

# Sensor de pH basado en fibra óptica con cubierta de grafeno.

## pH sensor based on optical fiber coated with graphene.

Alondra Jaqueline Sánchez Martínez (1).  
Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH.  
[alondra.sanchez.mtz@gmail.com](mailto:alondra.sanchez.mtz@gmail.com).

Daniel López Cortés\* (2). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, [daniel.lopezc@unach.mx](mailto:daniel.lopezc@unach.mx).

Víctor Iván Ruiz Pérez (3). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, [vruiz@unach.mx](mailto:vruiz@unach.mx).

Gilbert Francis Pérez García (4). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, [gilbert.perez@unach.mx](mailto:gilbert.perez@unach.mx).

Ariel Flores Rosas (5). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, [ariel.flores@unach.mx](mailto:ariel.flores@unach.mx).

Luis Escalante Zárate (6). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, [luis.escalantez@unach.mx](mailto:luis.escalantez@unach.mx).

\*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 05, 2025; aceptado en octubre 03, 2025.

### Resumen.

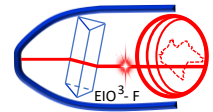
*El trabajo presenta el diseño, fabricación y caracterización de un sensor de pH basado en fibra óptica, utilizando una configuración de desalineamiento entre núcleos de dos fibras monomodo. El dispositivo está orientado a aplicaciones en el monitoreo de la calidad del agua, permitiendo medir el pH en un rango de 7 a 12. Para mejorar la sensibilidad del sistema, se incorporó una capa de grafeno sobre la región sensora, lo que permite una mejor interacción con el medio exterior. La configuración propuesta destaca por su bajo costo y facilidad de fabricación, debido a que no requiere fibras ópticas especiales ni equipos sofisticados, lo que la hace viable para ser implementada en laboratorios convencionales y entornos con recursos limitados.*

**Palabras claves:** Fibra óptica, grafeno, sensor de fibra óptica, sensor de pH.

### Abstract.

*This work presents the design, fabrication, and characterization of a pH sensor based on optical fiber, using a configuration involving core misalignment between two single-mode fibers. The device is aimed at applications in water quality monitoring, enabling pH measurements in the 7 to 12 range. To enhance the sensor's sensitivity, a layer of graphene was incorporated over the sensing region, allowing improved interaction with the external medium. The proposed configuration stands out for its low cost and ease of fabrication, as it does not require specialized optical fibers or complex equipment, making it suitable for implementation in conventional laboratories and resource-limited environments.*

**Keywords:** Fiber optic, fiber optic sensor, graphene, pH sensor.



## 1. Descripción de la conferencia

El cuidado de los recursos hídricos se ha convertido en una de las prioridades más urgentes de nuestro tiempo. La creciente escasez de agua en muchas regiones del planeta ha impulsado la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan no solo conservar este recurso, sino también asegurar su calidad. La evaluación de parámetros como la turbidez, la salinidad, la presencia de metales pesados y el pH es fundamental para determinar si el vital líquido es apto para consumo humano, el riego agrícola o el uso industrial (Chen et al., 2020).

Ante esta necesidad, la comunidad científica ha intensificado la búsqueda de métodos cada vez más precisos, confiables y accesibles para la monitorización de la calidad del agua. En este contexto, los sensores basados en fibra óptica han ganado una gran atención, gracias a sus ventajas inherentes: son inmunes a la interferencia electromagnética, permiten la multiplexación (medición de varios parámetros con un solo sistema), presentan alta resistencia a los ambientes corrosivos y pueden operar de forma remota y en tiempo real (Wang et al., 2018).

De forma paralela, el descubrimiento y estudio de nuevos materiales como el grafeno ha abierto abanico de posibilidades en el desarrollo de dispositivos fotónicos. El grafeno, con sus excepcionales propiedades eléctricas, térmicas y ópticas, ha demostrado ser un aliado ideal en el diseño de sensores con mayor sensibilidad, duraderos y sobre todo versátiles, especialmente cuando se combinan con tecnologías ópticas como la fibra óptica (Bonaccorso et al., 2010; Sharma & Kaushik, 2017).

En este trabajo se presenta el diseño, fabricación y caracterización de un sensor de pH basado en una configuración tipo interferómetro de Michelson, que utiliza el desalineamiento entre los núcleos de dos fibras monomodo como elemento base para generar interferencia. En el sistema se incorpora una capa de grafeno, lo cual mejora significativamente la respuesta óptica del sensor frente a variaciones en el pH. Esta propuesta destaca por su simplicidad de fabricación, bajo costo y potencial para ser implementada en entornos reales donde se requiere monitoreo constante de la calidad del agua.

## 2. Métodos.

### 1. Diseño del sensor.

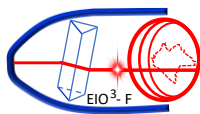
El sensor propuesto se basa en una configuración tipo Interferómetro de Michelson (IM), implementada mediante el desalineamiento axial entre los núcleos de dos fibras ópticas monomodo (SMF-28). Esta técnica consiste en unir dos fibras dejando intencionalmente sus núcleos desalineados, lo cual genera una interferencia entre el modo fundamental y los modos acoplados. El extremo distal de la fibra actúa como un espejo, de modo que la señal reflejada vuelve por la misma trayectoria. La intensidad y fase de la señal reflejada varían según las condiciones de la interfaz entre el vidrio y el medio exterior, generando un patrón interferométrico característico.

### 2. Recubrimiento con grafeno.

Para mejorar la sensibilidad del sensor frente a cambios en el pH, se utilizó una capa de grafeno sintetizado mediante deposición química en fase de vapor (CVD, por sus siglas en inglés). Esta técnica permite obtener láminas delgadas, continuas y de alta calidad de grafeno con excelentes propiedades estructurales, eléctricas y ópticas, ideales para su integración en dispositivos fotónicos (Bonaccorso et al., 2010; Li et al., 2009).

El grafeno CVD fue adquirido comercialmente, el cual se entrega depositado sobre un sustrato de cobre. Por esta razón se utilizó el proceso de transferencia húmeda para trasladar cuidadosamente la lámina de grafeno a la punta de la fibra óptica, la cual se encuentra a una distancia  $L$  específica del desalineamiento entre núcleos. Este procedimiento, ampliamente empleado en la investigación de materiales bidimensionales, incluye las siguientes etapas:

1. Recubrimiento del grafeno con una capa protectora de polímero, como polimetilmetacrilato (PMMA).
2. Corrosión del sustrato metálico utilizando una solución de persulfato de amonio.
3. Lavado con agua desionizada para eliminar residuos de cobre.
4. Transferencia del grafeno recubierto de PMMA sobre la superficie de la punta de la fibra óptica.



5. Secado y remoción del PMMA utilizando acetona, dejando la lámina de grafeno directamente adherida a la fibra (Reina et al., 2008; Suk et al., 2011).

Este método permite una buena adherencia y cobertura del grafeno sobre superficies curvas y pequeñas como la punta de la fibra óptica, conservando su integridad estructural. Gracias a su alta sensibilidad superficial y a su interacción con compuestos químicos presentes en el medio (como los iones  $H^+$ ), el grafeno modula las propiedades ópticas locales. Esto se traduce en un cambio medible en el espectro de interferencia del sensor, lo que permite la detección precisa del pH.

### 3. Rango de medición y soluciones de prueba.

El sensor fue probado en soluciones con valores de pH entre 7 y 12, validados con un pH-metro comercial, ya que este rango es crítico para aplicaciones en monitores de agua potable, aguas residuales e industriales.

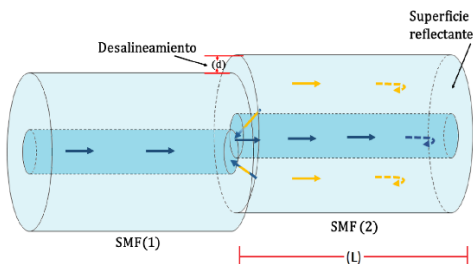
### 4. Sistema de medición.

Para evaluar la respuesta del sensor, se utilizó una fuente de luz de banda ancha (Diodo superluminiscente, SLD por sus siglas en inglés) y un analizador de espectros ópticos (OSA) para registrar los cambios en el espectro de interferencia reflejado. A medida que el pH del medio cambiaba, se observaban una disminución de la intensidad en el espectro de interferencia, permitiendo correlacionar dichos cambios con los valores de pH. Cada medición se repitió tres veces para verificar la repetibilidad y estabilidad del sensor. También se midió el tiempo de respuesta y recuperación ante cambios bruscos de pH.

## 3. Desarrollo.

### 1. Configuración del sensor.

El sensor se basa en una estructura tipo interferómetro de Michelson, utilizando dos segmentos de fibra óptica monomodo unidos mediante una fusión con desalineamiento entre sus núcleos (Ver Fig. 1).



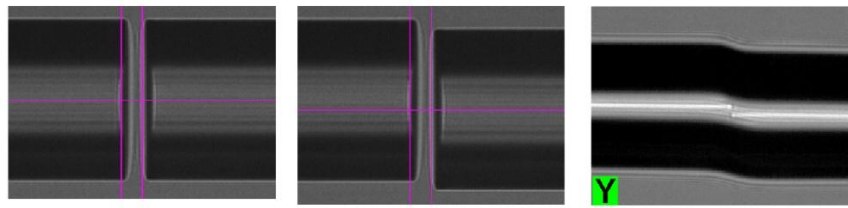
**Figura 1.** Estructura del sensor tipo interferómetro de Michelson.

Esta configuración permite generar interferencias entre el modo fundamental y modos de orden superior, los cuales son sensibles a variaciones del índice de refracción en la interfaz reflejante de vidrio-aire que se encuentra en la punta de la fibra, la cual actúa como zona sensora, y es donde se depositó una capa de grafeno sintetizado por CVD, cubriendo totalmente la punta de la fibra. Esta capa permite que el sensor sea sensible a la concentración de iones de hidrógeno ( $H^+$ ), lo que posibilita detectar cambios en el pH del medio líquido.

### 2. Proceso de fabricación.

La construcción del sensor se llevó a cabo en cuatro etapas principales:

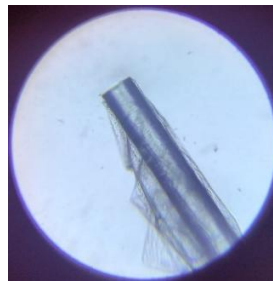
**Fusión con desalineamiento:** Se utilizó una empalmadora convencional Fujikura 70s+ operando en modo manual, para unir dos fibras monomodo, con un desplazamiento transversal de aproximadamente  $2 \mu m$  entre sus núcleos, generando un acoplamiento parcial de la luz a modos no guiados. En la Fig. 2 se presenta el proceso de desalineamiento entre núcleos.



**Figura 2.** Etapas para la implementación del desalineamiento de núcleos entre fibras monomodo.

**Preparación del grafeno:** El grafeno fue obtenido comercialmente, este es generado mediante deposición química en fase de vapor (CVD) sobre un sustrato de cobre y así es como se adquiere.

**Transferencia de grafeno:** Se aplicó una técnica de transferencia húmeda, en la cual se usa PMMA como polímero de sacrificio para depositar cuidadosamente la lámina de grafeno sobre la punta de la fibra. En la **Fig. 3** se muestra el PMMA con grafeno depositado en la punta de la fibra.

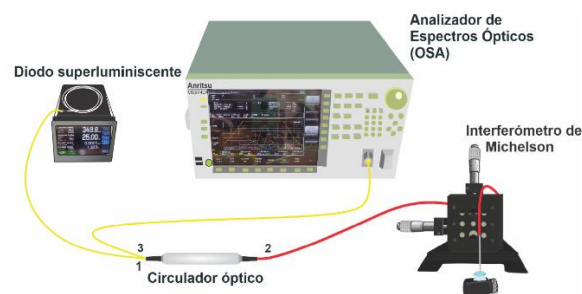


**Figura 3.** PMMA y grafeno transferido en la punta de la fibra.

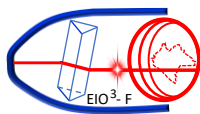
**Limpieza y secado:** Una vez transferido, se eliminó el PMMA con acetona, dejando grafeno firmemente adherido a la cara cortada de la fibra.

### 3. Montaje del sistema de medición.

Como se muestra en la **Fig. 4**, para la caracterización del sensor, se utilizó una fuente de luz de banda ancha (diodo superluminiscente) acoplada a través de un circulador óptico al sensor. La señal reflejada fue monitoreada mediante un analizador de espectros ópticos (OSA), permitiendo registrar el cambio de intensidad producido por las variaciones de pH de cada solución en la que se sumergía el sensor.



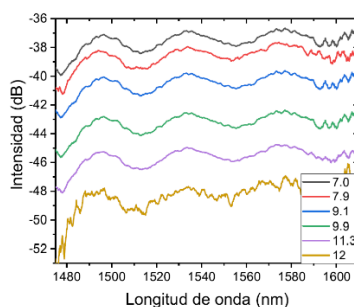
**Figura 4.** Montaje usado para la caracterización del sensor de pH.



Las pruebas se realizaron con soluciones con un rango de pH de 7 a 12, representativo de condiciones reales de agua potable, aguas residuales y cuerpos de agua naturales.

#### 4. Resultados.

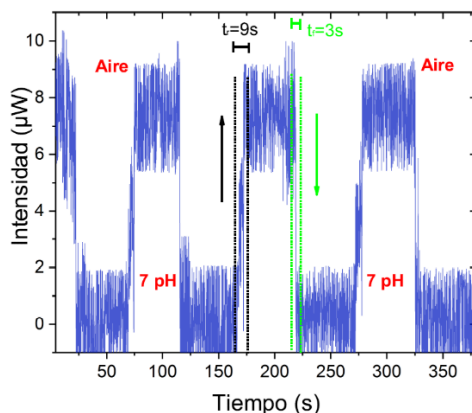
El sensor mostró una respuesta consistente frente a variaciones de pH en distintas soluciones, dentro del rango comprendido entre pH 7 y pH 12. Como se muestra en la **Fig. 5**, la señal interferométrica obtenida a través del analizador de espectros ópticos reveló un comportamiento característico: la intensidad de la señal reflejada disminuyó progresivamente a medida que aumentaba el pH de la solución en la que se encontraba sumergido el sensor.



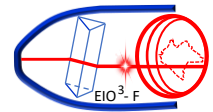
**Figura 5.** Espectros obtenidos ante variaciones de pH del sensor con una capa de grafeno.

Este fenómeno se interpreta como una atenuación óptica inducida por cambios en las propiedades del grafeno al interactuar con el entorno químico. A pH bajos (más ácidos), la concentración de protones (iones  $H^+$ ) es mayor, lo que puede afectar la conductividad superficial y la constante dieléctrica del grafeno, disminuyendo su capacidad de absorber o dispersar la luz. A medida que el pH aumenta, el entorno se vuelve más básico y la interacción con el grafeno cambia, lo que conduce a un incremento en la pérdida óptica en la región sensora.

El análisis espectral mostró que, aunque no se produjo un desplazamiento significativo en la longitud de onda central, el sensor respondió de manera medible y sistemática a los cambios de pH a través de la variación en la amplitud de la señal reflejada, con una sensibilidad de  $-2.30603 \text{ dB/pH}$ . Esta característica puede ser aprovechada para desarrollar sensores basados en intensidad, lo cual simplifica el sistema de lectura y reduce los costos de implementación en comparación con sensores de desplazamiento espectral. Además, como se muestra en la **Fig. 6**, en la caracterización se observó que la respuesta del sensor fue reversible y repetible al alternar soluciones con diferentes valores de pH, con tiempos de respuesta de 3 segundos y 9 segundos de recuperación, lo cual en comparación con los pH-metros convencionales lo hace notablemente más rápido, lo que lo hace un buen candidato para aplicaciones de monitoreo en tiempo real.



**Figura 6.** Tiempo de respuesta del sensor de pH.



Las variaciones de intensidad entre valores de pH de 7 y 12 fueron suficientemente estables para permitir una calibración confiable, evidenciando el potencial de esta tecnología para el sensado químico en líquidos.

## Conclusiones.

Se desarrolló y caracterizó un sensor de pH basado en fibra óptica, utilizando una configuración interferométrica tipo Michelson con desalineamiento entre núcleos de fibras monomodo y una capa de grafeno CVD como elemento sensible. Este enfoque demostró ser efectivo, reproducible y de bajo costo, ya que no requiere fibras especiales ni equipos sofisticados para su fabricación.

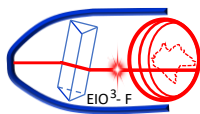
El sensor mostró una respuesta lineal frente a cambios en el pH, dentro del rango de 7 a 12, presentando una sensibilidad de -2.30603 dB/pH. Mediante una atenuación progresiva de la señal reflejada conforme aumentaba el pH.

Esta respuesta se atribuye a la interacción entre el grafeno y el medio químico circundante, que afecta las propiedades ópticas en la región sensora. Aunque no se observó un desplazamiento espectral significativo, la variación en la intensidad de la señal fue suficiente para establecer una correlación confiable con el valor de pH, lo cual habilita su uso como un sensor de intensidad. Además, el sensor presentó alta repetibilidad y tiempos de respuesta cortos, características deseables para su implementación en sistemas de monitoreo en tiempo real. Debido a su simplicidad estructural y la ventaja poder ser fabricado con recursos disponibles en cualquier laboratorio, este tipo de sensor representa una alternativa viable para aplicaciones en control de calidad y otros entornos donde el pH es un parámetro crítico a ser determinado.

Como trabajo a futuro, se propone mejorar la estabilidad del recubrimiento de grafeno a largo plazo, explorar técnicas de funcionalización química para ampliar la sensibilidad en otros rangos de pH y, evaluar su desempeño en muestras reales con condiciones más complejas.

## Referencias bibliográficas.

- Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T., & Ferrari, A. C. (2010). *Graphene photonics and optoelectronics*. Nature Photonics, 4(9), 611–622. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.186>.
- Cheng, C., Li, Y., & Zhang, Y. (2020). *Water quality monitoring using sensor networks: State of the art and future challenges*. Environmental Monitoring and Assessment, 192(8), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08487-9>.
- Reina, A., Jia, X., Ho, J., Nezich, D., Son, H., Bulovic, V., Dresselhaus, M. S., & Kong, J. (2008). *Large area, few layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition*. Nano Letters, 9(1), 30-35. <https://doi.org/10.1021/nl801827v>.
- Sharma, A., & Kaushik, B. K. (2017). *Graphene-based optical sensors: A review*. Optics & Laser Technology, 91, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.022>.
- Suk, J. W., Kitt, A., Magnuson, C. W., Hao, Y., Ahmed, S., An, J.,... & Ruoff, R. S. (2011). *Transfer of CVD-grown monolayer graphene onto arbitrary substrate*. ACS Nano, 5(9), 6916-6924. <https://doi.org/10.1021/nn201207c>.
- Wang, Q., Yu, C., & Zhang, Y. (2018). *Optical fiber sensors for environmental monitoring: Current status and future perspectives*. Sensors, 18(10), 3335. <https://doi.org/10.3390/s18103335>.



### Biografías de los investigadores.



**Alondra Jaqueline Sánchez Martínez**, en el año 2023 obtuvo el grado de Maestra en Ciencias Físicas por la Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas, estudiando sensores interferométricos basados en fibra óptica, la interacción multimodal existente en ellos y sus aplicaciones. Ha participado en diversos congresos (LXV Congreso Nacional de Física, XX Participación de la Mujer en la Ciencia, etc.) y actualmente se encuentra cursando el Doctorado en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) bajo la misma área de investigación.



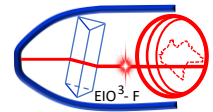
**Daniel López Cortés**, es doctor en ciencias por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE, 2012), tiene un posdoctorado de 3 años en el Instituto Mackenzie de investigación en Grafeno y Nanotecnologías, en São Paulo, Brasil y posteriormente un posdoctorado de 2 años en el Centro de Investigaciones en Óptica, unidad Aguascalientes. Actualmente se desempeña como profesor en la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la UNACH. Sus líneas de investigación están centradas en el desarrollo de sensores de fibra óptica, integrando materiales bidimensionales, como el grafeno.



**Víctor Iván Ruiz Pérez**, es doctor en Ciencias con especialidad en Óptica, egresado del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 2011. Ha sido investigador del SECIHTI a través del programa de Cátedras, hoy Investigadores por México. Actualmente es profesor-investigador de la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la Universidad Autónoma de Chiapas. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras Nivel 1.



**Gilbert Francis Pérez García**, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, donde obtuvo la Licenciatura en Electrónica y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, además de contar con una Maestría en Optomecatrónica por el Centro de Investigaciones en Óptica. Su formación académica ha estado enfocada en el desarrollo de sensores de fibra óptica aplicados al estudio de la calidad



del agua. A lo largo de su trayectoria ha trabajado en sistemas optomecatrónicos, visión artificial y aplicación de redes neuronales enfocados a la industria. Actualmente desarrolla un posdoctorado en la UNACH orientado al diseño de sensores de fibra óptica inteligentes, incorporando algoritmos de inteligencia artificial para optimizar el monitoreo y evaluación de la calidad del agua.



**Ariel Flores Rosas**, es doctor en ciencias ópticas por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Las contribuciones más importantes de su carrera científica son: Es miembro activo de la revista Optical Engineering como árbitro, miembro activo de la AMO (Academia Mexicana de Óptica, A. C.), ha participado como evaluador del programa de Verano de la Investigación Científica (Academia Mexicana de Ciencias, A.C.), miembro del registro Conahcyt de evaluadores acreditados (RCEA), miembro del Sistema Estatal de Investigadores Nivel VI (Cocytech). Actualmente es investigador en el departamento de Óptica de la FCFM de la UNACH. Su línea de Investigación es en el campo de la óptica.



**Luis Escalante Zárate**, es ingeniero en mecatrónica egresado del Instituto Politécnico Nacional. También es maestro y doctor en ciencias ópticas, egresado del Centro de Investigaciones en Óptica en la ciudad de León, Guanajuato. El doctor ha realizado trabajos de investigación sobre el tema de láseres de fibra óptica de salida continua y pulsada. Y en la industria el Dr. Escalante ha participado en el diseño de medidores de niveles de líquidos. Actualmente es profesor en la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la UNACH.