectura de posición.

Para permitir mediciones continuas superiores a 2 mm se implementó un algoritmo de detección de cruce por cero basado en la variación de la lectura digital entre muestras consecutivas:

$$diff = posActual - posPrevious \quad (2)$$

Cuando $diff < -2000$ o $diff > 2000$ se actualiza el contador de ciclos magnéticos (Algoritmo 1), permitiendo acumular desplazamiento total.

Algoritmo 1 Condiciones para determinar el cruce por cero del sensor lineal en ambos sentidos

```

1: if posPrevious ≠ posActual then
2:   if diff < -2000 then
3:     count ← count + 1
4:   end if
5:   if diff > 2000 then
6:     count ← count - 1
7:   end if
8: end if

```

2.4. Sistema de adquisición eléctrica

La variación de resistencia eléctrica de las muestras se mide mediante un multímetro HP 34401A en configuración de cuatro hilos, reduciendo el efecto de la resistencia de los cables. La comunicación entre el multímetro y el ordenador se realiza mediante interfaz RS-232 y protocolo SCPI, controlado desde Matlab. Esta configuración permite la adquisición sincronizada de resistencia y desplazamiento durante los ensayos.

2.5. Procedimiento experimental

El sistema de desplazamiento lineal del banco de ensayos permite aplicar elongaciones controladas, precisas y repetitivas sobre las muestras. Por tanto, la deformación de la muestra se determina a partir del desplazamiento impuesto y la longitud inicial. Junto con la adquisición de datos de resistencia eléctrica, en cada ensayo se registran simultáneamente la elongación y la variación relativa de la resistencia (R/R_0), garantizando la correcta sincronización entre las señales mecánica y eléctrica. Con la combinación de ambas lecturas es posible determinar el factor de galga (GF) de las muestras, siguiendo la ecuación 3.

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta L/L_0} \quad (3)$$

El procedimiento experimental inicia con el montaje de las muestras de material piezorresistivo sobre el banco de ensayos a través de los bornes fijo y móvil que sirven de sujeción mecánica y conector eléctrico. Una vez colocada la muestra, se inicia la prueba con desplazamientos de elongación y relajación mediante desplazamientos programados. Durante cada ensayo se registran de forma sincronizada el desplazamiento aplicado y la variación de resistencia eléctrica.

La Figura 6 muestra el esquema general de comunicación entre el banco de ensayos y el ordenador. En él se distinguen tres procesos que se conectan directamente al equipo, tanto para el envío de señales de control como para la adquisición y el registro de datos.

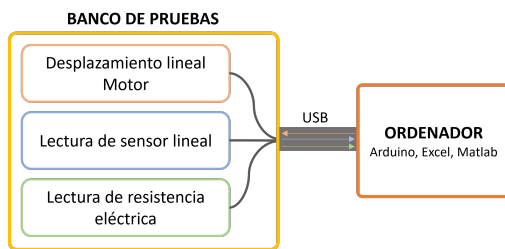


Figura 6: Diagrama de funcionamiento y comunicación del banco de ensayos.

El sistema completo ensamblado se presenta en la Figura 7, que consta de: *i*) banco de ensayos de desplazamiento lineal, *ii*) caja de mandos desde la cual se controla la posición inicial de forma manual y el arranque de las pruebas, *iii*) equipo de medición HP34401A, *iv*) fuente de alimentación y *v*) ordenador para el registro de datos.

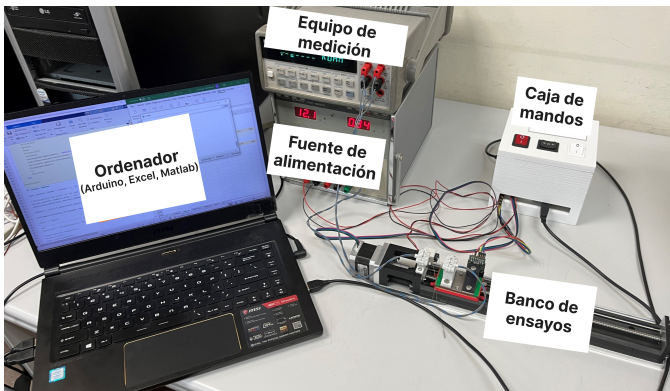


Figura 7: Banco de ensayos. Sistema completo ensamblado.

3. Resultados

3.1. Validación del sistema de medida

El banco de ensayos desarrollado en este trabajo tiene como objetivo la caracterización de materiales piezorresistivos. Los resultados que se presentan en esta sección permiten validar el funcionamiento del sistema de medida y de adquisición de datos, más que evaluar de forma concluyente las propiedades intrínsecas del material ensayado. El material empleado en esta fase de validación es la fibra de nanotubos de carbono, utilizado como caso de estudio para verificar la coherencia y estabilidad del sistema.

Con el objetivo de validar el funcionamiento integral del banco de ensayos desarrollado, se realizaron pruebas considerando dos muestras con longitudes iniciales de 30,45 mm y 80,7mm y seis niveles máximos de elongación correspondientes a 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %, 2,5 % y 3 %, sometidas a cinco ciclos de deformación. Esta configuración permitió evaluar simultáneamente la estabilidad del sistema de actuación mecánica y la sincronización de la adquisición eléctrica. Las configuraciones de cada una de las pruebas están recogidas en la Tabla 2.

Tabla 2: Pruebas experimentales de caracterización de muestras de CNTF

Prueba	Longitud de muestra	Elongación
1	30,45 mm	0,5 %
2	30,45 mm	1,0 %
3	30,45 mm	1,5 %
4	30,45 mm	2,0 %
5	30,45 mm	2,5 %
6	30,45 mm	3,0 %
7	80,7 mm	0,5 %
8	80,7 mm	1,0 %
9	80,7 mm	1,5 %
10	80,7 mm	2,0 %
11	80,7 mm	2,5 %
12	80,7 mm	3,0 %

Los resultados experimentales obtenidos con el banco de ensayos para la longitud inicial de 30,45 mm se muestran en la Figura 8, mientras que para la longitud inicial de 80,7 mm se presentan en la Figura 9, donde se aprecia la evolución temporal del desplazamiento lineal registrado mediante el sensor magnético AS5311 (eje izquierdo) y la variación de resistencia eléctrica medida con el multímetro HP 34401A (eje derecho). Se observa una correlación directa entre el desplazamiento impuesto y la respuesta eléctrica del material, evidenciando la correcta coordinación entre el subsistema de control de movimiento y el sistema de adquisición.

Los ciclos presentan una elevada repetibilidad tanto en los valores máximos como en los mínimos alcanzados, lo que confirma la estabilidad del posicionamiento y la consistencia de la medición a lo largo del tiempo. Asimismo, no se aprecian desviaciones acumulativas entre ciclos consecutivos, lo que indica un comportamiento mecánico estable del sistema de actuación.

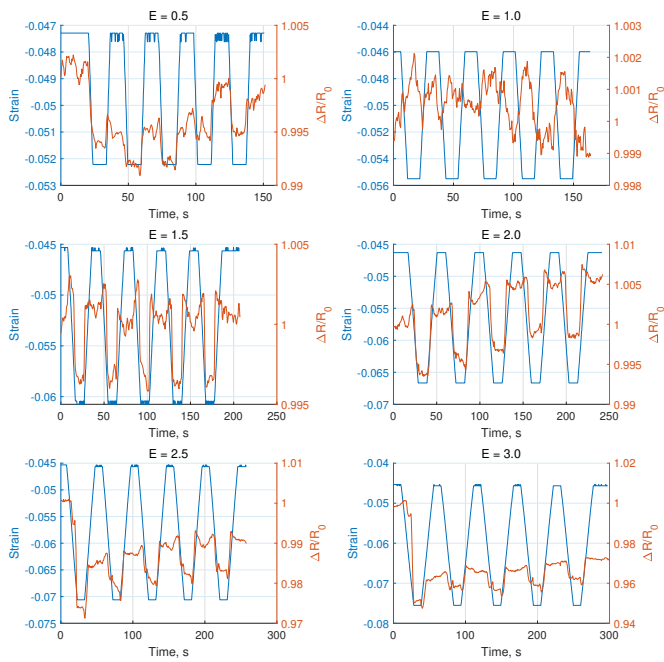


Figura 8: Resultados experimentales del banco de ensayos de las pruebas 1 - 6. El eje izquierdo corresponde a los datos del sensor de posición (línea azul) y el eje derecho a la resistencia eléctrica (línea roja).

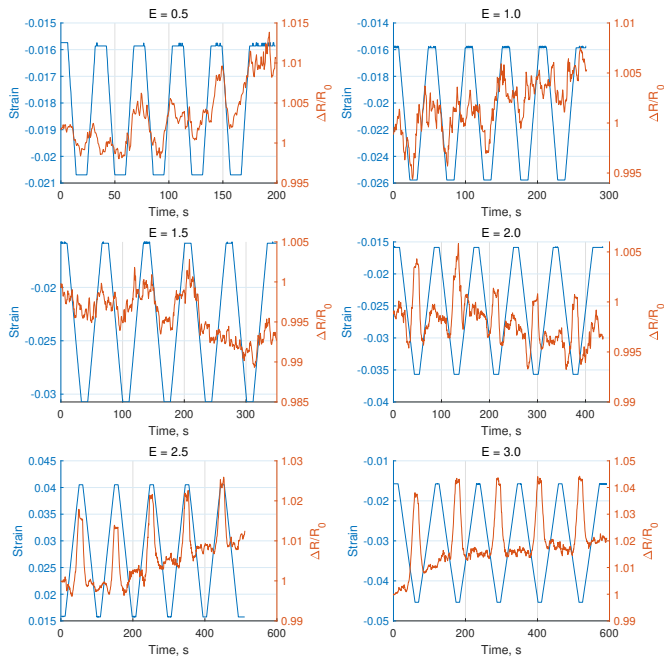


Figura 9: Resultados experimentales del banco de ensayos de las pruebas 7 - 12. El eje izquierdo corresponde a los datos del sensor de posición (línea azul) y el eje derecho a la resistencia eléctrica (línea roja).

3.2. Evaluación del rendimiento del banco de ensayos

El análisis de las pruebas realizadas permite evaluar el rendimiento instrumental del sistema desarrollado. La incorporación del sensor lineal AS5311, con resolución submicrométrica, posibilita el registro preciso del desplazamiento acumulado, garantizando una medida fiable incluso en deformaciones pequeñas.

En el subsistema eléctrico, la utilización del multímetro HP 34401A en configuración de cuatro hilos reduce significativamente la influencia de las resistencias de contacto y del cableado, mejorando la estabilidad y precisión de la medición respecto a configuraciones preliminares basadas en entradas analógicas integradas en microcontroladores. Esta mejora se traduce en una reducción del ruido y en una mayor repetibilidad de las curvas registradas. Con la intención de evaluar la repetitividad y la posibilidad del cálculo del factor de galga en muestras piezorresistivas, se realizó una prueba de 25 ciclos para una muestra de CNTF de 52,35 mm de longitud inicial y una elongación de 0,5 mm correspondiente al 1% de deformación.

La Figura 10 (arriba) presenta la respuesta temporal del sistema durante 25 ciclos consecutivos de carga–descarga, mostrando la deformación impuesta y la correspondiente variación relativa de la resistencia eléctrica. Se observa una respuesta eléctrica coherente y sincronizada con la excitación mecánica, sin pérdidas apreciables de señal ni inestabilidades significativas a lo largo del ensayo.

En la Figura 10 (abajo) se muestra la evolución del factor de galga calculado ciclo a ciclo. El valor medio obtenido es $GF = 0,509$ con una desviación estándar $\sigma = 0,098$, lo que indica una dispersión moderada entre ciclos. Asimismo, el coeficiente de determinación medio asociado a los ajustes lineales es $R = 0,370$, reflejando que, aunque la tendencia global es aproximadamente lineal, existen variaciones ciclo a ciclo atribuibles tanto al comportamiento del material como a pequeñas fluctuaciones del sistema de medida. En conjunto, estos resultados evidencian una respuesta reproducible y suficientemente estable para la validación del banco de ensayos.

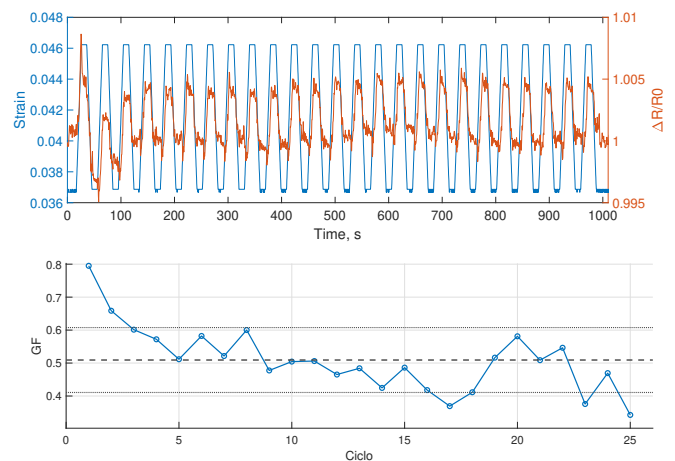


Figura 10: Arriba: evolución temporal de la deformación aplicada (strain) y de la variación relativa de la resistencia eléctrica ($\Delta R/R_0$) durante 25 ciclos de carga–descarga. Abajo: factor de galga (GF) estimado ciclo a ciclo, incluyendo el valor medio (línea discontinua) y el intervalo correspondiente a \pm una desviación estándar (líneas punteadas), como indicador de repetitividad del sistema.

3.3. Aplicación del banco en la caracterización de sensores flexibles

Además de la validación realizada con filamentos CNTF, el banco de ensayos desarrollado ha sido empleado como plataforma experimental en distintos trabajos de investigación orientados a la caracterización de sensores piezorresistivos.

En un primer caso, el sistema fue utilizado para evaluar un

sensor flexible impreso en 3D basado en una matriz de poliuretano termoplástico (TPU) aditivado con partículas de base carbono (Sánchez et al. (2024)). El banco permitió realizar ensayos estáticos y dinámicos bajo deformaciones controladas, registrando simultáneamente el desplazamiento aplicado y la variación de resistencia eléctrica mediante instrumentación de precisión. Esto posibilitó el análisis de la linealidad en pequeños rangos de deformación, la determinación del factor de galga y el estudio de fenómenos de histéresis y repetibilidad del material.

Asimismo, el banco fue empleado en la caracterización de sensores textiles basados en hilos de poliamida recubiertos de plata, incluyendo el análisis de distintos recubrimientos superficiales destinados a mejorar la sensibilidad y reducir el ruido (Ballester et al. (2024)). En este caso, el sistema permitió aplicar señales sinusoidales, triangulares y combinadas de deformación, generando conjuntos de datos experimentales robustos que posteriormente fueron utilizados para el modelado del comportamiento no lineal mediante técnicas de aprendizaje automático. De este modo, el banco no solo facilitó la caracterización física del sensor, sino que proporcionó la base experimental necesaria para su identificación y modelado avanzado.

4. Conclusión

En este trabajo se ha presentado el diseño y validación de un banco de ensayos compacto y de bajo coste orientado a la caracterización electromecánica de materiales piezorresistivos filamentosos. El sistema integra un mecanismo de desplazamiento lineal accionado mediante motor paso a paso, un sensor magnético de posición de resolución submicrométrica y un sistema de adquisición de resistencia eléctrica en configuración de cuatro hilos, permitiendo la medida sincronizada de deformación y variación resistiva.

La validación experimental mediante ensayos cíclicos sobre filamentos de nanotubos de carbono ha demostrado una elevada repetibilidad, estabilidad en el posicionamiento y coherencia en la respuesta eléctrica registrada. Asimismo, la utilización del sensor AS5311 y del multímetro HP 34401A mejora significativamente la precisión frente a configuraciones preliminares basadas en adquisición analógica integrada.

Además, el empleo del banco como plataforma experimental en trabajos recientes de caracterización de sensores impresos en TPU y sensores textiles conductivos confirma su versatilidad y su utilidad como herramienta de apoyo a investigaciones en sensores flexibles y sistemas inteligentes.

Agradecimientos

Estos resultados de investigación se enmarcan dentro de los proyectos: Proyecto ADAPTA, con referencia PLEC2023-010218, financiado por MICIU-AEI-10.13039-501100011033. Proyecto SIROCO, con referencia PID2023-147343OB-I00, financiado por MICIU-AEI-10.13039/501100011033 y por FEDER, UE. Proyecto AdaptiveFold del programa de Ayudas para la Actividad Investigadora de los Jóvenes Doctores del Programa Propio de Investigación de la UC3M, con referencia 2025/00832/001, concedido por la Universidad Carlos III de Madrid. Proyecto del programa de Ayudas para la Actividad Investigadora de los Jóvenes Doctores del Programa Propio de Investigación de la UC3M, con referencia 2025/00764/001, concedido por la Universidad Carlos III de Madrid. ”

Referencias

- Ballester, C., Muñoz, V., Copaci, D., Moreno, L., Blanco, D., 2024. Design of a soft sensor based on silver-coated polyamide threads and stress-strain modeling via gaussian processes. *Sensors and Actuators A: Physical* 367, 115058.
- Callister, W. D., Rethwisch, D. G., 2000. *Fundamentals of materials science and engineering*. Vol. 471660817. Wiley London.
- Chung, D., 2020. A critical review of piezoresistivity and its application in electrical-resistance-based strain sensing. *Journal of Materials Science* 55 (32), 15367–15396.
- González, C., Vilatela, J., Molina-Aldareguía, J., Lopes, C., Llorca, J., 2017. Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends. *Progress in Materials Science* 89, 194–251.
- Hollander, L. E., Vick, G. L., Diesel, T., 1960. The piezoresistive effect and its applications. *Review of Scientific Instruments* 31 (3), 323–327.
- Li, M., Zuo, T., Wang, S., Gu, Y., Gao, L., Li, Y., Zhang, Z., 2018. Piezoresistivity of resin-impregnated carbon nanotube film at high temperatures. *Nanotechnology* 29 (36), 365702.
- Manzeli, S., Allain, A., Ghadimi, A., Kis, A., 2015. Piezoresistivity and strain-induced band gap tuning in atomically thin mos₂. *Nano letters* 15 (8), 5330–5335.
- Sánchez, C., Rodríguez del Rosario, D., Mena, L., Monje, C. A., Otero, S., 2024. Evaluación de un sensor de deformación basado en una matriz polimérica de poliuretano termoplástico (TPU) aditivado con partículas de base carbono. In: *Actas del Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador*. pp. 91–96.
- Xu, S., Hu, H., Ji, L., Wang, P., 2019. Piezoresistive properties of multi-walled carbon nanotube/silicone rubber composites under cyclic loads with ac excitation. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1168. IOP Publishing, p. 022075.
- Yang, S., Lu, N., 2013. Gauge factor and stretchability of silicon-on-polymer strain gauges. *Sensors* 13 (7), 8577–8594.