

Sensor resistivo flexible desarrollado con tecnologías de electrónica impresa

Fabrizio Pascual
Horacio Berardi
Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional de San
Martín (UNSAM)
Buenos Aires, Argentina
fberardi@estudiantes.unsam.edu.ar

Damian Ricalde
Dto. Prototipado
Microelectrónico y Electrónica
Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
dricalde@inti.gob.ar

Julián Marinoni
Dto. Prototipado
Microelectrónico y Electrónica
Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
marinoni@inti.gob.ar

Mariano Roberti
Dto. Prototipado
Microelectrónico y Electrónica
Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
froberti@inti.gob.ar

Theo Rodríguez Campos
Dto. Prototipado
Microelectrónico y Electrónica
Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
trodriguez@inti.gob.ar

Alex Lozano
DT. de Micro y Nanotecnologías
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
alozano@inti.gob.ar

Mijal Mass
Dto. Prototipado
Microelectrónico y Electrónica
Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
*mmass@inti.gob.ar

Liliana Fraigi
Escuela de Ciencia y Tecnología
UNSAM
Dto de Electrónica
Universidad Nacional
Tecnológica – UTN-FRBA
Buenos Aires, Argentina
lili@frba.utn.edu.ar

Resumen — Los sensores resistivos flexibles tienen una amplia gama de aplicaciones, desde la monitorización de movimientos articulares del cuerpo humano hasta la medición de parámetros mecánicos industriales. En este trabajo se describe el análisis, diseño, fabricación y caracterización de un sensor resistivo, de bajo costo, impreso por un proceso de serigrafía sobre un sustrato flexible. El diseño propuesto permite variar el valor de la resistencia final modificando sólo una máscara de las tres que involucra su proceso de fabricación. Se obtuvo un sensor flexible de precisión, con una dispersión menor al 0,3%, que permite detectar al menos, cuatro radios de curvatura diferentes (90, 65, 50 y 35 mm) además del valor de reposo (R_0) y capaz de realizar más de mil flexiones manteniendo su correcto funcionamiento. Estos sensores se desarrollaron en la planta piloto de Electrónica Impresa del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

Palabras clave— *electrónica impresa, sensor flexible, sensor resistivo, impresión funcional, fabricación aditiva.*

I. INTRODUCCION

El constante avance de la tecnología y la creciente automatización en el sector industrial presentan oportunidades y desafíos en el ámbito del desarrollo de dispositivos electrónicos flexibles. En particular, los sensores flexibles, han adquirido un papel protagónico en diversas aplicaciones gracias a sus atributos de flexibilidad, elasticidad y estabilidad. Su alcance es esencial tanto en la detección de movimiento humano [1,2], en la monitorización y diagnósticos clínicos [3,4], en la creación de piel electrónica adaptable (*e-skin*) [5], como en la implementación de pantallas táctiles flexibles [6], y hasta en la integración en robots industriales [7].

Dentro de la categoría de sensores flexibles, se destacan los sensores resistivos, por su capacidad de medir cambios en la resistencia eléctrica en respuesta a deformaciones mecánicas. Esta propiedad los hace ideales para aplicaciones que requieren una alta sensibilidad y precisión, convirtiéndolos en componentes esenciales en sistemas de monitoreo y control [8]. Así mismo, la Electrónica Impresa (EI) se presenta como una tecnología emergente que puede

suplir las necesidades de estos sensores resistivos flexibles, siendo livianos, adaptables, de bajo costo de fabricación y accesibles.

En el presente trabajo se realizó el análisis, diseño, fabricación y caracterización de sensores resistivos impresos flexibles (SRIF) para ser utilizados en la medición de movimientos articulares, mediante guantes de rehabilitación, brazos robóticos o exoesqueletos y dispositivos de interacción/interfaces dirigidos por gestos humanos.

II. EXPERIMENTAL

A. Diseño

Con el objetivo de evaluar el cambio de la resistencia de los SRIF en función de la deformación, se diseñó un sensor que cuenta con 14 resistores en serie de 5mm x 5mm, ($L_c \times W$) conectados mediante conductores de 1mm (L_{Ag}) x 5mm (W), como indica la “Fig. 1”. Esta configuración permite ajustar el valor de la resistencia total, sólo modificando el largo L_{Ag} de la capa conductora “Metal 2”. Es decir, el valor de la resistencia final es inversamente proporcional a L_{Ag} .

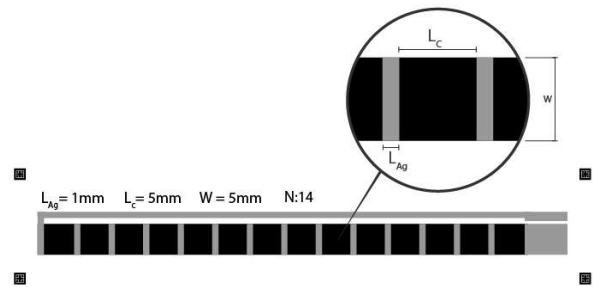


Fig. 1. Diseño del sensor resistivo flexible impreso con el detalle de las dimensiones de L_{Ag} , L_c y W .

En la “Fig. 2” se observan las 3 capas que configuran al sensor. La “Fig. 2a” muestra el diseño de la máscara de la

primera capa conductora (Metal 1); la “Fig. 2b” la capa resistiva y la “Fig. 2c” la última capa conductora (Metal 2) que se imprime sobre la capa resistiva. Mediante esta secuencia de fabricación, se puede obtener una familia de SRIF con diferentes valores de la resistencia final modificando sólo el L_{Ag} .

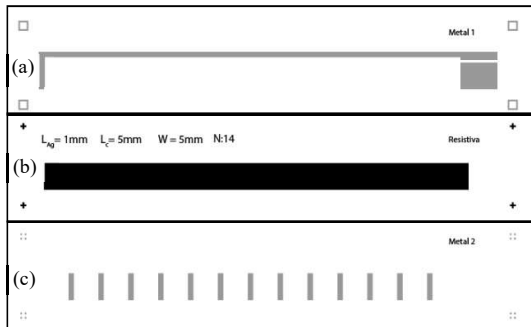


Fig. 2. Diseño de las máscaras del sensor resistivo flexible impreso; (a) Metal 1; (b) Resistiva; (c) Metal 2.

Las diferentes capas de los sensores fueron generadas mediante un programa de diseño CAD (Inkscape). Las máscaras se fabricaron sobre un sustrato Mylar® con una resolución de 3600 dpi.

B. Materiales y proceso de impresión

Se seleccionó la impresión serigráfica como proceso de fabricación de los SRIF. Se utilizó una impresora serigráfica semiautomática (EKRA modelo *Microtronic II*) ajustando los parámetros de impresión (presión, velocidad, *snap off*, material de espátulas) para lograr la fidelidad dimensional del diseño y espesor característico del proceso serigráfico.

Para la fabricación de los sensores se utilizaron las tintas conductoras de plata (Ag) (C2080415P2, Gwent y SCAG-003, Mateprincs) y una tinta resistiva de carbón (C) (C2030519P4, Gwent). Teniendo en cuenta las especificaciones de sus hojas de datos, se seleccionaron las mallas con la cantidad de hilos por pulgadas (*mesh*) adecuadas para cada tinta. La transferencia de los diseños a dichas mallas se realizó mediante un proceso fotolitográfico sobre una película fotosensible de 50 μ m (Ulano®).

Las impresiones se realizaron sobre sustratos de tereftalato de polietileno (PET) de 100 μ m de espesor. El curado de las tintas se realizó en un horno de secado Thermal TH400DH y, para no alterar las condiciones de los sustratos, se variaron las condiciones de curado especificadas por los fabricantes, prolongando los tiempos y reduciendo la temperatura (TABLA I).

TABLA I - TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE CURADO PARA LAS TINTAS UTILIZADAS EN LA FABRICACIÓN DE LOS SENSORES

Tinta	Curado
Conductora (Plata) (Gwent-C2080415P2)	45' @ 100°C
Conductora (Plata) (Mateprincs-SCAG-003)	60' @ 80°C
Resistiva (Carbón) (Gwent-C2030519P4)	30' @ 60°C

Por último, los SRIF se laminaron con el adhesivo bifaz 467MP de 3M, a través de un probador flexográfico QD™ Flexo, con una fuerza de 1,26 kgf/cm² sobre un PET (Mylar® cristal, Decom) de 250 μ m de espesor para darle mayor rigidez y estabilidad al sensor. El largo total fue de 110mm.

III. CARACTERIZACIÓN

Una vez fabricados los sensores se llevó a cabo la caracterización dimensional y eléctrica.

A. Caracterización dimensional

Se midieron y compararon las dimensiones en los ejes X e Y de los diseños de las máscaras, de su transferencia a las mallas y de las impresiones, mediante la cámara fiducial de la impresora inkjet Dimatix modelo DMP-2850, con resolución micrométrica. En lo que respecta a la caracterización de los espesores, se utilizó un perfilómetro por interferometría (Zeiss modelo 5104802).

B. Caracterización eléctrica

Se utilizó un SMU (Unidad de Fuente y Medida) Keithley 2602B, en conexión a 2 hilos debido a que el valor de la resistencia de los sensores es superior a 1K Ω .

La caracterización eléctrica por deformación mecánica es fundamental para comprender cómo responden estos sensores ante fuerzas de deformación controladas.

Para la caracterización mecánica dinámica, se desarrolló un sistema automatizado con un motor paso a paso (Nema 17) y mordazas de caras planas paralelas. Mediante éste se llevaron a cabo ensayos cíclicos de los SRIF, permitiendo un control preciso (6,78 μ m por paso) y repetible de las condiciones de ensayo. Además, se logró evitar de esta manera la manipulación de las muestras en cada conexión y desconexión “Fig. 3”.

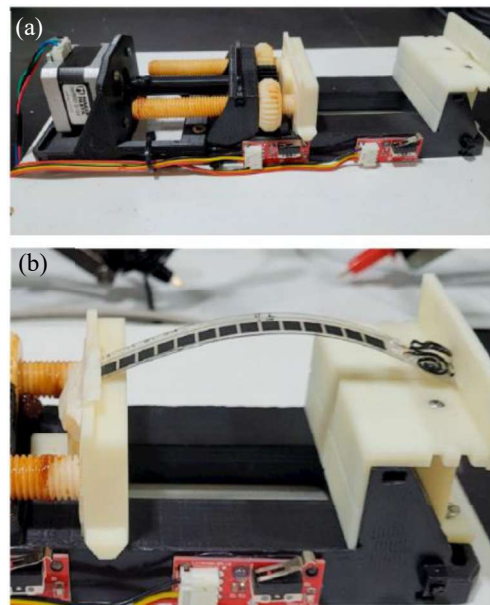


Fig. 3. Sistema de caracterización automatizado. (a) Banco de ensayo mecánico. (b) Caracterización dinámica de un sensor resistivo impreso flexible fabricado por serigrafía con tintas de Ag y C.

Se establecieron cuatro radios de curvatura de: 90 (R90), 65 (R65), 50 (R50) y 35mm (R35), además del valor de reposo

(R_{∞}) y se llevaron a cabo las mediciones como se muestra en la “Fig. 4”.

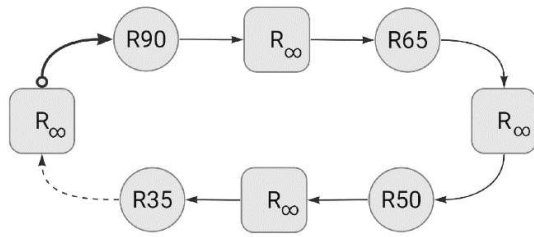


Fig. 4. Diagrama de un ciclo completo de mediciones. Se repitieron 300 ciclos por cada SRIF.

Cabe mencionar que, entre una medición y otra, el sensor permanecía en reposo durante 5 segundos, mientras que entre cada ciclo, el tiempo de reposo fue de 90 segundos. Se ensayaron 3 SRIF con el mismo diseño y proceso de fabricación, repitiendo cada ciclo un total de 300 veces con el objetivo de obtener la desviación de los valores de resistencia para cada uno de los puntos de medición.

Por último, se estudió la estabilidad de la resistencia de los sensores sin deformación en función de las variaciones de temperatura. Las muestras, fueron expuestas a diferentes temperaturas desde 25°C hasta 65°C con incrementos de 5°C, dejando estabilizar los valores en cada medición.

IV. RESULTADOS

De las caracterizaciones dimensionales y eléctricas se obtuvieron los siguientes resultados.

A. Caracterización dimensional

Se pudo observar que las dimensiones en los ejes X e Y de los sensores se redujeron aproximadamente 30µm. Este valor representa menos del 1%, considerándose despreciable para el funcionamiento de estos dispositivos. A su vez, dicho valor se encuentra dentro de los márgenes de error de la tecnología empleada.

Los resultados de las mediciones de espesor se muestran en la TABLA II:

TABLA II - ESPESORES DE LAS TINTAS EN LOS SENSORES IMPRESOS.

Tinta	Espesores promedio [µm]
Conductora (Plata) (Gwent-C2080415P2)	24
Conductora (Plata) (Mateprincs-SCAG-003)	29
Resistiva (Carbón) (Gwent-C2030519P4)	27

B. Caracterización eléctrica

En la “Fig. 5” se muestran los valores promedio, máximo y mínimo de las variaciones de resistencia de los sensores en función de los radios de curvatura establecidos.

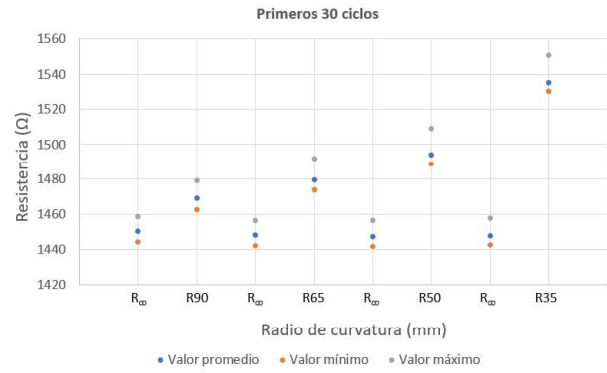


Fig. 5. Valores de resistencias en los primeros 30 ciclos (“Fig. 4”).

Durante los primeros 30 ciclos se observan los valores promedio de resistencia para cada radio de curvatura (marca azul), los cuales permiten distinguir una variación en la resistencia de los SRIF. Sin embargo, debido a la alta dispersión de las mediciones, los valores máximos (marca gris) obtenidos son muy próximos a los valores mínimos (marca naranja) del radio de curvatura inmediato superior. Esto impide diferenciar qué deformación se encuentra el sensor.

Luego de realizar 300 ciclos por cada sensor, se observó una disminución significativa en la dispersión de las mediciones para cada radio de curvatura, obteniéndose cinco puntos bien diferenciados, como se puede observar en la “Fig. 6”.

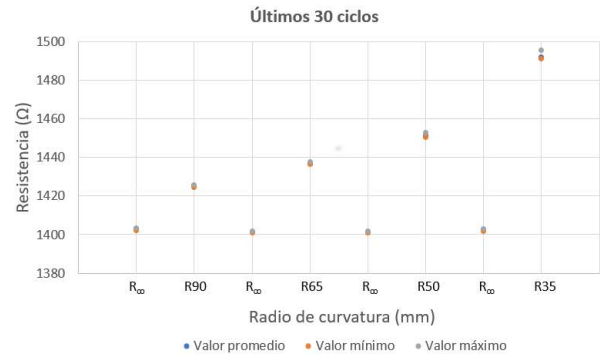


Fig. 6. Valores de resistencias en los últimos 30 ciclos.

Comparando los resultados de las primeras mediciones con estas últimas (“Fig. 5” y “Fig. 6”), los valores de las resistencias y sus dispersiones tienden a disminuir, alcanzando valores de dispersión en el rango de 0,28% a 0,06%.

En cuanto a la caracterización térmica, los valores de resistencia no se vieron afectados de manera significativa con el aumento de la temperatura.

V. CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar sensores resistivos impresos flexibles (SRIFs), mediante un proceso serigráfico, siendo una opción con costos accesibles y factible para su producción local/regional.

- Se logró un diseño que permite variar fácilmente el valor de la resistencia final, modificando sólo una máscara en el proceso de fabricación del dispositivo.
- Se fabricó y caracterizó sensores resistivos impresos flexibles, capaces de discriminar variaciones de resistencia de manera precisa, para radios de curvatura de 90, 65, 50 y 35mm y su posición de reposo (R_0).
- Se observó que los sensores fabricados en este trabajo mejoraban su precisión al aumentar los ciclos de flexión, alcanzando una dispersión menor al 0,3% a los 300 ciclos.
- Los sensores fueron sometidos a más de mil flexiones manteniendo su correcto funcionamiento, lo que indica que su ciclo de vida es alto.
- De los resultados obtenidos en las caracterizaciones térmicas se desprende que, la resistencia de los sensores no sufre cambios significativos con la variación de la temperatura en el rango ensayado de 25°C a 65°C.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de los alumnos de la Cátedra de Tecnología Electrónica, curso 2023, de la Carrera de Ingeniería Electrónica de la UTN-FRBA.

REFERENCIAS

- [1] Cheng-Yi Huang et al. "Flexible Pressure Sensor with an Excellent Linear Response in a Broad Detection Range for Human Motion Monitoring"; ACS Applied Materials & Interfaces; Enero 2023.
- [2] Lingyan Duana, Dagmar D'hooge y Ludwig Cardon; "Recent progress on flexible and stretchable piezoresistive strain sensors: From design to application"; Progress in Materials Science; Octubre 2023.
- [3] Junchen Yan, Anping Chen y Shuyun Liu; "Flexible sensing platform based on polymer materials for health and exercise monitoring"; Alexandria Engineering Journal ; Septiembre 2023.
- [4] Nan Wen et al. "Emerging flexible sensors based on nanomaterials: recent status and applications"; Journal of Materials Chemistry A; Noviembre 2020.
- [5] Pu Nie, et al. "High-Performance Piezoresistive Electronic Skin with Bionic Hierarchical Microstructure and Microcracks"; ACS Applied Materials & Interfaces; Abril 2017.
- [6] C. Ouyang, D. Liu, K. He y J. Kang; "Recent Advances in Touch Sensors for Flexible Displays"; IEEE Open Journal of Nanotechnology, vol. 4, pp. 36-46; Noviembre 2022.
- [7] Jiyong Min, Jisung Pack, Heon Park y Youngsu Cha; "Classification of Floor Materials Using Piezoelectric Actuator-Sensor Pair and Deep Learning for Mobile Robots"; IEEE Access. PP.1-1.10.1109/ACCESS.2024.3367435; Enero (2024).
- [8] Ziyi Feng, Ziyang Liu, Tianying Shao y Yifei Zhang; "Application of nanomaterials in flexible sensors"; Proceedings of the 2023 International Conference on Functional Materials and Civil Engineering ; 2023