

# Fabricación y caracterización de bajo coste de un sensor táctil flexible basado en grafito

*Low-cost fabrication and characterisation of a flexible graphite-based touch sensor*



Francisco-Javier Tormo-García, Juan Ivorra-Martínez, Teodomiro Boronat y Nestor Montanes

Universitat Politècnica de València (UPV).  
Camino de Vera, s/n - 46022 Valencia (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/10577>

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la robótica y los robots humanoides se están desarrollando de manera exponencial. Se busca conseguir fabricar robots que asistan a los humanos o ayuden en los trabajos peligrosos, lo que está potenciando el desarrollo [1, 2]. También se aprecia un importante incremento en el número de aplicaciones en las áreas de medicina y biología [3] con sistemas de prótesis robotizadas y senso- rizadas.

Este avance de la robótica va ligado al desarrollo de sensores y actuadores, como dispositivos necesarios para, gestionar los movimientos de los robots. La investigación acerca de sensores flexibles de alta sensibilidad para, por ejemplo, controlar las manos de los robots, es interesante y necesaria para que dichos robots puedan manipular objetos o realizar gestos [4].

Los sensores táctiles y los sensores de presión suelen asentar su funcionamiento en los efectos resistivos, piezoresistivos o capacitivos [4-6]. En los últimos años muchas de las investigaciones relacionadas con sensores flexibles se basan en la utilización de nanotubos de carbono [7-9] y grafito [3, 4, 10].

El grafito tiene capacidad para conducir la electricidad, presentado un comportamiento piezoresistivo. Se caracteriza por tener una alta sensibilidad a la detección de variaciones de conductividad muy pequeñas. La fabricación de sensores flexibles basados en grafito presenta como ventajas que los procesos de fabricación pueden ser libres de solventes [11], no precisan de salas blancas para su fabricación

[1, 3, 6] y los materiales que se emplean son de fácil accesibilidad y disponibilidad [12].

La aplicación de sensores basados en grafito comprende desde el diseño de pieles electrónicas sintéticas, prótesis para humanos [2, 4], hasta sistemas para la captura del movimiento del cuerpo [10], dispositivos para el análisis de la deformación de materiales sometidos a tensiones [3] u otros dispositivos electrónicos [13].

Existen sensores de grafito orientados a otras aplicaciones, gracias a sus propiedades intrínsecas. Majumder, A. et. al., fabricó un sensor de pH sencillo y de bajo coste fabricado utilizando un lápiz de grafito [14]. Monteiro, M. et. al., fabricó un sensor electroquímico compuesto por corcho y grafito para detectar cafeína en soluciones acuosas [15].

En el presente trabajo se expone un nuevo método de elaboración de un sensor piezoresistivo flexible basado en grafito con una fabricación y materiales de bajo coste, mediante la exfoliación de una pasta de grafito sobre sustratos poliméricos para obtener láminas flexibles. Los sensores fabricados, exhiben una alta sensibilidad al tacto y a la presión. Para caracterizar su respuesta, se ha desarrollado un método *ad hoc* que pretende recrear la interacción del sensor con un dedo humano. El resultado presentado es un sensor de grafito de alta sensibilidad, estable, fácilmente integrable y con múltiples posibilidades de aplicación.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 MATERIALES Y PROCESO DE FABRICACIÓN

La fabricación del sensor consta de varias etapas. El primer paso es la elaboración de la mezcla conductora (sustrato base). Se emplean tres materiales: polvo de grafito de Sigma Aldrich con un tamaño de partícula medio por debajo de 20  $\mu\text{m}$ ; acetona empleada como diluyente y

suministrada por SPB S.L. (Valencia, España); y una goma laca líquida como aglutinante de la mezcla fabricada por Promade S.A. (Madrid, España). Las proporciones fueron un 46% en peso de grafito, un 31% de acetona y un 23% del aglutinador. Con 1,5 g de grafito, 1 g de acetona y 0,75 g de goma laca, se han podido fabricar más de 30 sensores.

La mezcla, fue removida de forma manual durante 5 minutos con el fin de conseguir una correcta homogenización. Esta masa viscosa fue depositada sobre una lámina de acetato, de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ . La deposición de la mezcla se realiza en un sistema tipo sándwich formado por dos plantillas de aluminio con el acetato entre las dos plantillas. La plantilla superior posee una ventana (30x70x3  $\text{mm}^3$ ) que sirve de guía durante el vertido (Figura 1, etapas 2 y 3). Tras ello, se dejó secar la mezcla a temperatura ambiente ( $23 \pm 1$  °C) durante 45 minutos hasta la solidificación (Figura 1, etapa 4).

Este sustrato base de grafito sobre un film de acetato así obtenido ya sería un sensor funcional, pero altamente quebradizo. Para lograr un mayor rendimiento en el proceso de fabricación del sensor y subsanar el comportamiento quebradizo, se puede realizar una transferencia de este sustrato base, la veta madre por así llamarla, sobre otras bases de film polimérico. Con cada transferencia se reduce el espesor de la veta madre, pero no el de la capa de grafito transferida, aunque cada vez la dispersión del grafito sobre la base polimérica será más pobre, presentando más huecos sin grafito, hasta que para un número determinado de transferencias la lámina de sensor conseguida ya no será funcional.

Para las transferencias, se utilizó una plastificadora de oficina modelo QUIGG Laminadora A4-OL 250-L-17 (Monolith GmbH, Alemania), con láminas de polietileno de baja densidad (LDPE) tamaño A4 de 80  $\mu\text{m}$  de espesor. Esta plastificadora consta de unos rodillos, de aproximadamente 17 mm de diámetro entre los que pasan las dos láminas de LDPE con el documento a plastificar a una temperatura de  $120 \pm 15$  °C. La velocidad de giro de los rodillos es de 400 mm/min. La velocidad de procesado (tiempo que tarda en pasar una lámina) es de 20,23 s.

La transferencia se efectúa insertando el sustrato base o veta madre entre las dos láminas de LDPE e introduciendo el conjunto en la plastificadora ya caliente. Una vez enfriado el laminado plastificado, se procedió a separar las láminas de LDPE realizando un corte en los contornos de la deposición. A una de las láminas de LDPE se queda adherida una capa fina de grafito de aproximadamente  $67 \mu\text{m}$  y en la otra lámina la veta madre que ahora presentará un espesor inferior. Las dos láminas de grafito sobre una base de LDPE, la fina y la de la veta madre reducida, son aprovechables. Las sucesivas exfoliaciones, reducen el rango de respuesta del sensor. Este proceso de exfoliación se puede repetir mientras que la veta madre mantenga un contenido suficiente, consiguiendo de esta manera varios sensores laminares rectangulares de una misma veta madre o sustrato base original. En la última etapa de la Figura 1 se puede observar uno de esos sensores que fue obtenido tras el proceso de transferencia o exfoliación descrito.

Con el fin de comprobar cómo afectan las distintas etapas de exfoliación de la veta madre, se decidió fabricar tres vetas madre, y realizar tres exfoliaciones de cada una de ellas. Se comparan los resultados entre las distintas exfoliaciones de una misma veta madre, y entre la misma exfoliación de distintas vetas madres. La Tabla I presenta la nomenclatura empleada para identificar cada uno de los sensores caracterizados. Las dimensiones aproximadas de los sensores elaborados fueron de 15 mm de ancho por 20 mm de largo.

	Veta Madre 1	Veta Madre 2	Veta Madre 3
Transferencia 1	1eraT_M1	1eraT_M2	1eraT_M3
Transferencia 2	2ndaT_M1	2ndaT_M2	2ndaT_M3
Transferencia 3	3eraT_M1	3eraT_M2	3eraT_M3

Tabla I: Identificación de los sensores caracterizados

## 2.2. ELECTRODOS

Para poder monitorizar las señales del sensor se precisa de unos electrodos. Bajo la premisa de una fabricación *low cost*, en una primera instancia estos electrodos se elaboraron empleando cobre adhesivo comercial que se vende laminado en rollos de varios metros, con un espesor de  $115 \mu\text{m}$  y un ancho de 3,5 mm. La cara posterior de esta lámina de cobre tiene un adhesivo para facilitar su adherencia. Los electrodos implementados consisten en dos tiras de cobre, de 37 mm de largo

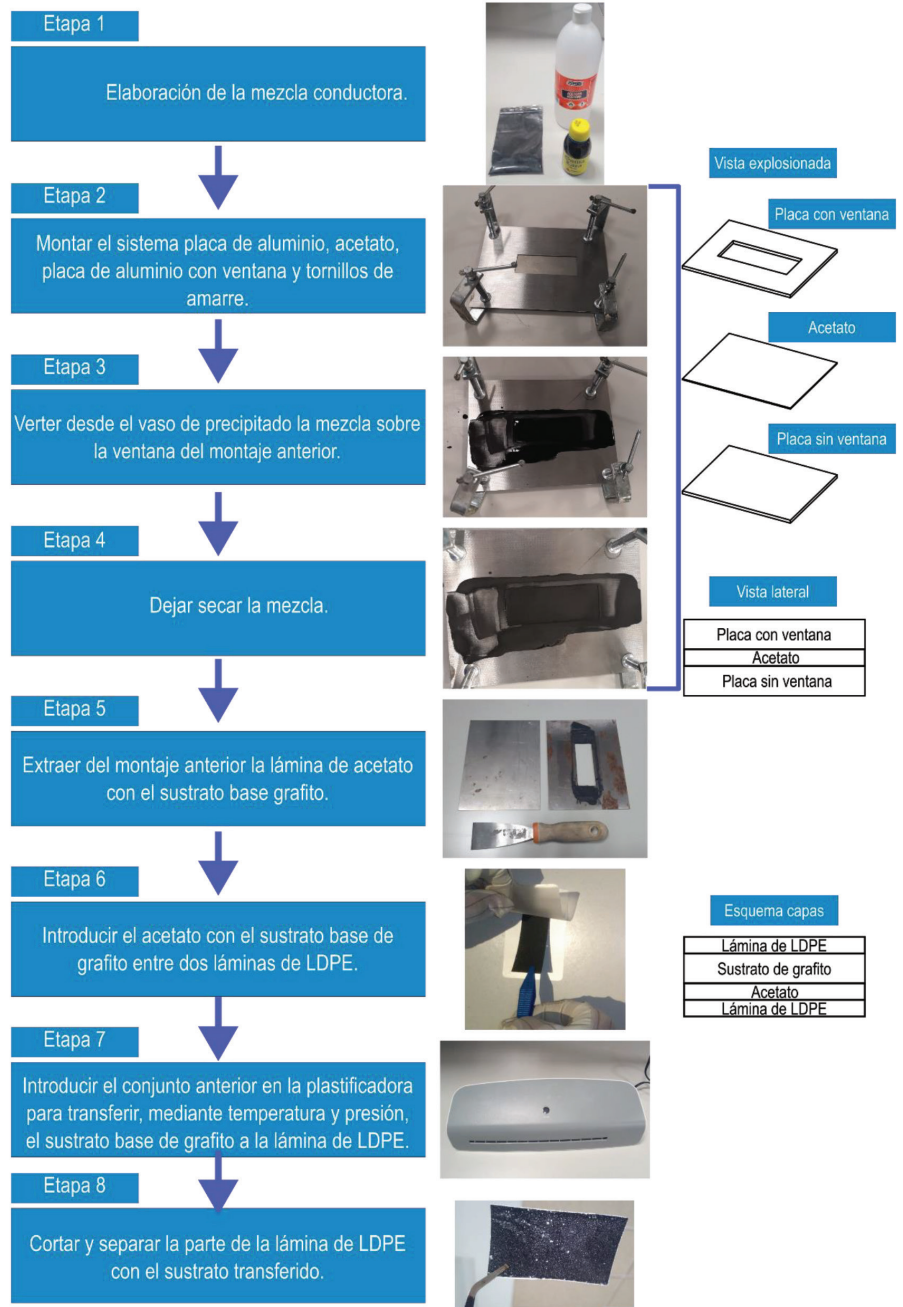


Figura 1 Etapas del proceso de fabricación del sensor

y 3,5 mm de ancho, con una separación entre ellas de 1 mm (Figura 2).

## 2.3. INTERFAZ DEL SENSOR

El comportamiento del sensor descrito en el presente trabajo es el de una resistencia variable, pudiendo ser representado por un potenciómetro. Para la adquisición de los datos que ofrece el sensor se midió la tensión existente en los bornes del mismo, fruto de la variación de la resistencia de éste.

Para un microcontrolador con un conversor A/D (analógico/digital), es más sencillo medir una tensión que una resistencia. Esto fue materializado mediante un divisor de tensión, en el cual, una vez obtenida la tensión, es posible calcular la resistencia. Además, una vez conocido el

valor de la resistencia sin deformación del sensor, siguiendo la premisa de sensores de bajo coste, y conociendo el comportamiento del sensor, se creó un divisor de tensión para obtener los valores asociados a la deformación y tratar el sensor como la resistencia variable que es. Por otro lado, los valores de variación de resistencia que ofrecen las láminas no se han tenido que ampliar, lo que redundaría en el hecho de trabajar con un simple divisor de tensión. En la literatura actual además se pueden encontrar acondicionamientos similares a la presente investigación (figura 2) [4].

Para la adquisición de los datos, la salida del divisor de tensión se conectó a una entrada del convertidor A/D de un microcontrolador ATMEGA32. Concretamente se introdujo en uno de los 6 ca-

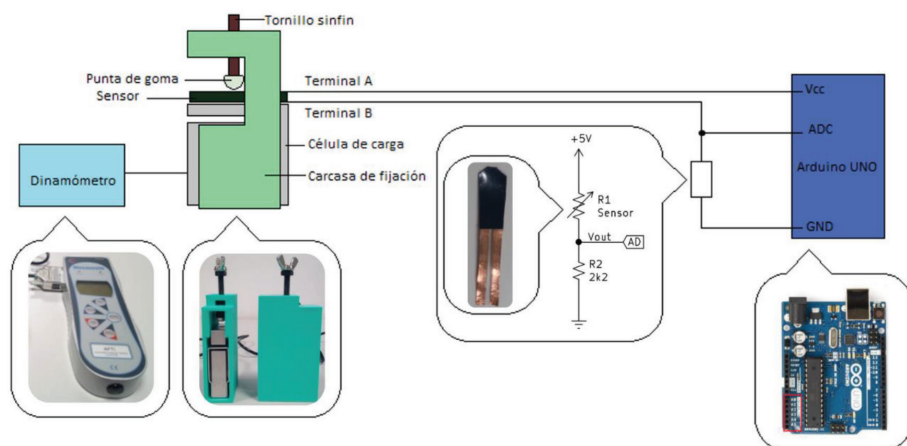


Figura 2 Esquema del montaje para la caracterización a presión

nales A/D de una placa de Arduino UNO (Amidata S.A.U., España) en la que se encuentra insertado el microcontrolador mencionado. Este convertidor tiene una resolución de 10 bits, por lo que a nivel de datos se obtendrán enteros entre 0 y 1023. Para el caso de esta placa, el valor de 0 voltios analógico será expresado en digital como B0000000000 (0) y el valor de 5V analógico será expresado en digital como B1111111111 (1023). Todo valor analógico intermedio será expresado en digital con un valor entre 0 y 1023, es decir, en binario se sumará 1 cada 4,883 mV o lo que es lo mismo, la señal será troceada en saltos de 4,883 mV.

#### 2.4. COSTE DEL SENSOR

Comprando los materiales básicos en la cantidad más pequeña de suministro se pueden fabricar unos 100 sensores con un coste total de 104,54 € (1,0454 € por sensor). A esto habría que añadir el coste del microcontrolador (12,99 €). Es difícil estipular un precio exacto del sensor desarrollado, pero si se puede considerar que es relativamente económico y sobre todo que para su fabricación no se precisan equipos caros, ni salas blancas, que puedan encarecerlo.

#### 2.5. TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR

Debido a la carencia de una normativa específica para la caracterización, se desarrolló una metodología *ad-hoc*, así como el diseño de una infraestructura de ensayos para poder realizar los experimentos asegurando en todo momento su reproducibilidad. A continuación, se describen las metodologías seguidas y las caracterizaciones efectuadas.

#### CARACTERIZACIÓN A PRESIÓN

La caracterización a presión mide la sensibilidad del sensor y sus potenciales

aplicaciones, desde simples pulsadores, hasta por ejemplo la posible utilización como piel electrónica, tanto en robots, como en prótesis inteligentes.

Para el ensayo se utilizó un dinamómetro AFTI de Mecmesin (Mecmesin Ltd., Reino Unido) con una resolución de 0,05 N y un máximo de 200 N, una carcasa prevista con un émbolo roscado para ejercer presión sobre la muestra y el microcontrolador descrito con anterioridad para recoger datos.

La carcasa es una cavidad estrecha diseñada para este ensayo e impresa en 3D con ácido poliláctico (PLA). El émbolo roscado lleva en su extremo inferior un acabado de goma para simular la punta de un dedo.

El dinamómetro se insertó en el interior de la carcasa tal y como se puede observar en la Figura 2, generando mediante el émbolo roscado una fuerza perpendicular sobre el sensor, la cual es observada al mismo tiempo en la pantalla de la consola del dinamómetro.

Para determinar la sensibilidad mínima del sensor se comenzó con el umbral más bajo de presión que puede detectar el dinamómetro, 0,05 N. Una vez determinado que el sensor era capaz de detectar esta presión, se procedió a ir aumentando la presión sobre el sensor desde 1 N hasta 30 N, con pasos de 1 N. Este rango de presión obedece a los valores normales de interacción de las personas con el entorno. Analizando diferentes estudios es posible constatar que según sexo, edad, estado de salud del sujeto y forma de aplicar la fuerza (mano entera, dedos, etc.) se pueden llegar a valores de fuerza mucho más altos [16, 17], pero se estableció el límite en 30 N, ya que en un principio el objetivo es realizar una caracterización genérica del sensor sin una aplicación concreta definida.

Por otro lado, para determinar la respuesta de los sensores con el tiempo, se

planificó un ensayo en el que, para un peso de 10 gramos, se tomaron datos durante 25 minutos. Este ensayo también se efectuó para un peso de 1 Kg. Por último, para verificar el comportamiento estable de los sensores se efectuaron varios ciclos de carga y descarga sobre cada uno de ellos con un ciclo que se repetía de manera constante con un periodo de 15 segundos, siendo que durante los primeros 5 segundos se estableció una carga perpendicular de 30 N, los siguientes 5 segundos la carga se mantuvo constante y los últimos 5 segundos se retiró la carga.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN A PRESIÓN

En la Figura 3 se presentan gráficamente los resultados de la caracterización a presión realizada siguiendo el procedimiento descrito con anterioridad. Según se aumenta la fuerza ejercida sobre el sensor, el valor registrado y convertido a digital se va reduciendo, describiendo una curva con forma de exponencial negativa, que exhibe la respuesta del sensor a los aumentos de presión en su superficie. Estos aumentos de presión producen un incremento del área de contacto entre las capas de grafito. Este incremento del área de contacto entre las capas de grafito genera una reducción de la resistencia entre los electrodos, lo que se traduce en un aumento de la tensión registrada, que es la que después mediante el convertidor A/D se convierte en señal digital.

Los autores Fastier-Wooler, J. et. al., describen un comportamiento muy similar en su artículo acerca de un sensor de presión flexible de grafito elaborado mediante una fabricación rudimentaria, de muy bajo coste y sin disolventes. En su trabajo, con ayuda de un osciloscopio, registraron los valores de intensidad (I) y tensión (V) bajo diferentes presiones sobre el sensor [4].

En la Figura 3, en las gráficas a), b) y c), se puede comparar cómo afectan las distintas etapas de exfoliación de una veta madre dada a la sensibilidad de los sensores que se obtienen. Se puede observar que todas las curvas son muy similares, por lo que se puede concluir que de una veta madre al menos se pueden realizar tres exfoliaciones sin que se produzcan grandes diferencias en la respuesta de los sensores. Se ha constatado que se pueden llegar a realizar hasta 5 exfoliaciones sin que se produzcan diferencias significativas. Si que es cierto que alguna de las curvas no es exactamente igual que el resto, como



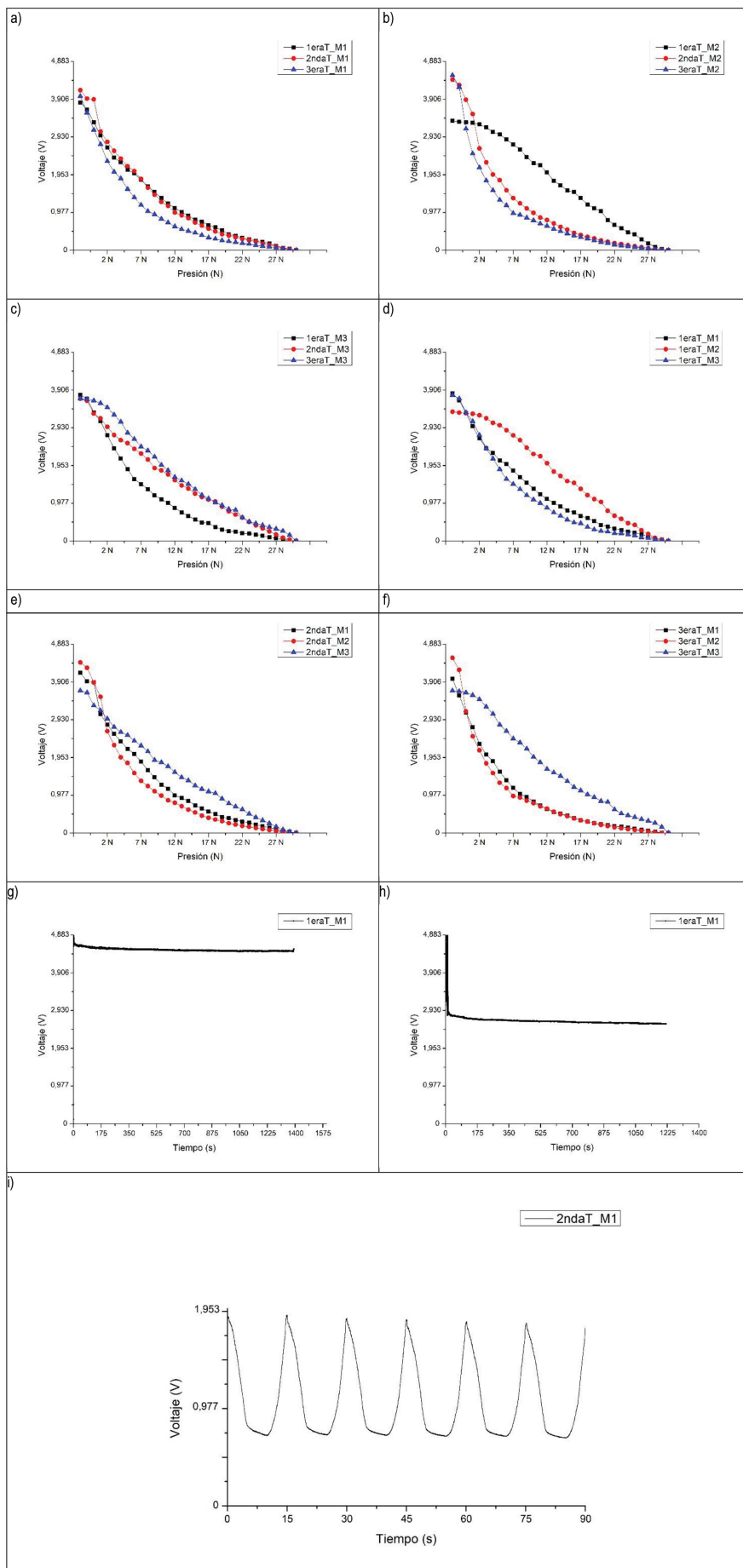


Figura 3 Caracterización a presión de los sensores fabricados: a) Comparativa entre exfoliaciones veta madre 1; b) Comparativa entre exfoliaciones veta madre 2; c) Comparativa entre exfoliaciones veta madre 3; d) Comparativa primera exfoliación distintas vetas madre; e) Comparativa segunda exfoliación distintas vetas madre; f) Comparativa tercera exfoliación distintas vetas madre; g) Respuesta del sensor 1eraT\_M1 con el tiempo con un peso de 10 gramos; h) Respuesta del sensor 1eraT\_M1 con el tiempo con un peso de 1 Kg e i) Ciclos de carga y descarga de 30 N sobre el sensor 2ndaT\_M1

es el caso de la curva de la primera transferencia de la veta madre 2, debido a la premisa establecida de llevar a cabo un sistema de fabricación de bajo coste. La dispersión del grafito a lo largo de las sucesivas transferencias y exfoliaciones no se puede controlar de manera precisa por el tipo de proceso productivo diseñado.

En cuanto a las gráficas d), e) y f) de la Figura 3, en ellas se puede comparar una misma exfoliación de distintas vetas madre. De esta forma se pretende constatar la estabilidad y reproducibilidad del método de fabricación expuesto, ya que de nuevo todas las curvas describen un comportamiento muy semejante.

En relación con la sensibilidad a la presión de los sensores fabricados, cabe destacar que detecta cambios del orden de 0,05 N, por lo que se puede decir que el sensor muestra una alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la presión ejercida. En cualquier caso, en el rango analizado de 1 N a 30 N, los pasos fueron de 1 N, ya que se pretendía realizar una caracterización más general del sensor.

La respuesta de los sensores con el tiempo se midió registrando la respuesta durante 25 minutos, primero para un peso de 10 gramos, y después para un peso de 1 Kg. En la Figura 3, en las gráficas g) y h), se puede observar la respuesta con el tiempo del sensor de la primera transferencia de la veta madre 1 para los dos pesos establecidos. Por su parte en la Tabla II se presentan los valores de deriva de todos los sensores con el tiempo, sometidos a distintos pesos.

Por último, en la Figura 3 i) se puede observar la respuesta a los ciclos de carga y descarga de 30 N de uno de los sensores, aunque este ensayo se ha efectuado con todos. Se puede apreciar como la señal se repite de manera constante ciclo tras ciclo, lo que verifica la repetibilidad de la respuesta de los sensores frente a ciclos de actuación sobre ellos.

	10 g	1 kg
1eraT_M1	4,71	8,02
2ndaT_M1	6,71	5,18
3eraT_M1	2,42	5,68
1eraT_M2	0,44	3,20
2ndaT_M2	4,28	7,89
3eraT_M2	5,38	7,64
1eraT_M3	6,32	6,19
2ndaT_M3	3,01	6,41
3eraT_M3	0,66	7,55
<b>Media</b>	<b>3,77</b>	<b>6,42</b>
<b>Desviación m.</b>	<b>1,90</b>	<b>1,21</b>

Tabla II: Valor de deriva en porcentaje de los sensores con el tiempo sometidos a distintos pesos

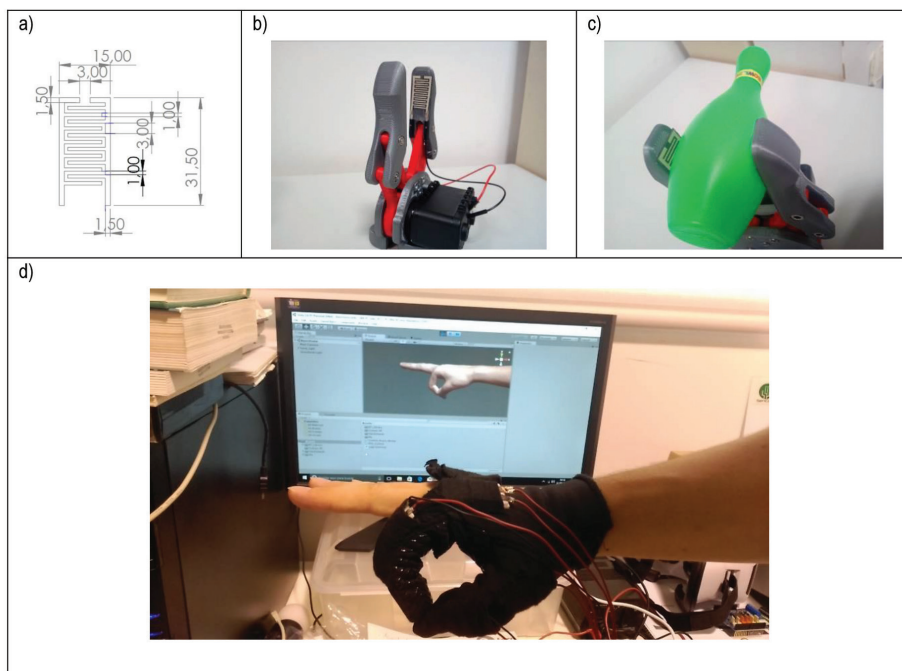


Figura 4 Ejemplo ilustrativo de posible aplicación en detección táctil robótica

### 3.2. USO EN DETECCIÓN TÁCTIL ROBÓTICA

En la Figura 4 se expone una posible aplicación del sensor en detección táctil robótica. Para este prototipo se ha diseñado un electrodo interdigitado especial serigrafiado con pasta de plata, Figura 4 a), que permite aprovechar casi completamente el área de acción del sensor, y aunque la superficie presente muchos huecos o grietas, los pequeños cambios en la resistencia pueden ser detectados. El Arduino utilizado es un modelo más pequeño, se han mejorado los sistemas de conexión entre los componentes y se ha desarrollado un sistema gráfico bajo la plataforma Unity 3D mediante el cual pueden ser capturados los movimientos (Figura 4 d).

### 4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha expuesto un método de fabricación de bajo coste de un sensor piezoresistivo flexible elaborado con grafito. Los materiales empleados son de fácil adquisición y el proceso de elaboración es sencillo, estable y no precisa de salas blancas. El sensor exhibe una alta sensibilidad al tacto y a la presión, llegando a detectar presiones de 0,05 N. Y en cuanto a la estabilidad de la señal con el tiempo, presenta desviaciones relativamente pequeñas. El resultado es un sensor flexible, de alta sensibilidad, estable, de fácil integración en diversos sistemas y con múltiples campos de aplicación. Como líneas futuras se propone el filtrado, corrección y/o ajuste

de la respuesta del sensor y el desarrollo de prototipos funcionales.

### REFERENCIAS

- Phan H-P, Dao DV, Dinh T, Brooke H, Qamar A, Nguyen N-T, et al., editors. Graphite-on-paper based tactile sensors using plastic laminating technique. 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS); 2015: IEEE.
- Tsao L-C, Cheng M-Y, Chen I-L, Shih W-P, Yang Y-J, Chang F-Y, et al., editors. Flexible Temperature Sensor Array Using Electro-Resistive Polymer For Humanoid Artificial Skin. TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference; 2007: IEEE.
- Ren T-L, Tian H, Xie D, Yang YJS. Flexible graphite-on-paper piezoresistive sensors. 2012;12(5):6685-94.
- Fastier-Wooller J, Dinh T, Dau VT, Phan HP, Yang FW, Dao DV. Low-Cost Graphite on Paper Pressure Sensor for a Robot Gripper with a Trivial Fabrication Process. Sensors. 2018;18(10):11.
- Mazzeo AD, Kalb WB, Chan L, Killian MG, Bloch JF, Mazzeo BA, et al. Paper based, capacitive touch pads. 2012;24(21):2850-6.
- Liu X, Mwangi M, Li X, O'Brien M, Whitesides GM. Paper-based piezoresistive MEMS sensors. Lab on a Chip. 2011;11(13):2189-96.
- Kang IP, Schulz MJ, Kim JH, Shanov V, Shi DL. A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring. Smart Mater Struct. 2006;15(3):737-48.
- Tadikaluru S, Thongsuwan W, Singjai P. Stretchable and Flexible High-Strain Sensors Made Using Carbon Nanotubes and Graphite Films on Natural Rubber. Sensors. 2014;14(1):868-76.
- Obitayo W, Liu T. A Review: Carbon Nanotube-Based Piezoresistive Strain Sensors. J Sens. 2012;2012:15.
- He Y, Li W, Yang G, Liu H, Lu J, Zheng T, et

al. A novel method for fabricating wearable, piezoresistive, and pressure sensors based on modified-graphite/polyurethane composite films. 2017;10(7):684.

- Kanaparthi S, Badhulika S. Low cost, flexible and biodegradable touch sensor fabricated by solvent-free processing of graphite on cellulose paper. Sensors and Actuators B: Chemical. 2017;242:857-64.
- Lin C-W, Zhao Z, Kim J, Huang J. Pencil drawn strain gauges and chemiresistors on paper. Scientific reports. 2014;4:3812.
- Kurra N, Kulkarni GU. Pencil-on-paper: electronic devices. Lab on a Chip. 2013;13(15):2866-73.
- Majumder A, Pradhan SK, Saha K, Tallur S. Low-Cost Passive pH Sensor Fabricated on Scotch (TM) Tape. IEEE Sens Lett. 2020;4(4):4.
- Monteiro MKS, Da Silva DR, Quiroz MA, Vilar VJP, Martinez-Huitle CA, Dos Santos EV. Applicability of Cork as Novel Modifiers to Develop Electrochemical Sensor for Caffeine Determination. Materials. 2021;14(1):17.
- Rojas JA, Vázquez LdCU, Sánchez GV, Banik SD, Argáez JJRcdn. Dinamometría de manos en estudiantes de Merida, México. 2012;39(3):45-51.
- Valencia-Otero ÁF, Maradei-García MF, Espinel-Correal FJRdSP. Estudio sobre la influencia del diámetro de apertura en la fuerza ejercida por cada dedo. 2016;18:935-45.

### AGRADECIMIENTOS

J. I.-M. quiere agradecer la beca FPU19/01759 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por ESF Investing in your future. Esta investigación forma parte del proyecto PID2020-116496RB-C22 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, y de los proyectos AICO/2021/025 y CIGE/2021/094 financiados por Generalitat Valenciana-GVA.

### MATERIAL SUPLEMENTARIO

[http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/\\_adic/10577-1.pdf](http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/10577-1.pdf)

