

NANOSENSOR DE NiCo₂O₄ PARA LA DETECCIÓN DE ETANOL**NiCo₂O₄ NANOSENSOR FOR ETHANOL DETECTION**

Solís-Guerrero M.E.A.¹, Palafox-Corona A.¹, Courel-Piedrahita M.¹, Ojeda-Martínez M.¹,
Rodríguez- Osorio. K.G.¹, Pérez-Centeno A.², Soto-García, V.M.², Morán-Lázaro J.P.^{1,*}

¹Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, Ameca,
Jalisco 46600, México.

²Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de
Guadalajara, Guadalajara, Jalisco 44430, México.

*pablo.moran@academicos.udg.mx

Artículo Científico

Publicado: 31 de julio 2025

RESUMEN

La detección de etanol es crucial en diversas industrias, como la química, la pintura, la cosmética y la de laboratorio, donde la seguridad laboral es una prioridad máxima. Por lo tanto, el desarrollo de materiales con buenas capacidades de detección de etanol sigue siendo un gran desafío. En este estudio, se llevó a cabo la síntesis, caracterización y análisis de las propiedades de detección de vapor de etanol de nanopartículas de la cobaltita de níquel (NiCo₂O₄). Estas nanopartículas se obtuvieron utilizando un método coloidal asistido por microondas. La fase cristalina de NiCo₂O₄ se confirmó mediante difracción de rayos X después de una calcinación a 400 °C. Además, microscopía electrónica de transmisión reveló un tamaño promedio de nanopartícula de 7.7 nm. Las propiedades ópticas de las nanopartículas se examinaron mediante espectroscopia UV-visible y mostraron absorción en las regiones ultravioleta y visible con una energía de banda prohibida de 2.2 eV.

Utilizando las nanopartículas de NiCo₂O₄, se fabricó un dispositivo sensor que mostró una respuesta repetible, reproducible y estable al vapor de etanol a una temperatura de funcionamiento de 120 °C. El nanosensor mostró tiempos de respuesta y recuperación de 6.50 s y 92.7 s, respectivamente. Además, demostró una excelente capacidad para detectar concentraciones bajas de etanol en el rango de 0.5 a 5 ppm. Estos resultados sugieren que las nanopartículas de NiCo₂O₄ son prometedoras para aplicaciones en dispositivos sensores para la detección de etanol.

Palabras clave: Etanol; nanopartículas; sensor.

ABSTRACT

Detection of ethanol is crucial in various industries such as chemicals, paints, cosmetics, and laboratory industries where occupational safety is a top priority. Therefore, developing materials with good ethanol sensing capabilities remains a major challenge. In this study, the synthesis, characterization and analysis of

the ethanol vapor detection properties of nickel cobaltite (NiCo_2O_4) nanoparticles were carried out. These nanoparticles were obtained using a microwave-assisted colloidal method. The crystalline phase of NiCo_2O_4 was confirmed by X-ray diffraction after calcination at 400 °C. Additionally, transmission electron microscopy revealed an average nanoparticle size of 7.7 nm. The optical properties of the nanoparticles were examined using UV-visible spectroscopy and showed absorption in the ultraviolet and visible regions with a band gap energy of 2.2 eV. Using NiCo_2O_4 nanoparticles, a sensor device was fabricated that showed repeatable, reproducible and stable response to ethanol vapor at an operating temperature of 120 °C. The nanosensor showed response and recovery times of 6.50 s and 92.7 s, respectively. In addition, it demonstrated excellent ability to detect low ethanol concentrations in the range of 0.5 to 5 ppm. These results suggest that NiCo_2O_4 nanoparticles are promising for applications in sensor devices for ethanol detection.

Keywords: Ethanol; nanoparticles; sensor.

INTRODUCCION

En entornos laborales donde los químicos volátiles son una preocupación, garantizar la seguridad ocupacional es crucial. En consecuencia, la detección y supervisión de gases como el etanol se convierte en una prioridad tanto en laboratorios como en industrias alimentarias y cosméticas [1]. Desarrollar sensores capaces de detectar concentraciones mínimas de

etanol representa un desafío considerable. Los sensores de gases basados en semiconductores de óxido metálico exhiben cambios en su resistencia eléctrica en respuesta a la atmósfera circundante y han sido a la fecha los más usados en aplicaciones prácticas debido a su bajo costo, sensibilidad y la facilidad para emplearse en plataformas electrónicas [2]. Entre los semiconductores más estudiados y aplicados están los compuestos binarios como el dióxido de estaño (SnO_2), el dióxido de titanio (TiO_2) y el trióxido de wolframio (WO_3) [3-5]. Por lo tanto, desarrollar materiales nuevos en el campo de los sensores de gases con buenas propiedades de detección sigue siendo un tema de interés.

La cobaltita de níquel es un compuesto ternario semiconductor que posee una estructura tipo espinela, en donde, Ni es un ion divalente ubicado en un sitio tetraédrico y el Co es un ion trivalente que ocupa un octaédrico [6]. La cobaltita de níquel es un compuesto que se ha empleado en supercapacitores, como electrodo en baterías y en catálisis, debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas [7]. También, en el campo de los sensores se ha empleado en la detección amoníaco, dióxido de nitrógeno y algunos alcoholes [8-10]. Sin embargo, incrementar las investigaciones de la cobaltita en el campo de los sensores sigue siendo un reto.

En este trabajo, nanopartículas de NiCo_2O_4 fueron sintetizadas por un método coloidal asistido por microondas y

caracterizadas por difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés), microscopía electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) y espectroscopia ultravioleta-visible (UV-vis). El dispositivo sensor fabricado con las nanopartículas de NiCo_2O_4 mostró un buen rendimiento en la detección de etanol, incluyendo temperatura baja de operación, tiempo de respuesta corto, repetibilidad, selectividad y capacidad en detectar bajas concentraciones de etanol.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Síntesis de las nanopartículas de NiCo_2O_4 . Se empleó el método coloidal asistido por microondas para sintetizar nanopartículas de cobaltita de níquel (**Figura 1**). Para llevarlo a cabo, se prepararon tres soluciones utilizando 5 mL de etilenglicol en cada solución. La primera solución se preparó con 3 mmol de AOT (di 2-etilhexil sulfosuccinato de sodio), la segunda con 5 mmol de nitrato de níquel hexahidratado ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), y la tercera, con 10 mmol de nitrato de cobalto hexahidratado ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Después de obtener las tres soluciones completamente diluidas, la solución de nitrato de cobalto se añadió gota a gota a la solución de nitrato de níquel. Posteriormente, se agregó la solución de AOT, formado así, una solución coloidal que se mantuvo en agitación constante a 300 rpm durante 24 h. Para remover el solvente, se utilizó un proceso de evaporación mediante microondas, empleando un horno Whirlpool modelo WM13115 (1500 W).

En este proceso, la solución coloidal fue irradiada con microondas de forma intermitente (ciclos de 6 s durante 3 h). El material precursor obtenido se sometió a un secado a 200 °C por 8 horas, usando una rampa de calentamiento de 100 °C/h. Finalmente, el polvo obtenido fue calcinado de 300 a 500 °C. Los tratamientos térmicos fueron realizados en una mufla Novatech modelo MD-12 con control programable.

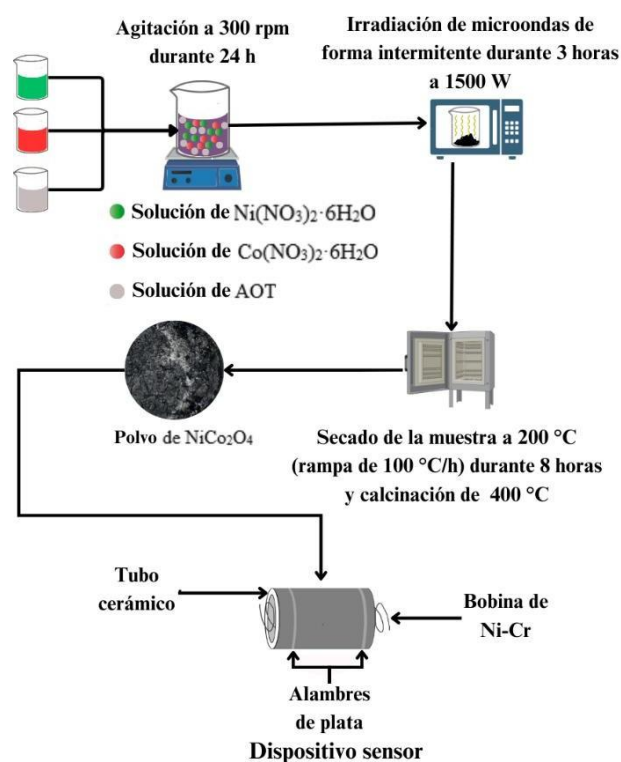


Figura 1 Diagrama de síntesis y diseño de dispositivo nanosensor

Caracterización estructural y óptica. Para determinar la estructura cristalina de la muestra de cobaltita de níquel se realizó un análisis por XRD. El estudio se realizó utilizando un difractómetro Panalytical modelo Empyrean, y las mediciones se colectaron en un rango de $2\theta = 10^\circ$ a 70° . Para confirmar la presencia de las

nanopartículas se usó la técnica de TEM, empleando un equipo JEOL modelo JEM 1010, operado a un voltaje de aceleración de 100 kV. Finalmente, las propiedades ópticas, como la absorbancia y la energía de la banda prohibida, se estimaron mediante un espectrofotómetro Shimadzu UV3600, registrando los datos en una longitud de onda de 200 a 1000 nm.

Fabricación del dispositivo nanosensor y mediciones de detección. El dispositivo nanosensor se diseñó con un tubo cerámico de 5 mm de diámetro y 1.5 mm de longitud al cual se le insertó en su interior una bobina de Ni-Cr. La bobina tuvo la función de proporcionar la temperatura de operación del sensor. Como terminales eléctricas del sensor se colocaron un par de alambres de plata en los extremos del tubo cerámico. Para la película sensible, se preparó una pasta con las nanopartículas de NiCo_2O_4 y etilenglicol, y luego, fue depositada sobre el tubo cerámico mediante la técnica de recubrimiento con brocha, hasta formar una película gruesa de $\sim 500 \mu\text{m}$. Para eliminar el etilenglicol, la película fue calentada a 300°C por 2 h. La **Figura 1** muestra un esquema del dispositivo nanosensor.

Para las mediciones de detección de etanol, el nanosensor de NiCo_2O_4 se colocó en el interior de un matraz de tres bocas (500 mL). Luego, diferentes concentraciones de etanol (0.5 a 5 ppm) fueron inyectadas con una microjeringa a una zona caliente del matraz. Los cambios en la resistencia eléctrica del nanosensor, producidos por la exposición al vapor de etanol y al aire, fueron registrados con una

unidad de adquisición de datos (Keysight, 34970), la cual fue programada en LabView de National Instruments. La respuesta del sensor de NiCo_2O_4 fue calculada mediante:

$$S = \frac{R_g}{R_a} \quad (1)$$

donde R_g es la resistencia del nanosensor en presencia del etanol y R_a es la resistencia en aire. Los tiempos de respuesta (t_{res}) y recuperación (t_{rec}) del nanosensor se definieron como el tiempo requerido para alcanzar el 90% de la resistencia máxima en etanol y aire, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de NiCo_2O_4 sintetizadas por el método coloidal asistido por microondas y calcinadas a diferentes temperaturas fueron analizadas por XRD y los resultados se presentan en la **Figura 2**. Como se observa en la figura, la muestra calcinada a 300°C exhibe algunos picos de difracción correspondientes a la cobaltita de níquel, localizados a 31.14° , 36.69° , 44.62° , 59.09° y 64.98° . Mientras, la muestra calcinada a 400°C presenta dos picos adicionales de baja intensidad ubicados a 18.90° y 55.43° . De esta forma, la fase cristalina de la espinela de NiCo_2O_4 fue identificada a 400°C , usando el archivo No. 20-0781 de la base de datos JCPDF. Sin embargo, la muestra calcinada a 500°C exhibió una fase secundaria adicional, cuyos picos (43.32° y 62.81°) se indexaron a NiO . Por otra parte, la estimación del tamaño de cristalito de la muestra a 400°C fue

determinado con la ecuación de Scherrer [11], obteniendo un valor de 6.6 nm. Estos resultados son consistentes con los reportados en la literatura. Por ejemplo, Zheng et al. [12] sintetizaron mediante un proceso solvotermal esferas huecas porosas de NiCo_2O_4 con nanoestructuras de doble capa a una temperatura de calcinación de 450 °C. Por su parte, Hu et al. [9] obtuvieron nanoflores de NiCo_2O_4 mediante el método hidrotermal a una temperatura de 500 °C. Por lo tanto, el método coloidal asistido por microondas es un proceso efectivo y económico para producir nanopartículas de NiCo_2O_4 a una temperatura relativamente baja (400 °C).

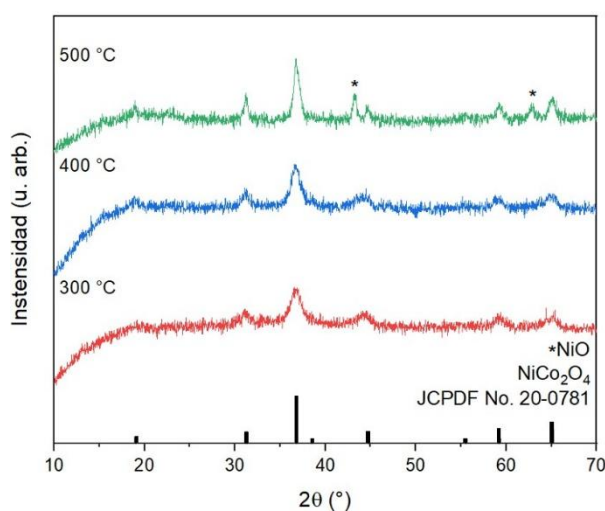


Figura 2 Patrón de difracción de rayos X a diferentes temperaturas de calcinación de NiCo_2O_4

Las propiedades ópticas de la cobaltita de níquel fueron estudiadas por espectroscopia UV-vis. Como se puede ver en la **Figura 3**, NiCo_2O_4 presentó una fuerte absorción óptica dentro de la región ultravioleta y la

región visible (200-800 nm). Del mismo modo, presentó un borde de absorción óptica de alrededor de los 820 nm.

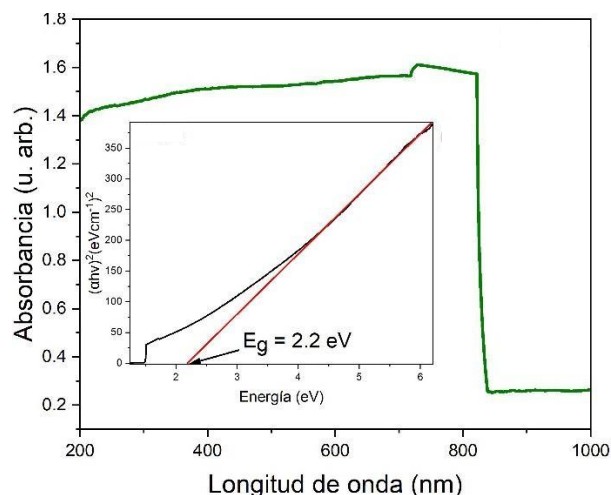


Figura 3 a) Espectro de absorción UV-vis de NiCo_2O_4 y b) gráfico de Tauc para la estimación de la energía de la banda prohibida

Estos resultados son similares con los reportados por Lee et al. [13] en donde sintetizaron la cobaltita de níquel dopada con Mn por un proceso asistido por ultrasonido para su aplicación en electrodos. Por otro lado, la estimación de la energía de la banda prohibida se obtuvo mediante la ecuación de Tauc [14]:

$$(\alpha h\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (2)$$

en donde α es el coeficiente de absorción, $h\nu$ es la energía del fotón, A es una constante, E_g corresponde a la energía de la banda prohibida y n es el tipo de transición ($n = 2$ para transiciones directas permitidas y $n = 1/2$ para transiciones indirectas permitidas).

En este trabajo se consideró $n = 2$. De este modo, la figura inserta en la **Figura 3** muestra el gráfico de Tauc para la estimación de la energía la banda prohibida, la cual fue de 2.2 eV. Este valor es consistente con los encontrados por Yan et al. [15] quienes sintetizaron un catalizador compuesto de $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{CdS}$ presentando una energía de la banda prohibida de 2.34 eV. De forma similar, Jia et al. [16] sintetizaron nanocables de NiCo_2O_4 con una energía de la banda prohibida de 2.3 eV. Por lo tanto, con base en los valores obtenidos de E_g , se puede decir que el material NiCo_2O_4 se encuentra dentro de los valores promedio de los semiconductores.

Para conocer dispersión de tamaño y confirmar la presencia de nanopartículas de NiCo_2O_4 , se empleó el análisis TEM. Se confirmó la presencia de nanopartículas aglomeradas con forma irregular (**Figura 4a**); la distribución de tamaño de la partícula fue de 4 a 18 nm y un tamaño promedio de 7.7 ± 2.0 nm (**Figura 4b**). De este modo, se confirma que el método coloidal asistido por microondas tiene la capacidad de sintetizar partículas con tamaño nanométrico. La formación de las nanopartículas de NiCo_2O_4 puede ocurrir a través de un proceso de nucleación y crecimiento [17]. La nucleación puede iniciarse al mezclar la solución de níquel, cobalto y AOT, mientras que el crecimiento de las nanopartículas tendría lugar durante la agitación de la solución coloidal [18].

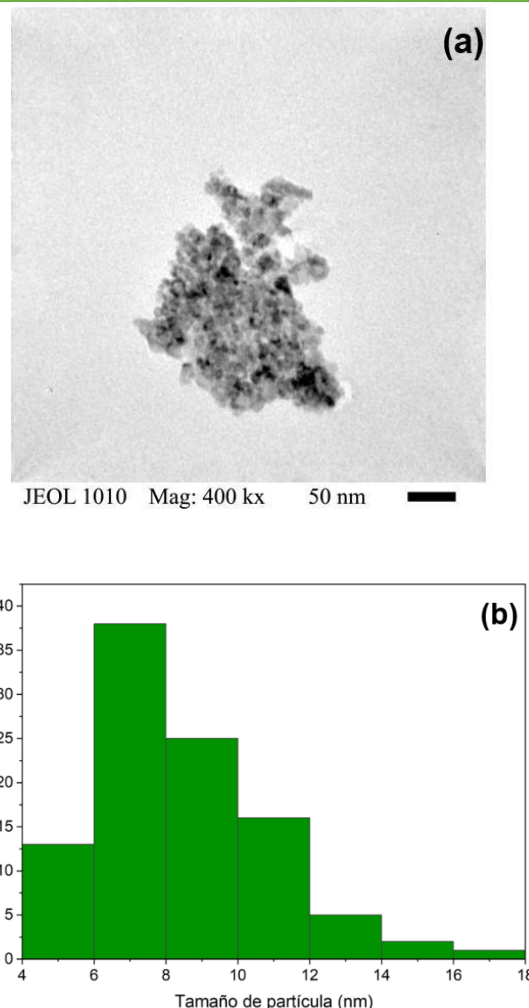


Figura 4 a) Imagen obtenida por TEM de las nanopartículas de NiCo_2O_4 y b) distribución de tamaños de las partículas

Para la evaluación de las propiedades de detección, el nanosensor de NiCo_2O_4 se sometió a pruebas de temperatura de operación, de selectividad con distintos vapores orgánicos (metanol, etanol, isopropanol y acetona), de diferentes concentraciones de etanol y de respuesta-recuperación a una sola concentración de etanol (5 ppm). La **Figura 5** muestra la respuesta del nanosensor de NiCo_2O_4 en función de la temperatura de operación para una concentración de 5 ppm de etanol. Como se observa, la respuesta

incrementa hasta un valor máximo (2.0) a una temperatura de 120 °C; luego, la respuesta decae cuando la temperatura incrementa hasta 160 °C. El incremento de la respuesta podría deberse a que las moléculas de etanol adquieren suficiente energía para reaccionar con los iones de oxígeno presentes en la superficie del sensor cuando la temperatura aumenta; luego, se alcanza una respuesta máxima debido a un equilibrio dinámico entre la adsorción y desorción, y finalmente, predominó una desorción de etanol provocando una caída en la respuesta del sensor [19]. Por lo tanto, la temperatura de operación del nanosensor fue a 120 °C.

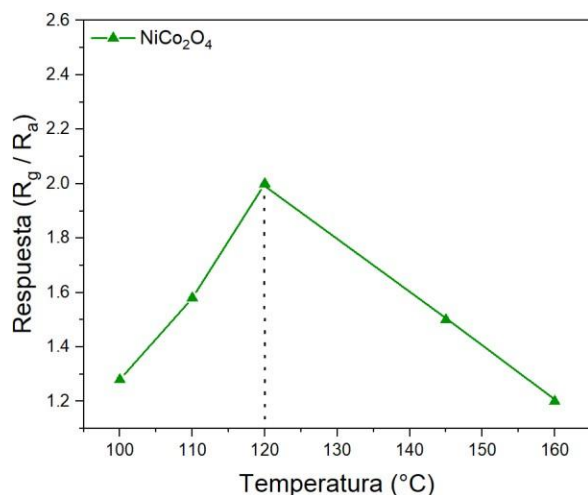


Figura 5 Respuesta del nanosensor de NiCo_2O_4 en función de la temperatura de operación y a una concentración de 5 ppm de etanol

La **Figura 6** muestra la curva de selectividad dinámica del nanosensor de NiCo_2O_4 ante una concentración de 5 ppm y en ella se observa que el nanosensor es más selectivo al etanol que al metanol, isopropanol y acetona. Los valores de

respuesta fueron 2.0, 1.8, 1.9 y 1.6 para el etanol, metanol, isopropanol y acetona, respectivamente.

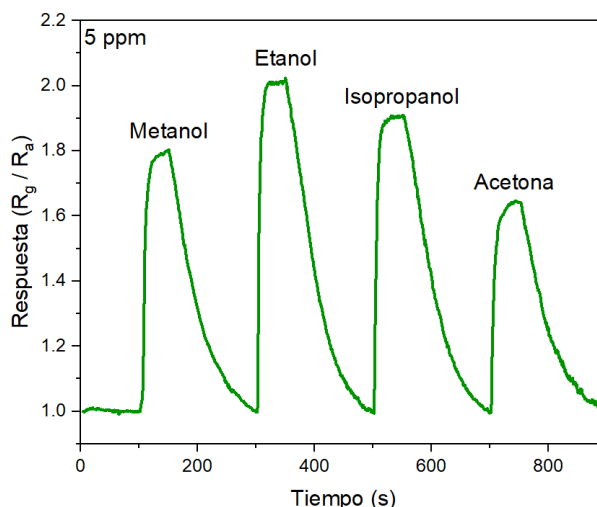


Figura 6 Curvas de selectividad del nanosensor de NiCo_2O_4 a una concentración de 5 ppm y una temperatura de operación de 120 °C

Por otra parte, el nanosensor de NiCo_2O_4 también exhibió una buena capacidad en detectar diferentes concentraciones de etanol en el rango de 0.5 a 5 ppm, y en donde, se puede observar que la respuesta incrementa con el incremento de la concentración de etanol (**Figura 7**). Este comportamiento es el esperado, ya que cuando se incrementa la concentración de etanol, más moléculas se involucran en el proceso de adsorción, y a consecuencia, la respuesta incrementa.

El parámetro de repetibilidad del nanosensor también fue evaluado a una concentración de 5 ppm de etanol y el resultado se presenta en la **Figura 8**. Como se observa, la respuesta incrementa en etanol y decae en aire, y en los cuatro ciclos de prueba la respuesta permanece estable. A partir de

estas curvas, se calculó el tiempo de respuesta y de recuperación del nanosensor, siendo de 6.5 s y 92.7 s, respectivamente.

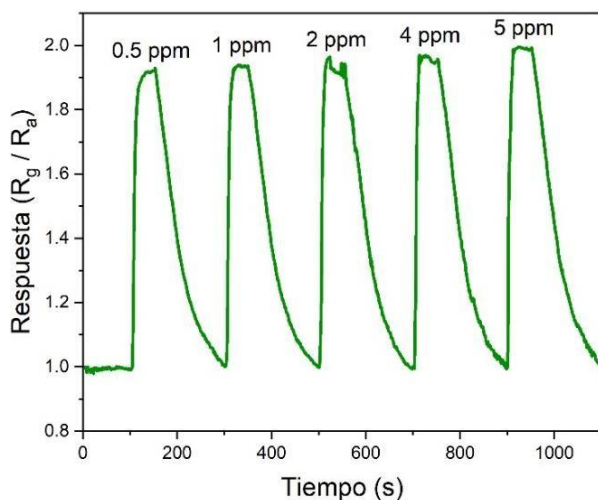


Figura 7 Respuesta en función de diferentes concentraciones de etanol del nanosensor de NiCo₂O₄ a una temperatura de operación de 120 °C

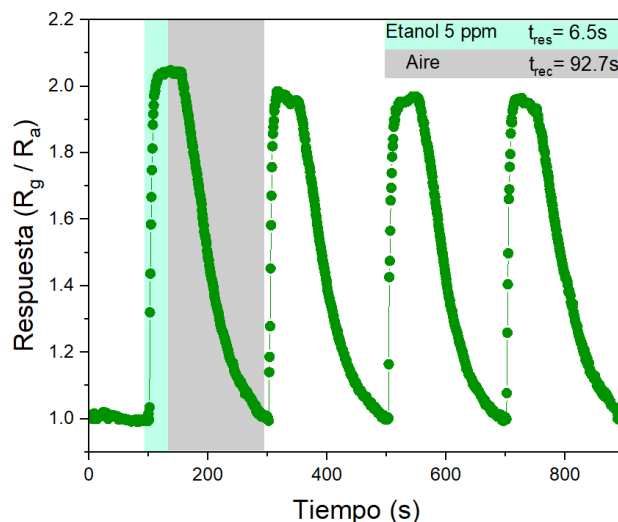


Figura 8 Curva dinámica de la respuesta del nanosensor de NiCo₂O₄ a 5 ppm de etanol y a una temperatura de operación de 120 °C

En general, se puede decir que el nanosensor de NiCo₂O₄ presentó una mejoría en los parámetros de rendimiento de detección a etanol, como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Comparación de los parámetros de rendimiento del nanosensor de NiCo₂O₄ en la detección de etanol con otros materiales

Material	Concentración (ppm)	Temp. (°C)	Respuesta	Ref.
W-CeO ₂	100	200	10.2	[20]
CuO/PM A NFs	100	400	2.78	[21]
MoS ₂ -CuGaO ₂	100	25	6.0	[22]
SnO ₂ -ZnO	100	250	35	[3]
In ₂ O ₃ @SnO ₂	100	260	2.71	[23]
NiCo ₂ O ₄	5	120	2.0	Aquí

Las buenas propiedades de detección del nanosensor de NiCo_2O_4 podrían atribuirse al tamaño nanométrico de las partículas [24], ya que éstas proporcionan una elevada área superficial, lo que da lugar a un aumento de los sitios activos disponibles en la superficie para la reacción, aumentando así el rendimiento de detección a vapor de etanol a una temperatura relativamente baja (120°C).

CONCLUSIONES

Las nanopartículas de NiCo_2O_4 con un tamaño promedio de 7.7 ± 2.0 nm fueron sintetizadas mediante un método coloidal asistido por microondas, utilizando AOT como surfactante. La fase cristalina de la estructura espinela cúbica de NiCo_2O_4 se identificó a través de difracción de rayos X a una temperatura de calcinación de 400°C . Además, NiCo_2O_4 mostró capacidad de absorción óptica tanto en el rango visible como en el ultravioleta (200-800 nm), con una banda prohibida de 2.2 eV. Por otro lado, las mediciones de detección revelaron que el nanosensor de NiCo_2O_4 mostró una respuesta de 2.0 a etanol a una temperatura de operación de 120°C . El nanosensor también mostró sensibilidad a bajas concentraciones de etanol (0.5 a 5 ppm) y tiempos de respuesta-recuperación bajos. Asimismo, las pruebas dinámicas confirmaron que el sensor exhibe respuestas estables, repetibles y reproducibles. Por lo tanto, las nanopartículas de NiCo_2O_4 podrían ser usadas en la detección de etanol a concentraciones bajas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio de Microscopías Electrónicas del CUCEI por los análisis de XRD y TEM. De la misma manera, se agradece al Laboratorio de Medio Ambiente y Energías Renovables por las mediciones de UV-vis y por las pruebas de detección de etanol, así como al Laboratorio de Ciencias Básicas.

REFERENCIAS

- [1] Alzeer, J., Hadeed, K.A. (2016). Ethanol and its Halal status in food industries, Trends in Food Science & Technology, 58, 14–20.
- [2] Dey, A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. Materials Science and Engineering: B, 229, 206–217.
- [3] Jiang, B., Zhou, T., Zhang, L., Yang, J., Han, W., Sun, Y., Liu, F., Sun, P., Zhang, H., Lu G. (2023). Separated detection of ethanol and acetone based on $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$ gas sensor with improved humidity tolerance. Sensors and Actuators B: Chemical, 393, 134257.
- [4] Li, X., Fu, L., Karimi-Maleh, H., Chen, F., Zhao, S. (2024). Innovations in WO_3 gas sensors: Nanostructure engineering, functionalization, and future perspectives. Heliyon, 10(6), e27740.
- [5] Tian, X., Cui, X., Lai, T., Ren, J., Yang, Z., Xiao, M., Wang, B., Xiao, X., Wang, Y. (2021). Gas sensors based on TiO_2 nanostructured materials for the detection of

- hazardous gases: A review. *Nano Materials Science*, 3(4), 390–403.
- [6] Zhu, Y., Pu, X., Song, W., Wu, Z., Zhou, Z., He, X., Lu, F., Jing, M., Tang, B., Ji, X. (2014). High capacity NiCo_2O_4 nanorods as electrode materials for supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 988–993.
- [7] Mishra, K. K., Maurya, P. K., Mishra, A. K. (2024). Dual electrolyte based aluminium air battery using $\text{NiCo}_2\text{O}_4\text{--MoSe}_2$ hybrid nanocomposite. *International Journal of Hydrogen Energy*, 69, 252–260.
- [8] Marimuthu, G., Nguyen, B., Pham, V., Nguyen, V., Tran, V., Sivashanmugan, K., Pazhanivel, T. (2021). Novel $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{MWCNTs}$ nanocomposite with flake-like architecture as room temperature capacitive-type NH_3 gas sensor. *Materials Letters*, 283, 128814.
- [9] Hu, Y., Li, T., Zhang, J., Guo, J., Wang, W., Zhang, D. (2022). High-sensitive NO_2 sensor based on p- $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-WO}_3$ heterojunctions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 352, 130912.
- [10] Balaji, G., Rathinavel, S., Vadivel, S. (2021). Design and fabrication of clad removed fiber optic based NiCo_2O_4 sensor for detection of ethanol and acetone gases. *Optik*, 228, 168814.
- [11] Kulkarni, S. K. (2015). *Nanotechnology: Principles and Practices*. Cham: Springer International Publishing.
- [12] Zheng, Y., Wang, L., Tian, H., Qiao, L., Zeng, Y., Liu, C. (2021). Bimetal carbonaceous templates for multi-shelled NiCo_2O_4 hollow sphere with enhanced xylene detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 339, 129862.
- [13] Lee, K., Tiong, T., Pan, G., Yang, T., Uma, K., Tseng, Z., Nikoloski, A., Huang, C. (2024). Ultrasonic-Assisted electrodeposition of Mn-doped NiCo_2O_4 for enhanced photodegradation of methyl red, hydrogen production, and supercapacitor applications. *Journal of Composites Science*, 8(5), 164.
- [14] Alam, N., Chandel, V., Khatoon, T., Tripathi, S., Azam, A., Rashmi, Shariq, M. (2018). Tailoring of band gap in manganese doped sodium hexa-titanate. In 2018 International Conference on Computational and Characterization Techniques in Engineering & Sciences (CCTES), IEEE, 291–294.
- [15] Yan, X., Jin, Z., Zhang, Y., Liu, H., Ma, X. (2019). Controllable design of double metal oxide (NiCo_2O_4)-modified CdS for efficient photocatalytic hydrogen production. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21(8), 4501–4512.
- [16] Jia, C., Yang, F., Zhao, L., Cheng, G., Yang, G. (2019). Temperature-dependent electrical transport properties of individual NiCo_2O_4 nanowire. *Nanoscale Research Letters*, 14(1), 10.
- [17] LaMer, V. K., Dinegar, R. H. (1950). *Theory, production and mechanism*

- of formation of monodispersed hydrosols. *Journal of the American Chemical Society*, 72(11), 4847–4854.
- [18] Morán-Lázaro, J., López-Urías, F., Muñoz-Sandoval, E., Blanco-Alonso, O., Sanchez-Tizapa, M., Carreon-Alvarez, A., Guillén-Bonilla, H., Olvera-Amador, M., Guillén-Bonilla, A., Rodríguez-Betancourt, V. (2016). Synthesis, characterization, and sensor applications of spinel ZnCo_2O_4 nanoparticles. *Sensors*, 16(12), 2162.
- [19] Guo, J., Wang, S., Lin, Z., Liu, L., Hui, Y. (2021). Ultrasensitive acetone sensor based on holey zinc oxide nanosheets doped by gold nanoparticles. *Materials Letters*, 302, 130443.
- [20] Wang, X., Wang, X., Wei, W., Jiang, H., Li, X., Liu, G., Zhu, Z., Li, B., Sheng, Y., Zhou, J., Xie, E., Zhang, Z. (2023). Humidity-resistant ethanol gas sensors based on electrospun tungsten-doped cerium oxide hollow nanofibers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 393, 134210.
- [21] Zhang, M., Lv, X., Wang, T., Pei, W., Yang, Y., Li, F., Yin, D., Yu, H., Dong, X. (2024). CuO-based gas sensor decorated by polyoxometalates electron acceptors: From constructing heterostructure to improved sensitivity and fast response for ethanol detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 415, 136016.
- [22] Bao, S., Wu, H., Chu, X., Liang, S., He, L. (2024). The room temperature ethanol gas sensors based on $\text{MoS}_2\text{-CuGaO}_2$ composite prepared by hydrothermal method. *Talanta*, 277, 126287.
- [23] Zhang, L., Tian, J., Wang, Y., Wang, T., Wei, M., Li, F., Li, D., Yang, Y., Yu, H., Dong, X. (2024). Polyoxometalates electron-acceptor-intercalated $\text{In}_2\text{O}_3@\text{SnO}_2$ nanofibers for chemiresistive ethanol gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 410, 135728.
- [24] Lee, J.-S., Katoch, A., Kim, J.-H., Kim, S. S. (2016). Effect of Au nanoparticle size on the gas-sensing performance of p-CuO nanowires. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 222, 307–314.

