

## Textil funcional-inteligente para detección de CO a temperatura ambiente Functional-smart textile for CO detection at room temperature

M. Ortega-Avilés<sup>a,\*</sup>, C. Roque-Vázquez<sup>b</sup>, E. Torres-Santillán<sup>c</sup>, M. García-Hernández<sup>d</sup>, S. Mendoza-Acevedo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, Instituto Politécnico Nacional, C.P. 07738, CDMX, México.

<sup>b</sup> Escuela Superior de Ingeniería Textil, Instituto Politécnico Nacional, C.P. 07738, CDMX, México.

<sup>c</sup> Departamento de Formación Básica ESIQE, Instituto Politécnico Nacional, C.P. 07738, CDMX, México.

<sup>d</sup> CECyT 16 "Hidalgo", Instituto Politécnico Nacional, C.P. 42162, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

### Resumen

En este trabajo se propone el uso de un textil electrónico (e-Textil) para sensar CO a temperatura ambiente (RT), eliminando el calentador de la estructura básica de un sensor conductimétrico; reduciendo de esta forma el consumo de energía en dispositivos de monitoreo portátiles de larga duración. Se realizó la polimerización de la anilina por medio de la oxidación química, agregando nanopartículas de  $\text{Co}_3\text{O}_4$  y secciones de poliéster. Tanto los textiles como los compósitos en polvo, se caracterizaron por MEB, DRX, FTIR-RTA y eléctricamente. Imágenes de electrones retrodispersados, muestran la dispersión de aglomerados de nanopartículas de  $\text{Co}_3\text{O}_4$  en una matriz de polianilina (PANI), sobre la superficie de las fibras de poliéster; los resultados de DRX confirman la presencia de la PANI y la fase espinela de óxido de cobalto. Por FTIR-RTA se observan las bandas características de la PANI cuya intensidad aumenta y se desplazan hacia longitudes de onda menores con el contenido de  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . Al exponer los textiles funcionalizados al gas CO en flujo dinámico a RT, se observó que la muestra T-Pani-5br mostró la señal más intensa con tiempos de respuesta y recuperación de 109 y 110 segundos respectivamente a 110 cc de CO.

**Palabras Clave:** Sensor; CO; textil inteligente; PANI;  $\text{Co}_3\text{O}_4$ .

### Abstract

In this work, the use of an electronic textile (e-Textile) to sensing CO at room temperature (RT) is proposed, removing the heater from the basic structure of a conductimetric sensor, thereby reducing power consumption in long-lasting portable monitoring devices. The polymerization of the aniline was carried out by means of chemical oxidation, adding  $\text{Co}_3\text{O}_4$  nanoparticles and polyester sections. Both textiles and powder composites were characterized by MEB, DRX, FTIR-ATR and electrically. Backscattered electron images show the scattering of  $\text{Co}_3\text{O}_4$  nanoparticle agglomerates in a polyaniline matrix (PANI) on the surface of polyester fibres; XRD results confirm the presence of PANI and the cobalt oxide spinel phase. By FTIR-ATR, the characteristic bands of PANI are observed, whose intensity increases and they move towards lower wavelengths with the content of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . When exposing the functionalized textiles to CO gas in dynamic flow at RT, it was observed that the T-Pani-5br sample showed the strongest signal with response and recovery times of 109 and 111 seconds respectively at 100 cc of CO.

**Keywords:** Sensor; CO; smart textil; PANI;  $\text{Co}_3\text{O}_4$ .

### 1. Introducción

Identificar y monitorear la presencia de monóxido de carbono (CO), es fundamental para garantizar entornos seguros, desde la protección de los trabajadores hasta la prevención de desastres ambientales. A medida que se inhala aire que contiene este gas, la capacidad de la sangre para transportar oxígeno se reduce por causa de la formación de un

compuesto tóxico llamado carboxihemoglobina, pudiendo provocar dolores de cabeza, molestias, la posibilidad de colapso y hasta la muerte a concentraciones de 3000 ppm tras 20 min. de exposición (Adler, 1991; Environmental Protection Agency/EPA, 2023; Yaoyi He & Mingzhi Jiao, 2024, Tunga Salthammer, 2024). El monóxido de carbono puede causar daño severo a los humanos aún a bajas concentraciones, por exposición crónica; este gas se forma por la quema parcial de

\*Autor para la correspondencia: maortega@ipn.mx

**Correo electrónico:** maortega@ipn.mx (Mayahuel Ortega-Avilés), vazquezc725@gmail.com (Carolina Roque-Vázquez), etorress@ipn.mx (Ester Torres-Santillán), margarciah@ipn.mx (Margarita García-Hernández), smendozaa@ipn.mx (Salvador Mendoza-Acevedo).

combustible, en sectores industrial, automotriz, aeronáutica, alimenticia y en el hogar (electrodomésticos) (secretaría de salud ambiental/SSA1, 1993). Un ejemplo muy particular del rol del CO en espacios cerrados es el síndrome aerotóxico que se genera cuando en la cabina de un avión ocurre la exposición crónica a bajos niveles de compuestos tóxicos en el aire que incluyen el CO (G. Haegman et al., 2024). Los óxidos metálicos semiconductores (Metal Oxide Semiconductor/MOS), son usados ampliamente para la fabricación de sensores conductimétricos de CO como materiales sensibles, a causa de su velocidad de respuesta, estabilidad y bajo costo (Aswal & Gupta, 2007; Ou et al., 2022); estos, generalmente trabajan a temperaturas mayores a la temperatura ambiente y necesitan una fuente de calor que causa alto consumo de energía, lo cual supone un gran problema para los dispositivos de monitoreo portátiles a largo plazo como nodos de sensores inalámbricos o de punto de atención para aplicaciones del Internet de las Cosas. Actualmente es una tendencia incorporar sensores MOS de CO en teléfonos móviles u otros dispositivos portátiles para facilitar la medición de CO en el ambiente (Yaoyi He & Mingzhi Jiao, 2024; Khalili et al., 2024). En ese sentido, desarrollar sensores de gas flexibles basados en materiales textiles (hilos, telas, polímeros conductores (Conducting Polymer/CP), entre otros) ha tomado la vanguardia en la investigación debido a las propiedades multifuncionales que brindan ante estas exigencias, tales beneficios son: flexibilidad, bajo peso, gran estabilidad, facilidad de integración y portabilidad (Adak & Mukhopadhyay 2023; Bai & Shi, 2007; Patnaik, 2020; Yan et al., 2020).

En el sector textil, existe una clasificación de textiles como: funcionales e inteligentes. Adak define a los textiles funcionales como un tipo de tejido técnico, utilizados principalmente por sus atributos adicionales (antimicrobiano, resistentes a los rayos UV, ignífugos, hidrofóbicos, hidrofílicos y oleofílicos, repelentes de manchas, resistentes a las arrugas, antiolor, antiestático, etc.), más que por su valor estético (Adak, 2023). En cuanto a los textiles inteligentes, se describen como materiales capaces de detectar señales externas, a través de estímulos (mecánicos, térmicos, químicos, eléctricos o magnéticos) para dar una respuesta de forma adaptada (Koncar, 2019; Patnaik, 2020; Zhou & Li, 2023). Por otro lado, el compuesto multifuncional PANI-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ha sido estudiado en años recientes para aplicaciones en supercapacitores (Jianjun Wang et al., 2021), como agente fotocatalítico, antibacterial y anticorrosivo (Harizh Kumar et al., 2021), en aplicaciones optoelectrónicas (Mahmoud Al-Gharram et al., 2024); su comportamiento semiconductor tipo-p, conductividad eléctrica y propiedades magnéticas también han sido investigadas y se ha concluido que la incorporación de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> en una matriz de PANI afecta la conductividad eléctrica del nanocompuesto pudiendo ser útil para transformadores y baterías (Bharati Nandapure, et al., 2013). El diseño de nanoestructuras de PANI-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, para investigación de sus propiedades eléctricas es una realidad, logrando mejorar su conductividad eléctrica en AC y DC (Mahadeva et al., 2022). Se ha reportado la fabricación de un sensor interferométrico de CO basado en fibra óptica recubierta con una membrana sensible de PANI/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Jin Peng et al., 2019) y también de un sensor de CO fabricado con este nanocompuesto como película sobre vidrio utilizando un

dopante binario (T. Sen et al., 2016). El Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> es el MOS, que presenta mayor afinidad a la oxidación del CO, y que la PANI potencializa la detección de este gas a RT con poco tiempo de respuesta (Fratoddi et al., 2015; Quan et al., 2017; Song & Choi, 2013; Wong et al., 2020; Zhu et al., 2019). En este trabajo se evalúa el desempeño del material sensible sobre un sustrato textil de bajo peso, estable químicamente, resistente a esfuerzos mecánicos y apto para la aplicación debido a sus propiedades dieléctricas, creando un e-textil funcional e inteligente para sensado de CO, con el beneficio adicional de eliminar el calentador de la estructura de un sensor de gas de tipo semiconductor; utilizando una tela de poliéster como sustrato flexible con compósitos de Polianilina-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> como material activo. La funcionalización del e-Textil se desarrolló simultáneamente en la polimerización in-situ, basada en un acabado textil, como es el recubrimiento, directamente sobre la superficie del poliéster, utilizando el compuesto con diferentes concentraciones de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (0, 5, 10 y 15 % en peso, respecto al peso de la anilina antes de polimerizar). Para finalmente caracterizar los materiales química, estructural y eléctricamente.

## 2. Experimental

En un vaso de precipitados de 250 ml se colocaron 2.5 grs. de APS (persulfato de sodio) y se agregaron 50 ml de agua destilada y se llevó a agitación hasta disolución completa. Al mismo tiempo, en otro vaso de precipitados de 250 ml. se colocaron 50 ml. de HCl 0.5 M y se agregaron con pipeta de transferencia 2 ml. de anilina; se colocó el vaso en baño de hielo y se dejó en agitación por 1 hr.. Se introdujeron secciones de poliéster en el vaso con anilina y HCl y enseguida se agregó la solución de APS gota a gota con pipeta de transferencia y se tapó el vaso con un vidrio de reloj para dejar la reacción en baño de hielo con agitación por 1 hr.. Se preparó un embudo Buchner con matraz Kitasato para filtrar al vacío, utilizando filtros de microfibras de vidrio GF/F y se realizaron lavados con agua destilada y etanol varias veces. Las secciones de poliéster se recuperaron con unas pinzas una por una y se enjuagaron con agua destilada, para posteriormente ponerlas a secar en una caja Petri de vidrio en estufa a 50°C por 24 hrs.. Se realizó el mismo procedimiento para formar el compuesto PANI-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; agregando el Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanométrico en el vaso de precipitado con anilina y HCl, sonicando por 30 minutos en baño ultrasónico antes de colocar el vaso en baño de hielo con agitación magnética. Se formaron compósitos con 5, 10 y 15 % peso de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ver Figura 1.

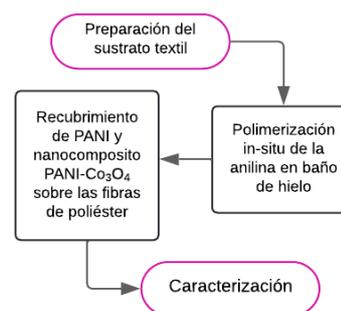


Figura 1. Polimerización in-situ de la anilina por el método de oxidación química en baño de hielo, para el desarrollo del e-Textil.

### 2.1. Caracterización morfológica y estructural

Para observar la morfología del poliéster original y el poliéster funcionalizado con PANI-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> se utilizó un microscopio electrónico de barrido de presión variable y cañón de emisión de campo, marca FEI, modelo Quanta 250 con detector de EDS marca Bruker, modelo modelo XFlash6160. La determinación de la fase y estructura cristalinas se realizó con un difractómetro marca Bruker, modelo D2 Phaser, usando radiación de Cu (1.54 Å) en un rango de 10 a 100 grados y paso de 0.02 grados.

### 2.2. Caracterización química estructural

La estructura química de los textiles funcionalizados y cada uno de sus componentes se realizó por medio de IRTF-RTA, con un espectrómetro infrarrojo marca Perkin Elmer, modelo Spectrum Two FTIR con longitud de onda de 532 nm. El análisis se realizó directamente sobre las muestras textiles funcionalizadas y sin funcionalizar debido a que el espectrómetro cuenta con el dispositivo de reflectancia total atenuada, que permite obtener espectros IR de muestras sin ningún tipo de preparación y sin preparar pastillas con KBr.

### 2.3. Caracterización eléctrica

La exposición a gas CO de los textiles funcionalizados, se llevó a cabo en un equipo experimental de caracterización eléctrica de sensores de gas diseñado y desarrollado en el Cinvestav CDMX, con capacidad para realizar experimentos en ambiente estático y flujo dinámico. Las mediciones de resistencia se llevaron a cabo con un multímetro digital marca Keytley, modelo 2001; el contacto eléctrico con el textil funcionalizado se hizo por medio de electrodos de plata. Las mediciones de cambio de resistencia se realizaron en flujo dinámico a temperatura ambiente y concentraciones de 100, 150 y 200 cc de CO.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Microscopia Electrónica de Barrido de Presión Variable (MEB-PV)

Se realizó la observación morfológica superficial de las muestras de poliéster con PANI y con el compuesto PANI-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> a 3 diferentes concentraciones (5, 10 y 15 % peso de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> respecto al peso del monómero anilina utilizado para polimerizar) como se muestra en la figura 2.

En la muestra T-PANI se observa el patrón del tejido perpendicular simple, característico de un tejido plano tipo tafetán de composición poliéster a baja amplificación (50 x) y la porosidad generada entre las partículas de PANI adheridas a las fibras del textil durante el proceso de polimerización química (5000 x), así como su dispersión en el tejido después de varios lavados con agua destilada y etanol. Se obtuvieron imágenes de electrones retrodispersos (contraste Z) en las muestras T-PANI-5br, T-PANI-10 y T-PANI-15, para distinguir la dispersión de nanopartículas del óxido semiconductor Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sobre las fibras. Las nanopartículas de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> se aglomeraron a pesar de que se mantuvo en baño

ultrasónico por 30 min. con el monómero anilina en HCl antes de la polimerización y luego en agitación magnética durante el proceso de polimerización in-situ. En las imágenes a 200 x y 2,500 x se logran visualizar la distribución del óxido entre la polianilina y sobre el textil, también después de varios lavados con agua destilada y etanol.

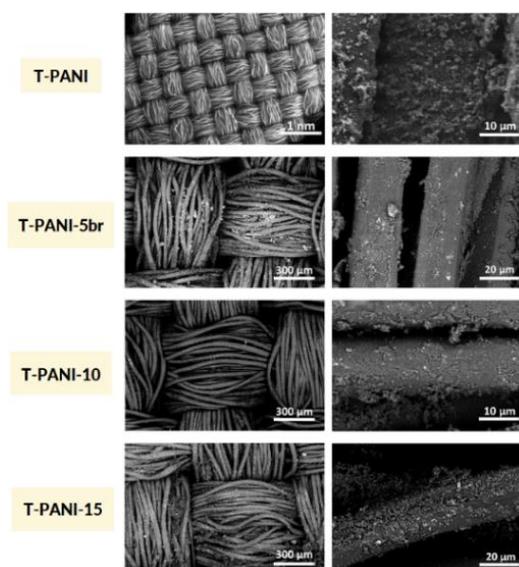


Figura 2. Micrografías de contraste Z, del nanocompuesto PANI-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sobre las fibras de poliéster.

### 3.2. Difracción de Rayos-X (DRX)

Por esta técnica de caracterización, se realizó un análisis cualitativo para identificar las fases cristalinas presentes en las muestras de polvos secos recuperados después del proceso de recubrimiento textil por polimerización química oxidativa in-situ, con las concentraciones de 5, 10 y 15 % peso de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. En la figura 3 se presentan los difractogramas del Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y del compuesto PANI-15 para hacer mas evidente la identificación del PANI en el compuesto.

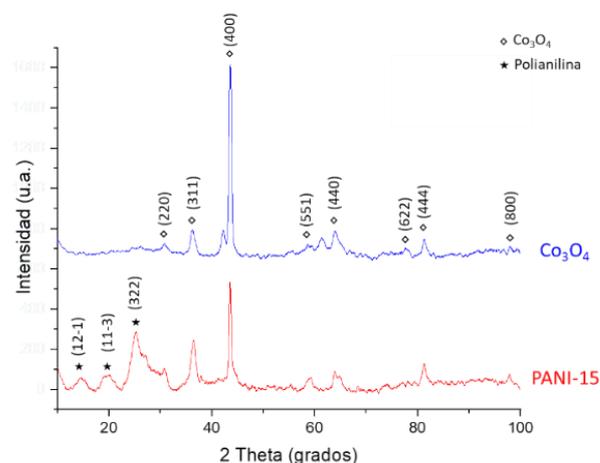
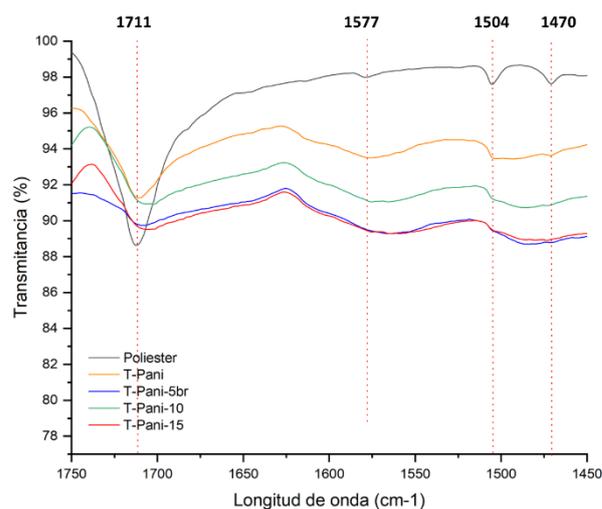


Figura 3. Difractogramas de DRX: a) nanopartículas de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> en polvo, b) compuesto PANI-15 en polvo.

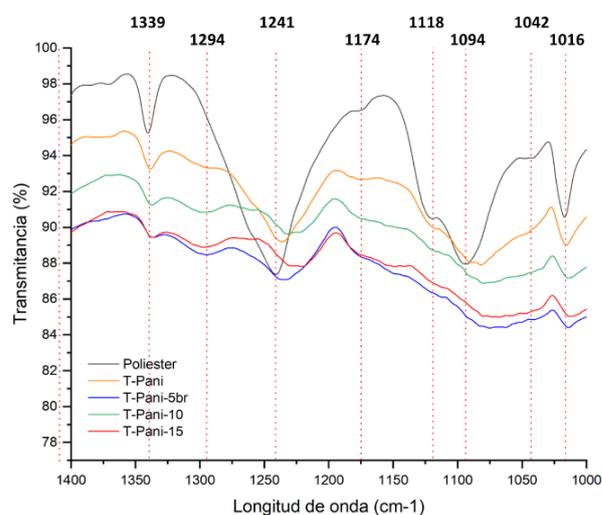
El patrón de difracción del polvo del óxido semiconductor tipo-p  $\text{Co}_3\text{O}_4$  con estructura cúbica tipo espinela presenta reflexiones de difracción en los valores 2-theta:  $30.94^\circ, 36.32^\circ, 43.68^\circ, 58.68^\circ, 63.96^\circ, 77.44^\circ, 81.29^\circ$  y  $98.29^\circ$ , que corresponden a los planos cristalográficos (220), (311), (400), (511), (440), (622), (444) y (800) respectivamente, según la tarjeta JCPDS 00-591-0031. En la muestra de polvo PANI-15, que contiene la mayor cantidad de óxido de cobalto, se identifican como fases cristalinas  $\text{Co}_3\text{O}_4$  y PANI; esta última presenta una estructura cristalina monoclinica que exhibe picos anchos a bajos ángulos (Sambhu Bhadra et al., 2008; Nandapure B., 2013); observándose experimentalmente las reflexiones en las posiciones 2 theta  $19.38^\circ, 25.92^\circ$  y  $30.80^\circ$  que corresponden a los planos cristalinos (12-1), (11-3) y (322) respectivamente.

### 3.3. Espectroscopía Infrarrojo con Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (IRTF-RTA)

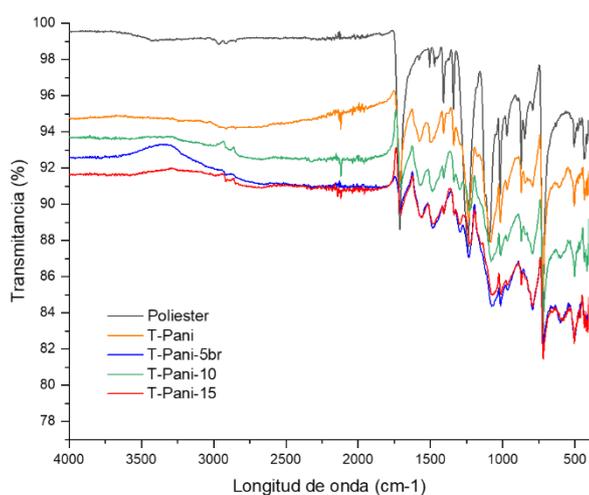
En los espectros de IRFT-RTA de la figura 4a, se observa que existen principalmente 2 diferencias en las muestras de poliéster y T-PANI respecto a las que contienen  $\text{Co}_3\text{O}_4$  y es que en la región de  $2800$  a  $2900 \text{ cm}^{-1}$  estas no muestran ninguna banda (figura 4a). Las muestras con PANI- $\text{Co}_3\text{O}_4$  muestran bandas en  $2919, 2885$  y  $2850 \text{ cm}^{-1}$  correspondientes a los grupos (C-H) o ( $-\text{NH}_2^+$ ), indican la presencia de unidades estructurales de fenazina en el polímero. En el rango de  $1600$  a  $1450 \text{ cm}^{-1}$  se identifican vibraciones de estiramiento  $\text{C}=\text{N}$ , deformación N-H atribuidas al anillo aromático, la vibración característica quinoide aparece en  $1595$  y  $1591 \text{ cm}^{-1}$  y la vibración del anillo benzoides se observa en  $1503 \text{ cm}^{-1}$ . Bandas adicionales aparecen en  $1454$  y alrededor de  $1500 \text{ cm}^{-1}$ . Las bandas que aparecen en el rango de  $1400$  a  $1200 \text{ cm}^{-1}$  son características de, estiramiento C-N de las minas aromáticas y se observa una fuerte absorción a  $1300 \text{ cm}^{-1}$  y dos absorciones débiles a  $1378$  y  $1250 \text{ cm}^{-1}$ . El rango de  $1200$  a  $500 \text{ cm}^{-1}$  comprende la flexión dentro y fuera del plano de los enlaces C-H en anillos aromáticos (Kellenberger, 2011).



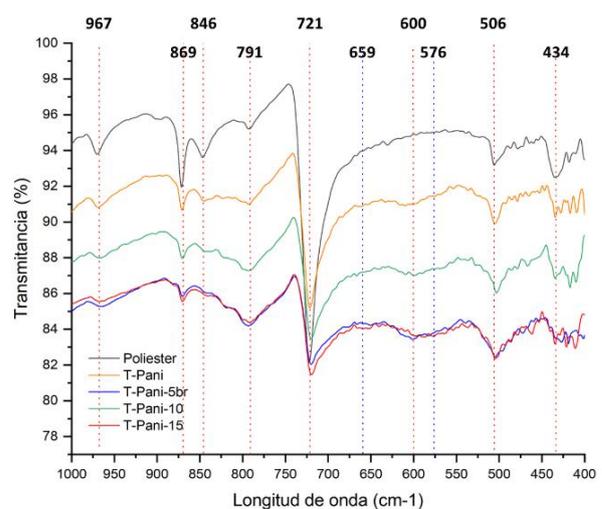
b)



c)



a)



d)

En las figuras 4b), 4c) y 4d) se observan a mayor detalle los espectros de las muestras de poliéster y textiles recubiertos y funcionalizados; en donde se distingue que existe una variación en las intensidades de algunas bandas, así como

Figura 4. Espectros IRFT-RTA de poliéster y poliéster funcionalizado: a) espectros generales, b) rango  $1750\text{-}1450 \text{ cm}^{-1}$ , c) rango  $1400\text{-}1000 \text{ cm}^{-1}$ , d) rango  $1000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ .

corrimiento hacia longitudes de onda menores de las bandas en  $1711$  y  $1577\text{ cm}^{-1}$  (figura 4b),  $1241$  y  $1094\text{ cm}^{-1}$  (figura 4c) principalmente, debido al contenido de nanopartículas de  $\text{Co}_3\text{O}_4$  en el compósito. En la figura 4b) se observa una banda intensa del poliéster en  $1711\text{ cm}^{-1}$  que se atenúa y desplaza hacia longitudes de onda menores, la banda de  $1577\text{ cm}^{-1}$  muestra poca intensidad en el espectro del poliéster que disminuye de intensidad en las otras muestras, las bandas en  $1504$  y  $1470\text{ cm}^{-1}$  son más intensas para el poliéster y se convierten en hombros en las muestras funcionalizadas. En la región de  $1400$  a  $1000\text{ cm}^{-1}$  (figura 4c), se observa el corrimiento de las bandas de  $1339$ ,  $1241\text{ cm}^{-1}$  hacia longitudes de onda menores y no se aprecia la banda de  $1294\text{ cm}^{-1}$  en el poliéster, debido a que pertenece al PANI, las bandas en  $1174$ ,  $1118$ ,  $1042\text{ cm}^{-1}$  aparecen como hombros en el espectro de poliéster y se atenúan en las muestras de textiles funcionalizados, además las bandas del poliéster en  $1094$  y  $1016\text{ cm}^{-1}$  se atenúan en el resto de los espectros. Finalmente, en la región de  $1000$  a  $400\text{ cm}^{-1}$  (figura 4d), se observa un hombro en  $576\text{ cm}^{-1}$  asociado a vibraciones de red  $\text{Co}^{3+}\text{-O}$  en los sitios tetraédricos de la espinela de cobalto que empieza a formar una banda ensanchada con la banda de  $600\text{ cm}^{-1}$  al aumentar en contenido de óxido de cobalto, y una banda ancha en  $659\text{ cm}^{-1}$ , que está asociada a vibraciones de red  $\text{Co}^{2+}\text{-O}$  en los sitios octaédricos de la estructura cristalina del  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , se empieza a formar en la muestra T-Pani-15, la cual contiene el mayor contenido de  $\text{Co}_3\text{O}_4$  en el nanocompósito PANI- $\text{Co}_3\text{O}_4$ .

### 3.4. Caracterización eléctrica (Exposición a CO en flujo dinámico)

El desempeño de detección de CO de los textiles funcionalizados con PANI y compósitos PANI- $\text{Co}_3\text{O}_4$  fue evaluado a través de cambios de resistencia. En la figura 5 se muestra la respuesta dinámica de sensado a concentraciones de  $100\text{ cc}$ ,  $150\text{ cc}$  y  $200\text{ cc}$  de CO a temperatura ambiente; se inicia la rutina inyectando nitrógeno por  $180$  segundos, lo que provoca un aumento en la resistencia, después de  $120$  segundos se inyecta el gas CO por  $120$  segundos y se observa el comportamiento característico de un semiconductor tipo-p al entrar en contacto con un gas reductor (CO), disminuyendo la resistencia al oxidar el CO en su superficie después de adsorber oxígeno formando  $\text{CO}_2$ , este proceso ocurre en cada escalón formado en las curvas de respuesta dinámica. La respuesta después de la exposición al CO y la reversibilidad cuando se purga con nitrógeno son buenas. Los tiempos de respuesta y recuperación para las concentraciones de  $100\text{cc}$ ,  $200\text{cc}$  y  $300\text{cc}$  de CO fueron iguales para las 4 muestras analizadas  $109$  y  $111$  seg.;  $106$  y  $127$  seg., y  $101$  y  $145$  seg. respectivamente. Por otro lado, la muestra T-PANI-5br mostró la señal más intensa y las resistencias máximas registradas después de inyectar nitrógeno fueron T-PANI-5br:  $30.6 \times 10^3$ ,  $32.2 \times 10^3$  y  $34.9 \times 10^3\ \Omega$ ; T-PANI:  $7.1 \times 10^3$ ,  $7.3 \times 10^3$  y  $7.9 \times 10^3\ \Omega$ ; T-PANI-15:  $4.8 \times 10^3$ ,  $5.6 \times 10^3$  y  $6.3 \times 10^3\ \Omega$ ; T-PANI-10:  $4.1 \times 10^3$ ,  $4.4 \times 10^3$  y  $4.7 \times 10^3\ \Omega$  (recordar que la resistencia disminuye al entrar en contacto con el CO. La diferencia en la intensidad de señales de respuesta entre la muestra T-PANI-5br y el resto de las muestras fue, que después de la reacción en baño de hielo, se dejó el vaso de precipitado en refrigerador por  $24$  hrs. con las secciones de poliéster. Esta modificación en la síntesis redujo el crecimiento de las partículas de PANI por el efecto de la

temperatura baja durante tiempo prolongado, resultando la formación de partículas de PANI más pequeñas que en las otras muestras, lo cual potenció el desempeño de esta muestra T-PANI-5br; al aumentar la superficie de contacto del CO con el compósito aumentó la señal de respuesta y por lo tanto el cambio de resistencia es mayor que el de las otras muestras a concentraciones de  $0$ ,  $10$  y  $15\%$  en peso de  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . T. Shen reportó la fabricación de un sensor de gas CO utilizando un nanocompósito de PANI- $\text{Co}_3\text{O}_4$ ; sin embargo, los resultados reportados no son comparables a los obtenidos en este trabajo porque el equipo utilizado en este trabajo limita los flujos de gas a concentraciones a partir de  $100\text{cc}$  por las características del flujómetro y T. Shen reporta resultados a  $50$  y  $75\text{ ppm}$  de CO de películas depositadas sobre sustrato de vidrio (T. Sen et al., 2016).

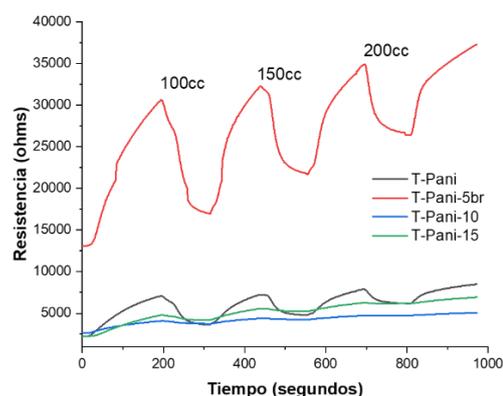


Figura 5. Curva de respuesta dinámica de los textiles, a) T-PANI, b) T-PANI-5br, c) T-PANI-10, d) T-PANI-15, a CO en el rango de  $100$ ,  $150$  y  $200\text{ cc}$  a RT.

## 4. Conclusiones

Se funcionalizó el textil poliéster con PANI y compósitos PANI- $\text{Co}_3\text{O}_4$  a diferentes concentraciones por medio de polimerización oxidativa in-situ. Los resultados de la caracterización por MEB validan la dispersión del  $\text{Co}_3\text{O}_4$  en el nanocompósito sobre el poliéster; por DRX se identificaron las fases PANI y  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , y por IRTF-RTA se observan efectos de corrimientos de bandas hacia longitudes de onda menores debido a la presencia del  $\text{Co}_3\text{O}_4$  en los compósitos, además de que hay indicios de la aparición de bandas correspondientes a vibraciones de red de este óxido en  $659$  y  $576\text{ cm}^{-1}$ . Por medio de las curvas de respuesta dinámica de los textiles a la exposición a gas CO a temperatura ambiente se concluye que la muestra T-PANI-5br presenta el mejor desempeño seguido de T-PANI, T-PANI-15 y T-PANI-10, esto debido a que las partículas de PANI en la primera presentan los tamaños más pequeños y por consecuencia mayor área superficial de contacto con el gas CO. El uso de los textiles funcionalizados-inteligentes presentados en este trabajo, simplificaría la estructura de un sensor conductimétrico, eliminando el calentador de la estructura básica para su buen funcionamiento; reduciendo de esta forma el consumo de energía en dispositivos de monitoreo portátiles de larga duración. Se propone refinar el tamaño de partícula de la PANI y mejorar la dispersión de la espinela de cobalto sobre la

superficie de las fibras del textil para potenciar la señal de respuesta de detección.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la SIP-IPN por el soporte para la realización de este trabajo con el apoyo de los proyectos 20241424, 20242180 y 20241160.

## Referencias

- Adak, B., Mukhopadhyay, S. (Eds.). (2023). Smart and functional textiles. Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston.
- Adler, R. G. (1991). Carbon monoxide in workplace atmospheres. Salt Lake City, Utah: OSHA.
- Al-Gharram, M., AlZoubi, T. (2024). Electrochemical synthesis of a novel hybrid nanocomposite based on Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles embedded in PANI-camphor sulfonic Acid matrix for optoelectronic applications. *Ceramics International*, 50, 5473-5482. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.11.300>
- Aswal, D., Gupta, S. K. (Eds.). (2007). Science and technology of chemiresistor gas sensors. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Bai, H., Shi, G. (2007). Gas sensors based on conducting polymers. *Sensors*, 7, 267-307.
- Bhadra, S., Khashtgir, D. (2008). Determination of crystal structure of polyaniline and substituted polyanilines through X-ray diffraction analysis. *Polymer Testing*, 27, 851-857. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.07.002>
- Environmental protection agency. (2023). Calidad del aire interior. Monóxido de carbono. <https://espanol.epa.gov/cai/monoxido-de-carbono>
- Fratoddi, I., Venditti, I., Cametti, C., Russo, M. V. (2015). Chemiresistive polyaniline-based gas sensors: A mini review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 220, 534-548. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.05.107>
- Hageman, G., Van-Broekhuizen, P., Nihom, J. (2024). The role of carbon monoxide in aerotoxic syndrome. *Neurotoxicology*, 100, 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2023.12.008>
- Hai, Z., Gao, L., Zhang, Q., Xu, H., Cui, D., Zhang, Z., Tsoukalas, D., Tang, J., Yan, S., Xue, C. (2016). Facile synthesis of core-shell structured PANI-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites with superior electrochemical performance in supercapacitors. *Applied Surface Science*, 361, 57-62. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.11.171>
- He, Y., Jiao, M. (2024). A mini-review on metal oxide semiconductor gas sensors for carbon monoxide detection at room temperature. *Chemosensors*, 12(4), 55. <https://doi.org/10.3390/chemosensors12040055>
- Kellenberger, A., Dmitrieva, E., Dunsch, L. (2011). The stabilization of charged states at phenazine-like units in polyaniline under p-doping: an in-situ ATR-FTIR spectroelectrochemical study. *Phys.Chem.Chem.Phys*, 13, 3411-3420. <https://doi.org/10.1039/c0cp01264e>
- Khalili, S., Majidi, M., Bahrami, M., Roshanaei, M., Madrakian, T., Afkhami, A. (2024). A portable gas sensor based on In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@CuO P-N heterojunction connected via wi-fi to a smartphone for real-time carbon monoxide determination. *Scientific Reports*, 14, 13594. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64534-2>
- Koncar, V. (2019). Smart textiles for in situ monitoring of composites. The Textile Institute Book Series, Elsevier Ltd.
- Kumar, H., Luthra, M., Punia, M., Singh, R. M. (2021). Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PANI nanocomposites as a photocatalytic, antibacterial and anticorrosive agent: experimental and theoretical approach. *Colloid and Interface Science Communications*, 45, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100512>
- Mahadeva., Inamdar, H. K., Ashwajeet, J. S., Sridhar, Chakradhar. (2022). Desing of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Polyaniline nanostructures for structural and electrical research. *Neuro Quantology*, 20, 581-585. <https://doi.org/10.14704/NQ.2022.20.13.NQ88076>
- Nandapure, B., Kondawar, S., Salunkhe, M., Nandapure, A. (2013). Nanostructure cobalt oxide reinforced conductive and magnetic polyaniline nanocomposites. *Journal of Composite Materials*, 47, 559-567. <https://doi.org/10.1177/0021998312442559>
- Ou, L., Liu, M., Zhu, L., Zhang, D. W., Lu, H. (2022). Recent progress on flexible room-temperature gas sensors based on metal oxide semiconductor. *Review Nano-Micro Letters*, 14, 1-42. <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00956-9>
- Patnaik, S. (2020). Smart textiles and recent developments. En A. Patnaik (Ed.), *fibres to smart textiles: advances in manufacturing, technologies, and applications* (pp.331-340). Textile Instituto Professional Publications Series.
- Peng, J., Feng, W., Yang, X., Huang, G., Liu, S. (2019). Dual fabry-pérot Interferometric carbon monoxide sensor based on the PANI/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sensitive membrane-coated fibre tip. *De Gruyter*, 74, 101-107. <https://doi.org/10.1515/zna-2018-0453>
- Quan, L., Sun, J., Bai, S., Luo, R., Li, D., Chen, A., Liu, C. C. (2017). A flexible sensor based on polyaniline hybrid using ZnO as template and sensing properties to triethylamine at room temperature. *Applied Surface Science*, 399, 583-591.
- Salthammer, T. (2024). Carbon monoxide as an indicator of indoor air quality. *Environmental Science: Atmospheres*, 4, 291-305. <https://doi.org/10.1039/d4ea00006d>
- Secretaría de Salud (SSA). (1993). **NOM-021-SSA1-1993**: Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (co). valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (co) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Ciudad de México: SSA.
- Sen, T., Shimpi, N. G., Mishra, S. (2016). Room temperature CO sensing by polyaniline/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite. *Journal of Applied Polymer Science*, 42, 8-8. <https://doi.org/10.1002/app.44115>
- Song, E., Choi, J.W. (2013). Conducting polyaniline nanowire and its applications in chemiresistive sensing. *Nanomaterials*, 3, 498-523. <https://doi.org/10.3390/nano3030498>
- Tang, M., Zhang, D., Sun, Y., Chen, Q., Chen, Y., Xi, G., Wang, Z., Shao, X. (2024). CVD-fabricated Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Co<sub>3</sub>S<sub>2</sub> heterojunction for ultra-sensitive detection of CO in SF<sub>6</sub> discharge decomposition products. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 401, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134968>
- Wang, J., Xiao, G., Zhang, T., Hao, S., Jia, Z., Li, Y. (2021). Fabrication of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/polyaniline-based carbon electrode for high-performance supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, 863, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158071>
- Wong, Y. C., Ang, B. C., Haseeb, A. S. M. A., Baharuddin, A. A., Wong, Y. H. (2020). Review-conducting polymers as chemiresistive gas sensing materials: a review. *Journal of The Electrochemical Society*, 167, 1-16. <https://doi.org/10.1149/2.0032003JES>
- Yan, Y., Yang, G., Xu, J., Zhang, M., Kuo, C., Wang, S. (2020). Conducting polymer-inorganic nanocomposite-based gas sensors: a review. *Science and Technology of Advanced Materials*, 21, 768-786. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1820845>
- Zhou, Y., Li, Z. (Eds.) (2023). Smart textile and polymer materials. MDPI, st. Alban-Anlage 66.
- Zhu, C., Cakmak, U., Sheikhejad, O., Cheng, X., Zhang, X., Xu, Y., Gao, S., Zhao, H., Huo, L., Major, Z. (2019). One step synthesis of PANI/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites and flexible film for enhanced NH<sub>3</sub> sensing performance at room temperature. *Nanotechnology*, 30, 7pp. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab076e>