







## Fabricación de un dispositivo wearable usando óxido de grafeno reducido Fabrication of a wearable device using reduced graphene oxide

M. E. Paxtian-Treviño <sup>a\*</sup>, V. M. Sánchez-Ramírez <sup>a</sup>, S. J. Meza-Gómez <sup>b</sup>,  
Y. N. Aguilar-Moreno <sup>c</sup>, E. Bravo-González <sup>d</sup>, Y. A. León-Nataret <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería en Nanotecnología, Universidad Politécnica del Valle de México, Tultitlán, 54910 Estado de México, México.

<sup>b</sup> Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro Universitario Tonalá - Universidad de Guadalajara, 45425, Tonalá, Jalisco, México.

<sup>c</sup> Departamento de Ciencias Aplicadas, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 64849, Monterrey, Nuevo León, México.

<sup>d</sup> Investigación y Desarrollo, Instituto de Nanotecnología Aplicada, 54987, Tultepec, Estado de México, México.

### Resumen

En México, la población se acerca a los 130 millones y de acuerdo con el INEGI, 33 millones de mexicanos no cuentan con acceso a servicios de salud, complicando la detección y prevención de enfermedades. El monitoreo en tiempo real del cuerpo humano abre la posibilidad de obtener datos como temperatura corporal, ritmo cardíaco, niveles de glucosa, entre otros, para su inmediata interpretación con el fin de prevenir y tratar enfermedades. La tecnología *wearable* es una categoría de dispositivos sensores inteligentes que pueden ser portados en el cuerpo como implantes o accesorios. En la última década, este tipo de dispositivos han ganado interés debido a los avances en nanotecnología y ciencia de materiales, donde el grafeno y sus derivados, como el óxido de grafeno reducido, destacan por sus propiedades conductoras y flexibles, características clave para el desarrollo de un dispositivo *wearable*. Esto ha impulsado la investigación en la integración de este tipo de nanomateriales en textiles para crear dispositivos *wearables* funcionales. En este trabajo se diseñó un sensor *wearable* a base de textiles accesibles comercialmente que sea capaz de detectar movimientos y cambios en la temperatura corporal del usuario, los cuales se reflejarán como cambios en la resistencia eléctrica del dispositivo. Para su fabricación se utilizó una técnica de adsorción de óxido de grafeno en la tela por inmersión, para posteriormente reducir químicamente este compuesto sobre la tela y recubrir con alcohol polivinílico y carbón activado. Se realizó el proceso en telas de algodón, poliéster y nylon para realizar una comparación. Los datos obtenidos se registraron en una placa de circuito impresa fácil de portar para un monitoreo en tiempo real. Los resultados son prometedores para la integración del sensor en una prenda de vestir enfocado a pacientes hospitalarios, con necesidad de más investigación para su desarrollo y perfeccionamiento.

**Palabras clave:** wearables, grafeno, óxido de grafeno reducido, textiles inteligentes, electrónica flexible.

### Abstract

In Mexico, the population is approaching 130 million and, according to INEGI, 33 million Mexicans do not have access to health services, complicating the detection and prevention of diseases. Real-time monitoring of the human body opens the possibility of obtaining data such as body temperature, heart rate, glucose levels, among others, for immediate interpretation in order to prevent and treat diseases. Wearable technology is a category of intelligent sensor devices that can be carried on the body as implants or accessories. In the last decade, such devices have gained interest due to advances in nanotechnology and materials science, where graphene and its derivatives, such as reduced graphene oxide, stand out for their conductive and flexible properties, key features for the development of a wearable device. This has driven research into the integration of such nanomaterials into textiles to create functional wearable devices. In this work a wearable sensor was designed based on commercially accessible textiles that is able to detect movements and changes in the user's body temperature, which will be reflected as changes in the electrical resistance of the device. For its manufacture, a technique of adsorption of graphene oxide in the fabric by immersion was used, to later chemically reduce this compound on the fabric and coat it with polyvinyl alcohol and activated carbon. The process was performed on cotton, polyester and nylon fabrics for comparison. The obtained data was recorded on an easy-to-carry printed circuit board for real-time monitoring. The results are promising for the integration of the sensor in a garment focused on hospital patients, who need more research for its development and improvement.

**Keywords:** wearables, graphene, reduced graphene oxide, smart textiles, flexible electronics.

\*Autor para la correspondencia: max.paxtian.trevino@upvm.edu.mx

**Correo electrónico:** max.paxtian.trevino@upvm.edu.mx (Max Emiliano Paxtian Treviño), victor.sanchez.ramirez@upvm.edu.mx (Víctor Manuel Sánchez Ramírez), sharon.meza4132@alumnos.udg.mx (Sharon Jezabel Meza Gómez), yareli.aguilar\_m@hotmail.com (Yareli Nohemí Aguilar Moreno), edith.bravo@spintronics.com.mx (Edith Bravo González), yosemik.leon@spintronics.com.mx (Yosemik Arjuna León Nataret).

**Historial del manuscrito:** recibido el 23/09/2023, última versión-revisada recibida el 14/11/2023, aceptado el 16/11/2023, publicado el 15/12/2023. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial5.11739>

## 1. Introducción

En México, la población se acerca a los 130 millones, y en un escenario ideal, cada ciudadano debe acudir mínimo una vez al año a una revisión médica, con el objetivo de un diagnóstico temprano (Portillo, 2023). En 2020, las 3 principales causas de muerte en México se atribuyeron a enfermedades del corazón, diabetes mellitus y COVID-19 (INEGI, 2021), algunas pudiendo prevenirse mediante un diagnóstico y tratamiento oportuno. Sin embargo, de acuerdo con estadísticas del INEGI, 33 millones de mexicanos no tienen acceso a servicios de salud, convirtiendo la posibilidad de un diagnóstico temprano en un desafío, el cual, aunado a la falta de hábitos saludables y falta de cultura de prevención de enfermedades en el país (Córdoba, et al., 2009), trae en consecuencia complicaciones médicas y falta de tratamientos, así como mayores gastos presupuestales (Portillo, 2023).

El monitoreo en tiempo real del cuerpo humano abre la posibilidad obtener datos fiables de distintas señales para su inmediata interpretación y con el fin de prevenir enfermedades o almacenar datos de rendimiento deportivo (Jin, Y., Chen, G., et al., 2020).

La tecnología *wearable* (o vestible) es una categoría de dispositivos sensores inteligentes que pueden ser portados en el cuerpo humano como implantes, ropa o accesorios (Al-Turjman, Fadi, et al., 2020). Estos dispositivos han atraído mayor atención en comparación con los dispositivos tradicionales (rígidos, de mayor dimensión y poca flexibilidad), ya que los *wearables* ajustan su morfología a la de la piel y/o prenda de vestir, la cual sufre deformaciones elásticas al momento de realizar movimientos. Es por eso que los textiles inteligentes son deseables y atractivos en estos proyectos, pues aportan propiedades como elasticidad, transpirabilidad, ligereza y excelente adaptabilidad a deformaciones mecánicas durante actividades cotidianas. Además, los textiles inteligentes resultan ideales para construir productos tejidos con dispositivos electrónicos flexibles y elásticos, lo que resulta bastante prometedor en tecnología emergente portátil basada en prendas de vestir (Hou et al., 2023).

Por lo que un dispositivo flexible (que sea capaz de amoldarse al cuerpo sin romperse) y de pequeñas dimensiones (para no obstruir el movimiento natural del cuerpo), facilita la tarea al estar en contacto directo con el cuerpo humano.

Esto ha causado tendencia en los dispositivos de detección, pues la posibilidad de monitorear la salud del usuario a través de un dispositivo tecnológico de sustrato flexible ha habilitado una gran cantidad de avances en la investigación de nuevas formas de detección ante diferentes estímulos (Sazonov y Neuman, 2014). Debido a la naturaleza de características como la elasticidad y dimensiones de estos dispositivos tan innovadores, estos dependen principalmente de materiales especializados para lograr mediciones confiables de los fenómenos que ocurren en la piel del usuario lo que, a continuación, será el tema principal por tratar en el área de dispositivos *wearables*. Si bien los sustratos no tejidos son de gran interés debido a su alta confiabilidad y a su naturaleza fácil de depositar, nuestro enfoque en sustratos tejidos (específicamente textiles disponibles comercialmente) fue impulsado por el concepto de textiles inteligentes y su compatibilidad con la ropa.

La innovación debería proporcionar una ventaja tangible al usuario y ésta debería ser consistente y compatible con sus valores, creencias y necesidades. Así mismo, la proliferación de este tipo de dispositivos ha llevado al concepto de “*connected health*” - los datos recolectados del usuario mediante estos dispositivos son compartidos con el médico o un consejero de la salud, quien aprovecha los datos de forma proactiva para asesorar y mejorar el bienestar del individuo de una forma rentable. Además, abre posibilidades de cuidado personalizado, predictivo y preventivo para el usuario (Sazonov y Neuman 2014).

El grafeno y sus derivados, como el óxido de grafeno reducido (rGO), destacan por sus propiedades conductoras y flexibles. Esto ha impulsado la investigación en la integración de estos nanomateriales en textiles para crear dispositivos *wearables* funcionales (Premika et al. 2023).

Una tarjeta de procesamiento Arduino LilyPad en un textil inteligente es una elección innovadora que permite la integración de tecnología en prendas de vestir de manera efectiva. El LilyPad es compacto y flexible, lo que lo hace ideal para aplicaciones *wearables*. Al coser o fijar esta tarjeta en el textil, se pueden crear prendas que monitorean datos, como la temperatura corporal o la actividad física, ofreciendo una comodidad y movilidad excepcionales para los usuarios. Además, su capacidad de programación y personalización ofrece un amplio potencial para el desarrollo de textiles inteligentes versátiles y personalizados que pueden mejorar la vida cotidiana y la salud de las personas.

Con base a lo anterior, en el presente trabajo se propone el desarrollo de un dispositivo *wearable* a base de rGO capaz de detectar movimientos (flexiones) y medir la temperatura corporal, que pueda ser portable al incorporar una tarjeta de procesamiento Arduino LilyPad.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Materiales

Grafito pulverizado (99.9%, Sigma Aldrich), NaNO<sub>3</sub> (99% J.T. Baker), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (95-97% J.T. Baker), KMnO<sub>4</sub> (99% Meyer), NaBH<sub>4</sub> (98% J.T. Baker), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30% EMSURE), NaOH (97% Meyer), Acetona (99.5% Meyer), Etanol (99.5% Meyer), Polivinil alcohol (PVA, 99% Sigma Aldrich), carbón activado (Bulk Superfoods). Trozos de telas de algodón (100%), poliéster (100%) y Nylon 6-6 (100%) compradas del establecimiento comercial mexicano *Modatelas*. Arduino LilyPad - Procesador ATmega328V, voltaje de operación: 5.5V, 118 pines de salida, corriente de 40mA por pin de salida, velocidad de reloj de 8MHz.

### 2.2 Adsorción de GO en textiles y reducción a rGO

La metodología de adsorción de GO fue basada en el trabajo de Siyi Bi, Lei Hou, et al. (2020), donde se realizó una reducción química de GO a rGO sobre tela. El GO fue sintetizado utilizando una modificación del método de Hummers reportada anteriormente en la literatura (Yu H, et al. 2016). Para este método se utilizó 1 g de grafito pulverizado (Lápiz Dixon© HB=2) y 0.5 g de NaNO<sub>3</sub>, estos reactivos se colocaron en un vaso de precipitado de 500 ml en una tina rodeado con hielo y sal de grano a 15°C. Se incorporaron otros reactivos, agregando lentamente 100 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, se mantuvo

en agitación constante a 600 rpm. Posteriormente en un tiempo de 30 min se agregó gradualmente y lentamente 3 g de  $\text{KMnO}_4$ , la solución se mantuvo en agitación a 650 rpm por 3:30 hrs a  $15^\circ\text{C}$ , una vez concluidas las 3:30 hrs se agregaron 150 ml de agua desionizada y la agitación subió a 700 rpm durante 2 hrs manteniendo la temperatura de  $15^\circ\text{C}$ . Por último, se agregaron 80 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a 750 rpm por 15 min y  $15^\circ\text{C}$ .

Posteriormente se tomó una muestra de tela con dimensiones de 2 cm x 2 cm previamente lavada con acetona al 10% (v/v), etanol al 10% (v/v) y agua desionizada, así como sometida a baño ultrasónico durante 30 minutos con agua desionizada y secada en parrilla a  $100^\circ\text{C}$  durante 10 minutos. Se preparó una solución de GO al 1% (v/v) y se llevó a baño ultrasónico durante 60 minutos. Se sumergieron los textiles en la solución de GO durante un minuto, para luego secarlos a  $100^\circ\text{C}$  en parrilla durante 20 minutos. El textil con GO adsorbido se sumergió en una solución de 0.55 M  $\text{NaBH}_4$  / 1.83M  $\text{NaOH}$  durante 1 minuto para ser sometido a secado posteriormente, para reducirlo directamente sobre el textil.

Para recubrir el textil con el objetivo de tener una protección física conductora (Zhang Ruirong, et al., 2019), se sumergió el textil en una solución de agua desionizada/carbón activado (CA)/PVA 8% (v/v) durante 1 minuto para luego ser colocado en una parrilla calentadora y secar a  $100^\circ\text{C}$  durante 20 minutos. Todo el procedimiento se repitió para muestras de tela de algodón y poliéster con el objetivo de realizar comparativas en sus propiedades eléctricas.

### 2.3 Técnicas de caracterización

#### 2.3.1 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

Se empleó el análisis FTIR para evaluar la estructura química del textil, y para comprobar la adsorción y reducción del óxido de grafeno reducido. La caracterización FTIR del se realizó en espectrómetro de infrarrojo marca Alpha-104936, con un rango de  $4000$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ .

#### 2.3.2 Medición de propiedades eléctricas

Se realizaron mediciones de resistencia eléctrica en los textiles procesados utilizando un multímetro (Stern, MUL-605) para evaluar sus propiedades eléctricas. Se diseñó un circuito divisor de voltaje para medir las variaciones en los valores de resistencia del textil y establecer un método de medición en tiempo real para el dispositivo. Se utilizó una placa de circuito Arduino LilyPad para interpretar dichos datos en tiempo real y determinar la sensibilidad del dispositivo a flexiones y cambios de temperatura en un rango establecido. Ver figura 1.

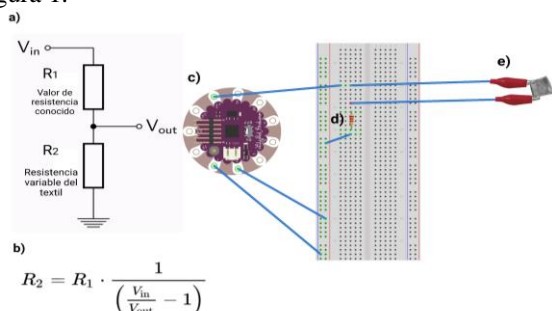


Figura 1.- a) Esquema de circuito divisor de voltaje empleado. b) Procedimiento matemático para la obtención del valor de la resistencia. c) Diagrama de conexiones de la placa LilyPad. d) Resistencia con valor conocido. e) Textil sujeto a caimanes conectados al resto del circuito. (Creado con BioRender.com)

Un aspecto importante del método de medición de datos empleado es la tolerancia de valores en la resistencia conocida (figura 1, d), el valor de esta tiene que estar cercano al valor de la resistencia promedio del textil procesado para que los datos calculados con la fórmula matemática (figura 1, b) tengan mayor precisión.

Las pruebas realizadas del desempeño del prototipo incluyeron una serie de flexiones en ciertos ángulos. Después, se sometió el textil a calentamiento hasta  $50^\circ\text{C}$ . El código escrito para la tarjeta LilyPad fue programado para calcular un solo dato de resistencia del textil cada 10 milisegundos, esta serie de datos arrojados por la aplicación de Arduino IDE fueron almacenados y graficados.

### 3. Resultados y discusiones

#### 3.1 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

En la Figura 2 se observa un espectro correspondiente al Nylon 6-6 reportado en la literatura (Khorihha et al. 2020), en el cual se observa una banda media en el pico  $3298\text{ cm}^{-1}$  que se atribuye a la vibración N-H de los grupos amino, las bandas de vibración de los enlaces C-H en la cadena principal del Nylon 6-6 pueden observarse en el pico  $2934\text{ cm}^{-1}$ , en los espectros se observan dos picos fuertes en las posiciones de  $1636\text{ cm}^{-1}$  y  $1535\text{ cm}^{-1}$ , el pico en  $1636\text{ cm}^{-1}$  está relacionado con la vibración del estiramiento del enlace C=O en el grupo amida presente en la cadena del nylon, a medida que se avanza hacia valores inferiores estos picos disminuyen a  $1500\text{ cm}^{-1}$ , lo cual se debe a la presencia de las bandas de amida I y II. En el pico de  $1636\text{ cm}^{-1}$ , la vibración debida al enlace C=O del grupo carbonilo puede interactuar con el grupo amino, formando enlaces de hidrógeno intramoleculares, lo que ocasiona un desplazamiento de la vibración C=O que normalmente se encuentra en el intervalo de  $1760\text{ cm}^{-1}$  a  $1665\text{ cm}^{-1}$  hacia la posición de  $1636\text{ cm}^{-1}$ . Al mismo tiempo, la banda correspondiente a la amida II, localizada en el pico de  $1535\text{ cm}^{-1}$ , surge debido al estiramiento del enlace C-N y la formación de enlaces N-H. El Nylon 6-6 es un material versátil que combina durabilidad, resistencia al desgaste, ligereza y facilidad de procesamiento. Puede lavarse y secarse sin perder sus propiedades, lo que lo hace ideal para dispositivos *wearable*. Se utiliza en diversas aplicaciones textiles, como medias, calcetines, telas de punto y alfombras, así como en revestimientos de suelos, moda, hilos y filtros industriales (Bautista, 2017). Debido a estas propiedades, es atractivo para textiles inteligentes, especialmente en prendas de vestir que incorporan tecnología de monitoreo de datos.

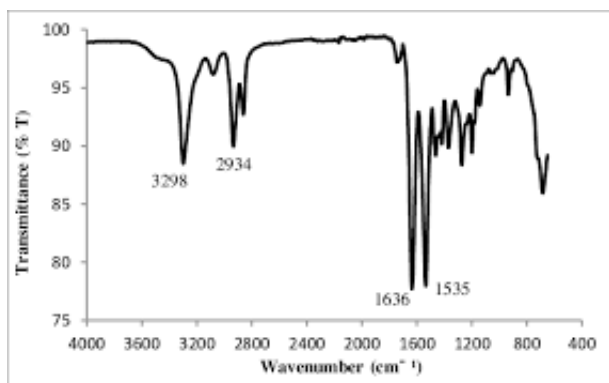


Figura 2. Espectro FT-IR de poliamida (Nylon 6-6) (4000-225  $\text{cm}^{-1}$ ). Imagen recuperada de: J. Environ. Treat. Tech

En la figura 3 se observa el espectro infrarrojo del GO (color negro), carbón activado (CA, color rojo), del textil nylon 6-6 (color azul), del nylon 6-6 con CA (color verde) y del textil con GO (posterior a introducirla en la solución de  $\text{NaBH}_4$ ), PVA y CA depositados en el textil, se denomina a este compuesto como “wearable” (color morado) por practicidad. Analizando el espectro del GO, se puede observar un pico amplio y fuerte centrado en  $3309 \text{ cm}^{-1}$ , el cual es atribuido al estiramiento de enlaces hidroxilos (O-H), así como tensión de enlaces C=C en el pico centrado en  $1637 \text{ cm}^{-1}$ , característico de la hibridación  $\text{sp}^2$  de entre los anillos aromáticos de carbono. También se encuentra un modo vibracional centrado en  $1074 \text{ cm}^{-1}$  característico de flexión en plano de enlaces C-H en anillos aromáticos.

Respecto al espectro del CA, comparte un pico similar al GO en la región correspondiente al estiramiento de enlace hidroxilo, centrado en  $3342 \text{ cm}^{-1}$ , aunque en este compuesto el pico es de menor intensidad y amplitud que en el espectro de GO, indicando una menor absorción de radiación IR. A su vez cuenta con un pico centrado en  $1656 \text{ cm}^{-1}$ , asociado con tensión de enlaces C=C.

Se puede observar en los incisos c), d) y e) de la figura 3 que estos espectros comparten picos similares en las regiones de  $1710 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1253 \text{ cm}^{-1}$ , y  $730 \text{ cm}^{-1}$ , correspondientes al estiramiento de enlaces dobles C=O (amidas primarias), tensión de enlaces C-N y flexión de enlaces C-H monosustituidos respectivamente. Dichos picos están presentes en cada instancia del textil de Nylon 6-6, indicando que los grupos funcionales presentes son característicos de la cadena polimérica del textil.

En el espectro del *wearable* (figura 3, e), tras observar los picos característicos obtenidos se determinó que la banda de absorción a  $3287 \text{ cm}^{-1}$  correspondió a la vibración de estiramiento del enlace O-H, es decir, a los grupos hidroxilos. El pico a  $2913 \text{ cm}^{-1}$ , correspondió a la vibración de estiramiento simétrico y antisimétrico de los grupos carbonilos como enlaces C-H, comunes en compuestos orgánicos.

El pico a  $1710 \text{ cm}^{-1}$  es un pico característico del Nylon 6-6 y es típicamente asociada con el estiramiento de enlaces dobles C=O  $\text{cm}^{-1}$ , lo que sugiere la presencia de grupos carbonilo en la muestra.

Los otros picos representan la huella digital del compuesto y están relacionados con enlaces simples entre átomos de carbono (C-C). Estos picos en la región de huellas dactilares ( $700\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ ) pueden proporcionar información específica sobre la estructura de la muestra, en este caso se considera que pertenecen a la huella digital del Nylon 6-6.

Se observó también que la intensidad de los picos en la región de la huella dactilar decreció desde el espectro original del Nylon 6-6 hasta el espectro del *wearable* (figura 4). Con base a esto, se puede concluir que existe un proceso de adsorción de todos los compuestos en las fibras del textil, ya que los modos vibracionales del Nylon 6-6 no sufren de corrimientos hacia la derecha o izquierda una vez que se depositan todos los materiales involucrados en el proceso, simplemente disminuye la intensidad de los picos ya existentes.

También se puede confirmar la reducción de los grupos funcionales de oxígeno del GO para formar rGO, ya que el pico característico de grupos funcionales C-H es considerablemente reducido en el espectro del *wearable* comparado con el espectro del GO, esto es comprobado por estudios realizados previamente sobre la reducción de GO (Lunavictoria, 2020). La apariencia de estas bandas indicó que el óxido de grafeno se redujo de una manera aceptable y a la vez hubo correlación con los picos característicos de diversas literaturas (Minitha y Rajendrakumar, 2013). Ver figura 4.

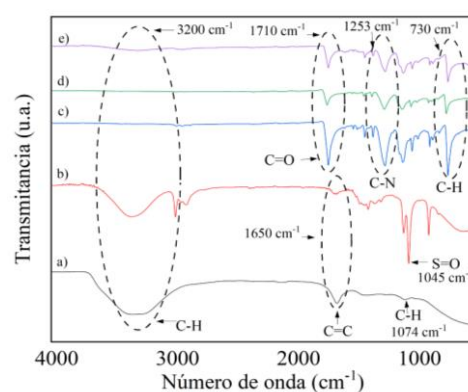


Figura 3. Espectro IR del a) GO, b) Carbón Activado (CA), c) textil Nylon 6-6, d) Nylon 6-6 con CA adsorbido y e) *wearable*.

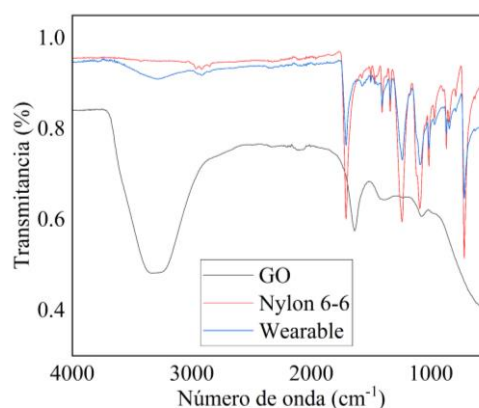


Figura 4. Espectros IR sobrepuestos del GO, Nylon 6-6, y del *wearable*.

### 3.2 Parámetros de desempeño de resistencia

En la tabla 1 se presentan los valores de resistencia de cada textil en cada fase del proceso de adsorción y recubrimiento. Como se observa, posterior al paso de reducción del GO a rGO hay una reducción significativa en la resistencia, aumentando, en consecuencia, su conductividad. Esto era de esperarse y a su vez comprueba la reducción de GO a rGO, ya que al disminuir los grupos funcionales hidroxilo, epóxido y



carboxilo mediante el proceso de reducción se esperaría un aumento en la conductividad, de acuerdo con Zhang H, et al. (2023). Estos datos reflejan una reducción significativa en la resistencia promedio de los textiles, que disminuyó en tres órdenes de magnitud, pasando de mega Ohms a kilo Ohms, después de la aplicación del proceso de reducción química.

Puede observarse, además, que posterior a la adición de PVA y CA la resistencia disminuye para el caso del Nylon 6-6, mientras que en los otros casos aumenta, además que en esta tela fue donde se obtuvo una menor resistencia desde el paso de reducción del GO del textil, teniendo la mejor conductividad de los textiles experimentados.

Por lo anterior, únicamente el nylon 6-6 exhibió propiedades conductivas lo suficientemente prometedoras como para justificar su selección exclusiva en las pruebas subsiguientes de sensado.

Tabla 1. Valores de resistencia de cada textil en cada fase del proceso de adsorción, reducción y recubrimiento.

Textil	Etapa Inicial (Mega $\Omega$ )	Reducción del GO (Kilo $\Omega$ )	Adición PVA (Kilo $\Omega$ )	Adición CA (Kilo $\Omega$ )
Nylon 6-6	>2	230	280	170
Algodón	>2	350	300	>2000
Poliéster	>2	400	900	>1000

### 3.3 Procesamiento de señal en el nylon 6-6 con la adsorción de rGO

La selección del nylon 6-6 como el material de elección para las pruebas de sensado se basa en su combinación de resistencia eléctrica reducida y capacidad de conducción una vez adsorbidos los materiales de interés, lo que lo convierte en un candidato óptimo para aplicaciones futuras en sensores y dispositivos electrónicos flexibles.

En la figura 6 se puede observar el comportamiento de la señal nominal del dispositivo en presencia de estímulos de movimiento y de temperatura respectivamente. Representan las medidas de resistencia del textil realizadas por la placa Arduino LilyPad y calculadas por el programa. Existe un video de referencia en donde se puede observar las flexiones y la captura simultánea de datos del sensor. [Ver video.](#)

En el inciso A) de la figura 6 se presenta la señal de resistencia del textil en reposo previo a la flexión, es notable que existe gran cantidad de ruido, es decir, no se muestra constante, pues se obtienen valores cercanos a los 350 kilo Ohms sin haber ningún estímulo, por lo que se consideraron estos valores como ruido y fueron ignorados. Al comparar el inciso A) con el inciso B) de la figura 5 (flexión de 90°) se puede observar un cambio en la señal nominal, obteniendo una menor resistencia al flexionar y posteriormente en el inciso C) (después de la

flexión) puede observarse cómo la señal nominal vuelve a ser similar al inciso A), demostrando un comportamiento perceptible al recibir estímulos de movimiento. Es notable recalcar el papel que juega la orientación de las fibras del textil en la conductividad del dispositivo, esto representa un reto al usar textiles tejidos como sustrato de un sistema *wearable*, el comportamiento ‘anisotrópico’ de la conductividad en las fibras limita la sensibilidad del dispositivo. No obstante, esta propiedad podría ser explotada para diseñar un prototipo de tal manera que las flexiones que un usuario pueda realizar estén alineadas con la conductividad y sensibilidad anisotrópica.

Para el caso de la temperatura se puede observar cómo la señal nominal al calentarse a 50°C el dispositivo aumenta (incisos E) y F)) a comparación de antes del calentamiento (D)), es decir, la resistencia aumenta al incrementar la temperatura. No obstante, aún se requiere perfeccionar el sensor y el sistema de detección, ya que debido a la cantidad de ruido es muy difícil de estimar cuantitativamente la relación movimiento/resistencia y temperatura/resistencia, sin embargo, los resultados demuestran ser muy prometedoros para la aplicación de este sistema. De acuerdo con la literatura (Siyi Bi, et al. (2020), Xu, M., et al. 2018), anteriormente se han desarrollado sensores *wearables* de resistencia basados en rGO, sin embargo, además de que no se reporta el uso de nylon 6-6 como textil base, para sus mediciones se han utilizado equipos como medidores de conductividad y sondas digitales de cuatro puntos. En la figura 5 se observa una variación de resistencia relativa de bajo diversas tensiones cíclicas a una velocidad de estiramiento de 20 mm·min<sup>-1</sup> de una tela a base de celulosa recubierta con una capa de rGO y tinta de bolígrafo/PVA (MRIP8) reportada en la literatura.

Como puede observarse, en cada ciclo de tensión hay un aumento en la resistencia de su dispositivo. Se puede observar que los cambios en su señal nominal son más regulares que los del presente trabajo, muy posiblemente debido a que se usó un equipo de medición continua de resistencia que minimiza la presencia de ruido, sin embargo, su dispositivo no cuenta con una tarjeta de procesamiento como la que se implementó en el presente trabajo, por lo que no cuenta con la portabilidad que el presente enfoque aborda.

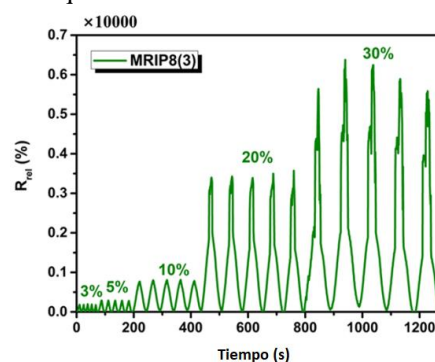


Figura 5. Rendimiento de detección de tensión de tela a base de celulosa recubierta con una capa de rGO y tinta de bolígrafo/PVA, variación de resistencia relativa de bajo diversas tensiones cíclicas a una velocidad de estiramiento de 20 mm·min<sup>-1</sup>. Recuperado de Siyi Bi, et al. (2020).

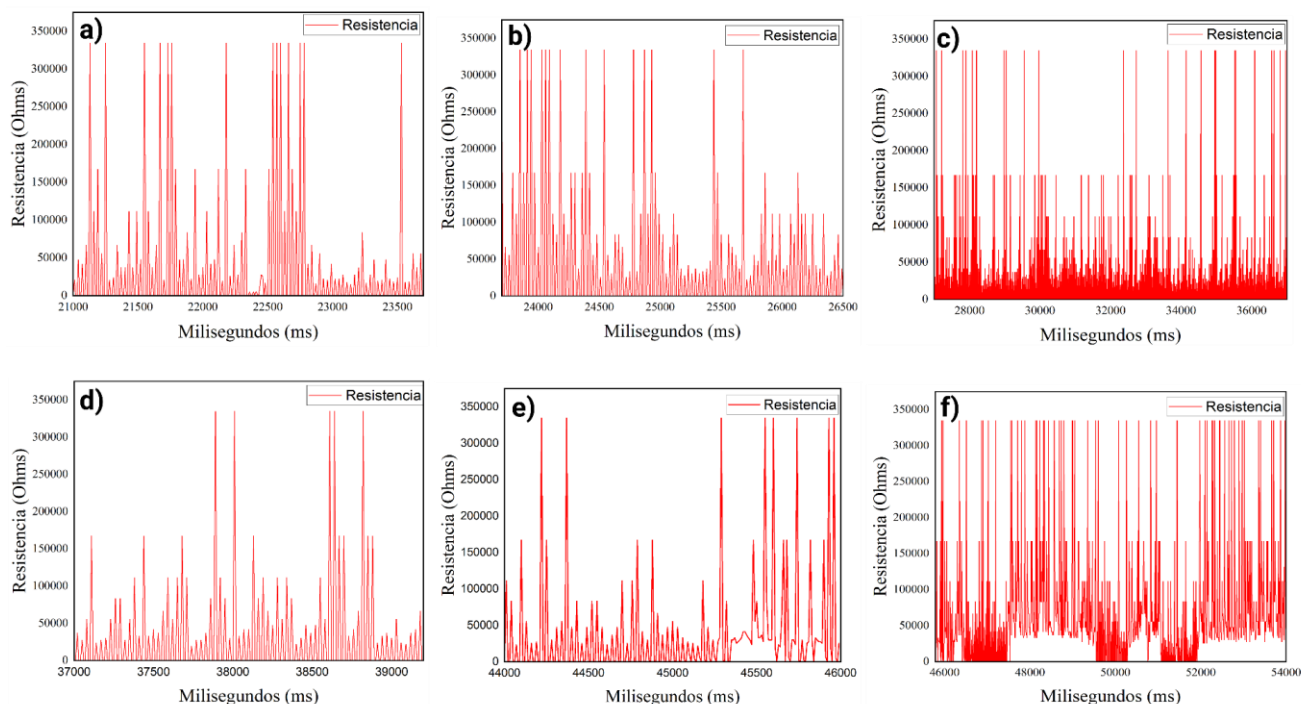


Figura 6.- Señales obtenidas del textil procesadas por la tarjeta Arduino LilyPad: A) señal del textil en reposo previo a la flexión, b) señal del textil durante la flexión, c) señal del textil después de la flexión, d) señal del textil en reposo previo al calentamiento, e) señal del textil durante el calentamiento, f) señal del textil durante el calentamiento.

## Conclusión

En este trabajo se desarrolló un prototipo de sensor *wearable* a base de rGO, cuya metodología involucró una adsorción de GO en tela Nylon 6-6, reducción sobre la tela y recubrimiento con PVA y CA. Fue incorporado a un circuito divisor de voltaje, el cual estaba conectado a una tarjeta de procesamiento de datos Arduino LilyPad la cual monitoreaba su resistencia al experimentar estímulos de movimiento y cambio en temperatura.

Los resultados obtenidos demuestran la capacidad del Nylon 6-6 con rGO adsorbido como textil inteligente, así como su posible aplicación en un dispositivo *wearable* al observarse una variación en el comportamiento de la resistencia del material al aplicar diferentes estímulos como flexión y temperatura, lo cual puede traducirse en un cambio detectable. La metodología empleada para la adsorción, reducción y recubrimiento del textil involucra un nivel de complejidad y tiempo de síntesis bajo. Esto a su vez conlleva la facilidad de producción de este dispositivo, haciendo atractivo un enfoque de producción a grandes escalas y, por ende, la posible comercialización.

Se requiere de más pruebas de caracterización química para determinar el grado de reducción que presenta el óxido de grafeno una vez adsorbido en el textil. No obstante, por medio de las técnicas presentadas en este trabajo se puede concluir que una reducción parcial tomó lugar, adquiriendo las propiedades eléctricas deseadas en el prototipo.

Sin embargo, el dispositivo aún requiere mejoras, ya que los resultados iniciales han revelado una relación de ruido/señal alta en el prototipo, caracterizada por la presencia de múltiples picos no deseados en los valores de resistencia. Se plantea que estas limitaciones se deban en parte a la naturaleza de la tarjeta de procesamiento de datos. A su vez, es necesario mejorar la estabilidad a largo plazo del dispositivo, perfeccionar el

procesamiento de datos para reducir el ruido y las perturbaciones en la señal, así como explorar alternativas en la placa de circuito impresa para optimizar la sensibilidad y precisión. Estos avances son esenciales para maximizar la eficacia del dispositivo.

En definitiva, este estudio no solo destaca la factibilidad técnica de la integración de tecnología en textiles, sino que también subraya su potencial transformador para la salud y el bienestar de la población mexicana. Al ofrecer un monitoreo en tiempo real más accesible y efectivo, estos dispositivos podrían marcar un hito en la detección temprana de enfermedades y, en última instancia, mejorar la calidad de vida de la población, por lo que se sugiere más investigación en el tema. De esta forma, este artículo sienta una base sólida para futuras investigaciones en el campo de textiles inteligentes y aplicaciones en el campo emergente de la tecnología *wearable*.

## Agradecimientos

Los autores del presente trabajo agradecen la contribución de Guadalupe Contreras Huesca y Daniela Alva Jordán durante las pruebas experimentales, así como a Gisela Yasmin González García, Andrés Josué Ramírez Colchero, Ana Sofía Armendáriz Ramos, Arantxa Lizeth Galván Domínguez, Mario Sánchez Espinoza, la Dra. Issis Claudette Romero Ibarra, a la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingenierías y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional y especialmente al Instituto de Nanotecnología Aplicada por su constante apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

## Referencias

- Al-Turjman, Fadi, Muhammad Hassan Nawaz, and Umit Deniz Ulusar. "Intelligence in the Internet of Medical Things era: A systematic review of current and future trends." *Computer Communications* 150 (2020): 644-660.
- Bautista Sánchez, María Guadalupe. 2017. «Desarrollo De Capacitores Electroquímicos Para Textiles Inteligentes Basados En Fosfato De

- Manganeso Y Nanofibras Poliméricas De Poliamida 6,6». Tesis de Maestría, Universidad Autónoma De Nuevo León.
- Bi, Siyi, Lei Hou, Wangwei Dong, and Yinxiang Lu. "Multifunctional and ultrasensitive-reduced graphene oxide and pen ink/polyvinyl alcohol-decorated modal/spandex fabric for high-performance *wearable* sensors." *ACS Applied Materials & Interfaces* 13, no. 1 (2020): 2100-2109.
- Córdova Villalobos, Jose Ángel, de Promoción S, de la Salud P. Plan de Prevención Clínica de las Enfermedades Crónicas: sobrepeso, riesgo cardiovascular y diabetes mellitus 2007-2012 y Sistema de Indicadores de Diabetes en México. *Rev Mex Cardiol.* 2009;20(1):42-5.
- Hou Z, Xuhua Liu, Mingwei Tian, Xueji Zhang, Lijun Qu, Tingting Fan & Jinlei Miao. Smart fibers and textiles for emerging clothe-based *wearable* electronics: materials, fabrications and applications [Internet]. Vol. 11. *Journal of Materials Chemistry A*; 2023. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/TA/D3TA02617E>
- INEGI. "comunicado de prensa núm. 61/21 27 de enero de 2021 página 1/4 comunicación social características de las defunciones registradas en méxico durante enero a agosto de 2020". 2021. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSoCiodemo/DefuncionesRegistradas2020\\_Pnles.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSoCiodemo/DefuncionesRegistradas2020_Pnles.pdf).
- Jin, Y., Chen, G., Lao, K. *et al.* Identifying human body states by using a flexible integrated sensor. *npj Flex Electron* 4, 28 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41528-020-00090-9>
- Khoriha, Nor, Eliysa Mohd Khori, Salmiati Salmiati, y Zulkifli Yusop. 2020. «A Combination of Waste Biomass Activated Carbon and Nylon Nanofiber for Removal of Triclosan from Aqueous...» ResearchGate, septiembre. [https://www.researchgate.net/publication/343180322\\_A\\_Combination\\_of\\_Waste\\_Biomass\\_Activated\\_Carbon\\_and\\_Nylon\\_Nanofiber\\_for\\_Removal\\_of\\_Triclosan\\_from\\_Aqueous\\_Solutions](https://www.researchgate.net/publication/343180322_A_Combination_of_Waste_Biomass_Activated_Carbon_and_Nylon_Nanofiber_for_Removal_of_Triclosan_from_Aqueous_Solutions)
- León Nataret, Y. A. (2016). "Síntesis Y Caracterización De Estructuras De Baja Dimensionalidad Del Grupo Ii-Vi Embebidas En Una Matriz De Óxido De Grafeno." [Tesis De Maestría]. Instituto Politécnico Nacional.
- Lunavictoria Beltrán, Miguel Ángel. 2020. «"Síntesis y caracterización de óxido de grafeno y óxido de grafeno reducido"». Tesis de Licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Macías Tello, Manuel Guadalupe. 2020. «Películas a base de nanocelulosa dopada con óxido de grafeno reducido y dióxido de titanio para su posible aplicación como material electroconductor». Tesis de Licenciatura, Universidad de Guadalajara
- Minitha CR, Rajendrakumar RT. Síntesis y caracterización de óxido de grafeno reducido. *RAM* 2013;678:56–60. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.678.56>.
- Pérez-Torres, Lisouli, María De Lourdes Ballesteros-Almanza, y G. Carbajal-De La Torre. 2021. «Obtención de membrana de grafeno a partir de shewanella oneidensis». *PÁDI boletín científico de ciencias básicas e ingenierías del ICBI* 9 (Especial 2): 134–38. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9iespecial2.7995>.
- Portillo A, editor. Evaluación del panorama actual de los Sistemas de Salud: Retos y oportunidades en México [Internet]. Vol. IX. *Gaceta Facultad de Medicina*; 12 de Junio de 2023. Disponible en: <https://gaceta.facmed.unam.mx/index.php/2023/06/14/evaluacion-del-panorama-actual-de-los-sistemas-de-salud-retos-y-oportunidades-en-mexico/>
- Premika Govindaraj, Azadeh Mirabedini, Xing Jin, Dennis Antiohos, Nisa Salim, Phil Aitchison, Jake Parker, Franz Konstantin Fuss, Nishar Hameed, editor. Health and safety perspectives of graphene in *wearables* and hybrid materials [Internet]. Vol. 155. *Journal of Materials Science & Technology*; 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030223001597>
- Sazonov E. *Wearable Sensors: Fundamentals, Implementation and Applications*. Academic Press; 2020.
- Siyi Bi, Lei Hou, Wangwei Dong, and Yinxiang Lu. Multifunctional and Ultrasensitive-Reduced Graphene Oxide and Pen Ink/Polyvinyl Alcohol-Decorated Modal/Spandex Fabric for High-Performance *wearable* Sensors [Internet]. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2021 13 (1), 2100-2109; 2021. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.0c21075>
- Xu, M., Qi, J., Li, F., & Zhang, Y. (2018). Highly stretchable strain sensors with reduced graphene oxide sensing liquids for wearable electronics. *Nanoscale*, 10(11), 5264–5271. doi:10.1039/c7nr09022f
- Yu H, Zhang B, Bulin C, Li R, Xing R. High-efficient Synthesis of Graphene Oxide Based on Improved Hummers Method [Internet]. Vol. 6, *Scientific Reports*. Springer Science and Business Media LLC; 2016. Available from: <http://dx.doi.org/10.1038/srep36143>
- Zhang H, Yu S. Impedance humidity sensors based on metal oxide semiconductors: Characteristics and mechanism. In: Tewary VK, Zhang Y, editors. In *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Modeling, Characterization, and Production of Nanomaterials* (Second Edition). Woodhead Publishing; 2023. p. 549-580. ISBN 9780128199053. Available from: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819905-3.00020-8>.