

Sensibilidad en estructuras de guías de onda Strip y Rib con material SU-8 en Interferómetro Mach Zehnder

Sensitivity in Strip and Rib waveguide structures with SU-8 material in Mach Zehnder Interferometer

Jhon Jairo Vejar Caballero¹, Jesús Álvarez Guerrero², Oriana Alexandra López Bustamante³, Karla Cecilia Puerto López⁴, Byron Medina Delgado⁵

¹Ingeniero Electrónico, Docente e Investigador, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.

Email: jhonjairovc@ups.edu.co. ORCID: 0009-0005-5922-234X

²Doctor en Ingeniería, Docente e Investigador, Universidad Libre, Colombia. Email: jesus.alvarezg@unilibre.edu.co. ORCID: 0000-0001-8226-3258

³Magíster en Educación Matemática, Docente e Investigadora, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Email: orianaalexandralb@ups.edu.co. ORCID: 0000-0003-4601-1111

⁴Doctora en Educación, Docente e Investigadora, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Email: karlaceciliapl@ups.edu.co. ORCID: 0000-0003-3749-676X

⁵ Doctor en Ciencias, Docente e Investigador, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Email: byronmedina@ups.edu.co. ORCID: 0000-0003-0754-8629

Cite this article as: J. Vejar Caballero, J. Álvarez, Guerrero, O. López Bustamante, K. Puerto López, B. Medina Delgado "Sensibilidad en estructuras de guías de onda Strip y Rib con material SU-8 en Interferómetro Mach Zehnder", Prospectiva, Vol. 24 N° 1 2026

Recibido: 15/10/2025 / Aceptado: 30/12/2025

<http://doi.org/10.15665/rp.v24i1.3848>

RESUMEN

La tecnología de silicio, ampliamente utilizada en fotónica, es costosa debido a los procesos de fabricación y la infraestructura requerida. En contraste, los polímeros ofrecen una alternativa más económica y versátil para la fabricación de dispositivos fotónicos. Por ello, las empresas buscan nuevas tecnologías y metodologías que permitan desarrollar interferómetros fotónicos con menor costo y mayor eficiencia, impulsando la investigación en materiales innovadores como los polímeros. El objetivo del artículo es comparar la sensibilidad de las estructuras de guías de onda Strip y Rib con material SU-8 implementadas en un Interferómetro Mach Zehnder. La metodología contempla diez fases denominadas definición de geometría, selección del fenómeno físico, selección de la guía de onda, definición de parámetros, definición del área de simulación, simulación de elementos finitos, análisis de modos de propagación, análisis de curvas de Cut-off, diseño del interferómetro y análisis de sensibilidad del Interferómetro Mach Zehnder. Como resultado, la estructura Strip con alto de núcleo de 220 nm alcanza la sensibilidad más alta de 57.51×10^3 rad/RIU, y un límite de detección de 7.10×10^{-7} RIU. Se concluye que la estructura tipo Strip, fabricada con material SU-8, es una alternativa viable para sensores ópticos de precisión, con la ventaja adicional en la reducción de costos de fabricación del Interferómetro Mach Zehnder.

Palabras clave: fotónica, guías de onda, Interferómetro Mach Zehnder, sensibilidad, SU-8.

ABSTRACT

Silicon technology, widely used in photonics, is expensive due to the fabrication processes and infrastructure required. In contrast, polymers offer a cheaper and more versatile alternative for the fabrication of photonic devices. Therefore, companies are looking for new technologies and methodologies to develop photonic interferometers with lower cost and higher efficiency, driving research in innovative materials such as polymers. The objective of the article is to compare the sensitivity of Strip and Rib waveguide structures with SU-8 material implemented in a Mach Zehnder Interferometer. The methodology contemplates ten phases called geometry definition, physical phenomenon selection, waveguide selection, parameters definition, simulation area definition, finite element simulation, propagation modes analysis, cut-off curves analysis, interferometer design and Mach Zehnder Interferometer sensitivity analysis. As a result, the Strip structure with core height of 220 nm achieves the highest sensitivity of 57.51×10^3 rad/RIU, and a detection limit of 7.10×10^{-7} RIU. It is concluded that the Strip type structure, fabricated from SU-8 material, is a viable alternative for precision optical sensors, with the additional advantage in reduced fabrication costs of the Mach Zehnder Interferometer.

Keywords: Mach Zehnder Interferometer, photonics, sensitivity, SU-8, waveguides.

1. INTRODUCCIÓN

En el estudio del Interferómetro Mach Zehnder (*Mach Zehnder Interferometer*, MZI), ha tomado relevancia el diseño de la guía de onda con el objetivo de establecer la estructura más eficiente. El parámetro de sensibilidad se define como el eje principal, dado su impacto directo en la capacidad que le da a los diferentes dispositivos para detectar pequeñas variaciones en el entorno [1], [2]. Existen propuestas cuya metodología incluye la variación de la longitud de onda, comenzando con los valores comúnmente reportados en la literatura de 633 nm y 1500 nm [3]. Además, se evalúan diferentes tipos de estructuras, específicamente las guías de onda tipo Strip y Rib, cada una con diferentes configuraciones de anchura y altura [4]. Esta variabilidad en las dimensiones estructurales permite un análisis exhaustivo de cómo cada parámetro afecta los modos de propagación, con el fin de identificar el modo fundamental en cada configuración [5].

El reto no solo es identificar los distintos modos de propagación, sino también determinar cuál de ellos maximiza la sensibilidad del interferómetro [6]. La sensibilidad es crucial para aplicaciones de biosensado, ya que un mayor valor implica una mejor capacidad del dispositivo para detectar cambios en la concentración de biomoléculas o en otras condiciones del medio circundante [7]. En cuanto a los materiales, se propone el uso de SU-8, un polímero con un índice de refracción de 1.5867, en el núcleo de cada estructura. Esta elección se debe a la versatilidad y facilidad de fabricación que ofrece SU-8, en contraste con el silicio, que es el material estándar en muchas investigaciones [8]. El sustrato se construye con dióxido de silicio (SiO_2), con un índice de refracción de 1.444, mientras que el revestimiento se considera con un índice de refracción de 1, correspondiente al aire. Esta elección de materiales y estructura busca no solo optimizar el rendimiento óptico del transductor, sino también facilitar su integración en aplicaciones prácticas de biosensado [9].

La metodología se organiza comenzando por la selección del tipo de estructura, seguida de la variación sistemática de los parámetros geométricos y ópticos, para identificar la configuración que ofrece la mejor combinación de sensibilidad y eficiencia de propagación. Los resultados de este estudio proporcionan una base sólida para el desarrollo de transductores fotónicos de alto rendimiento en aplicaciones de biosensado, con potenciales aplicaciones en áreas como la detección de enfermedades, la monitorización ambiental y el control de calidad en la industria alimentaria.

2. METODOLOGÍA

El diseño metodológico del artículo para diseñar y analizar la sensibilidad del interferómetro fotónico Mach Zehnder contempla diez fases, como se presenta en la figura 1, las cuales se denominan definición de geometría, selección del fenómeno físico, selección de la guía de onda, definición de parámetros, definición del área de simulación, simulación de elementos finitos, análisis de modos de propagación, análisis de curvas de *Cut-off*, diseño del interferómetro y análisis de sensibilidad del Interferómetro Mach Zehnder.

Figura 1. Metodología para analizar la sensibilidad del MZI.
Figure 1. Methodology for analyzing the sensitivity of the MZI.



La fase uno, denominada definición de geometría, hace referencia a establecer la dimensión espacial del modelo de la guía de onda, utilizando una herramienta computacional. La simulación se puede realizar en dos dimensiones (2D) o tres dimensiones (3D), la cual depende de la complejidad del diseño y los recursos de hardware y software. La complejidad del diseño está asociada con el tipo de guía de onda como Strip, Rib, Canal, entre otros [10]. Las simulaciones 2D simplifican problemas simétricos y permiten análisis rápidos, mientras que las simulaciones 3D representan fielmente la geometría y el comportamiento físico del sistema.

La fase dos, denominada selección del fenómeno físico, hace referencia a la identificación del fenómeno físico y del tipo de estudio.

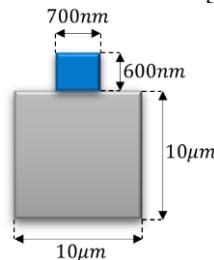
La fase tres, denominada selección de la guía de onda, consiste en elegir el tipo de guía de onda fotónica más adecuado entre las diferentes configuraciones disponibles, como las estructuras tipo Strip, Rib o de Canal, entre otras. Esta elección depende de diversos factores, incluyendo la aplicación específica, el proceso de fabricación y las propiedades ópticas requeridas.

La fase cuatro, denominada definición de parámetros, se centra en establecer los parámetros físicos, geométricos y electromagnéticos de la guía de onda. Esto incluye la longitud de onda (Lamb), frecuencia (f0), ancho del sustrato (w_g), alto del sustrato (h_g), ancho del núcleo (w_st), alto del núcleo (h_st), índice de refracción del revestimiento (n_cl), índice de refracción del núcleo (n_co), índice de refracción del sustrato, y la capa perfectamente ajustada (pml), como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la guía de onda.**Table 1.** Waveguide parameters.

Nombre	Descripción
Lamb	Longitud de onda (λ)
f0	Frecuencia (f)
w_g	Ancho del sustrato
h_g	Alto del sustrato
w_st	Ancho del núcleo
h_st	Alto del núcleo
n_cl	Índice de refracción del revestimiento
n_co	Índice de refracción del núcleo
n_s	Índice de refracción del sustrato
pml	La capa perfectamente ajustada (pml)
Lambda1	Longitud de onda 1 (λ_1)

En esta fase, se definen los parámetros clave que determinan el comportamiento óptico de la guía de onda, tales como las dimensiones del núcleo y el sustrato, los índices de refracción y la longitud de onda de operación; como se presenta en la figura 2. Estos parámetros son esenciales para garantizar que el diseño permita la propagación de la luz, con las características deseadas. Además, se integran las propiedades de los materiales en el modelo, para asegurar una simulación precisa del comportamiento de la guía.

Figura 2. Representación de parámetros de la guía de onda.**Figure 2.** Representation of waveguide parameters.

La fase cinco, denominada definición del área de simulación, delimita las regiones específicas del análisis, como el núcleo y el sustrato. Además, se configuran condiciones de contorno, como capas absorbentes (*Perfectly Matched Layers*, PML) para evitar reflexiones no deseadas. Esto asegura que el área de simulación refleja adecuadamente el comportamiento físico real.

La fase seis, denominada simulación de elementos finitos, se basa en descomponer un dominio continuo en una malla de elementos finitos más pequeños, lo que permite aproximar la solución de ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el sistema. En esta fase se crea un mallado triangular libre para discretizar el dominio de simulación, permitiendo resolver las ecuaciones gobernantes mediante elementos finitos. Se ajusta la densidad del mallado para garantizar precisión en los resultados, balanceando el costo computacional. Posteriormente, se realiza una simulación preliminar para validar la configuración.

La fase siete, denominada análisis modal, es una técnica utilizada en diversos campos de la ingeniería y la física para estudiar y caracterizar el comportamiento dinámico de un sistema en términos de sus modos propios de vibración o resonancia. En esta fase se calculan los modos ópticos de propagación dentro de la guía de onda, identificando su distribución de campo, índice efectivo y constante de propagación. Esto se realiza configurando un análisis modal en la herramienta computacional y ajustando parámetros como el rango de frecuencias o longitudes de onda relevantes.

La fase ocho, denominada análisis de curvas de *Cut-off*, es un enfoque de diseño y análisis de guías de onda y sistemas de propagación de ondas, utilizado para identificar los parámetros críticos en los que un modo de propagación específico deja de existir o se vuelve guiado de manera efectiva. En esta fase, las curvas de *Cut-off* se realizan mediante el barrido paramétrico, especificando el rango del ancho del núcleo (*w_st*) de la siguiente manera: [posición inicial (unidad en metros); resolución (unidad en metros); posición final (unidad en metros)].

La fase nueve, denominada diseño del MZI, hace referencia a la configuración geométrica y estructural del MZI dentro del sistema fotónico. En esta etapa, se establecen los parámetros fundamentales del interferómetro, como la longitud de brazo, el ancho de las guías de onda y los acopladores de interferencia. Se utilizan herramientas computacionales para definir y optimizar la geometría del interferómetro, asegurando una distribución adecuada de la luz y una interferencia controlada en la salida. La selección del diseño depende del propósito del dispositivo, como sensores, moduladores o circuitos fotónicos integrados.

La fase diez, denominada análisis de sensibilidad del MZI, hace referencia a la evaluación del comportamiento óptico del interferómetro bajo diferentes condiciones de operación. En esta fase, se realiza un estudio modal y de propagación de ondas para determinar las características de interferencia, como la distribución de campos electromagnéticos, la transmisión, la pérdida de inserción y la sensibilidad espectral [11]. Para ello, se emplean herramientas de simulación en el dominio de la frecuencia, permitiendo analizar el comportamiento modal y la respuesta espectral del sistema. Además, se considera el impacto de factores como la dispersión, el acoplamiento de modos y la sensibilidad a variaciones en la geometría y el índice de refracción. Este análisis es fundamental para optimizar el diseño y garantizar el desempeño deseado en aplicaciones prácticas.

El diseño y análisis de las estructuras se lleva a cabo mediante simulaciones en las plataformas computacionales Matlab y Comsol Multiphysics, las cuales ofrecen herramientas avanzadas para el modelado de fenómenos electromagnéticos, la optimización de parámetros geométricos y ópticos, así como la evaluación del comportamiento modal y la sensibilidad en la región sensora [12]. Esta metodología no solo permite innovar en el diseño de interferómetros fotónicos de bajo costo, sino también garantizar su funcionalidad y precisión, contribuyendo al desarrollo de nuevas tecnologías de detección.

3. RESULTADOS

Como resultado de la fase uno, para definir la geometría del MZI, se opta por un enfoque bidimensional (2D) con el objetivo de reducir la carga computacional y facilitar el análisis numérico. Este enfoque permite diseñar y optimizar de manera eficiente las estructuras fotónicas tipo Strip y Rib, que actúan como guías de onda en la simulación del MZI [13]. La elección del modelo 2D no solo simplifica el procesamiento, sino que también permite realizar estudios paramétricos más ágiles, posibilitando la exploración de distintas configuraciones geométricas y materiales sin un costo computacional excesivo. Además, este enfoque mantiene la precisión en la caracterización de los modos de propagación, garantizando resultados confiables para el diseño del interferómetro.

Como resultado de la fase dos, el fenómeno físico de estudio son las ondas electromagnéticas en el dominio de la frecuencia y, el tipo de estudio, es el análisis modal, con el objetivo de identificar y caracterizar los modos de propagación. Es decir, se realiza un análisis de ondas electromagnéticas en el dominio de la frecuencia para estudiar el comportamiento de la luz dentro de la guía de onda. A través del estudio modal, se identifican los modos de propagación, determinando cómo se distribuyen los campos eléctricos y magnéticos a lo largo de la estructura. Este análisis es clave para comprender el confinamiento de la luz y su eficiencia en la transmisión, permitiendo optimizar el diseño de la guía de onda.

Como resultado de la fase tres, se seleccionan las guías de onda Strip y Rib porque las características geométricas contribuyen con su construcción.

Como resultado de la fase cuatro, se establecen los parámetros físicos, geométricos y electromagnéticos de la guía de onda, fundamentales para el análisis modal y la propagación de luz. La tabla 2 resume los principales parámetros de la guía de onda tipo Strip y Rib utilizados en el estudio y el valor asignado.

Tabla 2. Parámetros de la guía de onda Strip y Rib.
Table 2. Strip and Rib waveguide parameters.

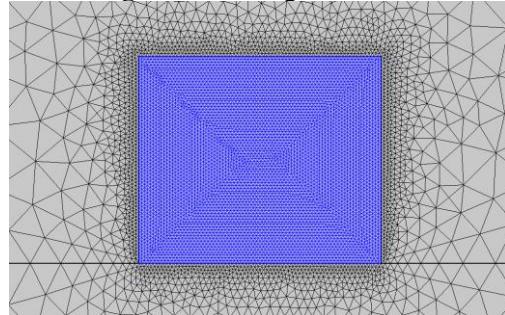
Nombre	Expresión	Descripción
Lamb	633[nm]	Longitud de onda
f0	c_const/Lamb	Frecuencia
w_g	10[um]	Ancho del sustrato.
h_g	10[um]	Alto del sustrato.
w_st	700[nm]	Ancho del núcleo.
h_st	600[nm]	Alto del núcleo.
n_cl	1	Índice de refracción del revestimiento.
n_co	1.5867	Índice de refracción del núcleo.
n_s	1.444	Índice de refracción del sustrato.
pml	Lamb/2	La capa perfectamente ajustada (pml)

Como resultado de la fase cinco, se define el área de simulación de 10 μm de ancho por 20 μm de alto, centrado en la coordenada (0,0). Dentro de esta área de simulación, se encuentran el núcleo y el sustrato definidos en la tabla 2.

Como resultado de la fase seis, se utiliza el método de simulación de elementos finitos con mallado triangular libre. Entre este mallado, se incorpora una capa perfectamente ajustada (*Perfectly Matched Layer*, PML), para eliminar reflexiones no deseadas en los bordes del dominio de simulación, asegurando condiciones de frontera más realistas. Esta capa actúa como un material absorbente que evita interferencias, permitiendo una representación más precisa de los modos de propagación dentro de la estructura. Para definir el mallado, se emplea la ecuación 1, la cual determina el tamaño máximo de los elementos en el núcleo de la guía de onda. En esta ecuación, $T_{\text{Núcleo}}$ representa dicho tamaño máximo, mientras que n_{co} corresponde al índice de refracción del núcleo. La adecuada selección de estos parámetros resulta fundamental para garantizar una correcta discretización del dominio y reducir los errores en la simulación.

$$T_{\text{Núcleo}} = \frac{\text{Lamb}}{n_{co} \cdot \left(\frac{1}{40}\right)} \quad (1)$$

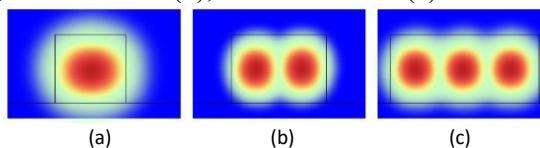
El cálculo realizado, basado en la ecuación 1, determina que el tamaño máximo de los elementos en el núcleo es de 15.96 μm para una longitud de onda (λ) de 633 nm, como se muestra en la figura 3. Para una longitud de onda (λ) de 1500 nm, este valor aumenta a 37.81 μm . Esta configuración garantiza un equilibrio óptimo entre la resolución del mallado y la eficiencia computacional, permitiendo una representación precisa de los modos ópticos en la estructura simulada.

Figura 3. Mallado de la guía de onda.**Figure 3.** Waveguide mesh.

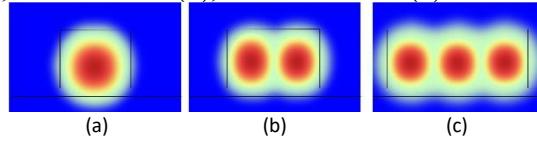
Para el sustrato, se emplea un tamaño máximo de malla de $1.34 \mu\text{m}$. Este valor, se establece como el tamaño predefinido por la herramienta computacional, se selecciona para garantizar una adecuada resolución en la simulación sin comprometer la eficiencia del procesamiento. Al mantener este tamaño, se logra un equilibrio entre la precisión en la representación de los modos ópticos y el tiempo de cálculo requerido, permitiendo una simulación eficiente y confiable de la estructura.

Como resultado de la fase siete, se aplica el análisis modal para determinar los modos ópticos que pueden propagarse dentro de la guía de onda. Este proceso implica el cálculo de la distribución del campo electromagnético, el índice efectivo y la constante de propagación de cada modo. Para ello, se configura un análisis modal en la herramienta computacional, ajustando parámetros como el rango de frecuencias o longitudes de onda relevantes, de acuerdo con la tabla 2. Este estudio es esencial para comprender el comportamiento de la guía de onda, ya que permite identificar los modos fundamentales y superiores, optimizando su diseño según la aplicación deseada, ya sea en telecomunicaciones, sensores fotónicos o circuitos integrados ópticos.

En la figura 4, se presentan para la estructura fotónica tipo Strip, los tres modos de propagación. Esto define que el material polímero seleccionado, garantiza la propagación de la luz en la estructura fotónica.

Figura 4. Análisis modal de primer orden (a), segundo orden (b), tercer orden (c) para la guía Strip.**Figure 4.** First-order (a), second-order (b), and third-order (c) modal analysis for the Strip guide.

De igual manera, el análisis modal se realiza para la estructura Rib, como se representa en la figura 5, demostrando que el polímero seleccionado cumple con el índice de refracción para garantizar la propagación de la luz en la estructura fotónica.

Figura 5. Análisis modal de primer orden (a), segundo orden (b), tercer orden (c) para la guía Rib.**Figure 5.** First-order (a), second-order (b), and third-order (c) modal analysis for the Rib guide.

Como resultado de la fase ocho, el análisis de las curvas de *Cut-off*, confirma un equilibrio óptimo entre la eficiencia del confinamiento óptico y la reducción de pérdidas por dispersión. A partir de lo expuesto, se lleva a cabo un análisis modal en el que se varían distintos parámetros, como la longitud de onda (λ) y el ancho del núcleo, mediante un barrido paramétrico. Este procedimiento permite evaluar la influencia de estos factores en la propagación de los modos ópticos dentro de la guía de onda, lo que resulta fundamental para optimizar su desempeño en aplicaciones específicas.

Los resultados se fundamentan en la iteración de las guías de onda Strip y Rib, ya que la elección del tipo de guía es un factor clave en el diseño de dispositivos fotónicos para interferometría. En particular, se destacan dos casos específicos de análisis que se presentan a continuación.

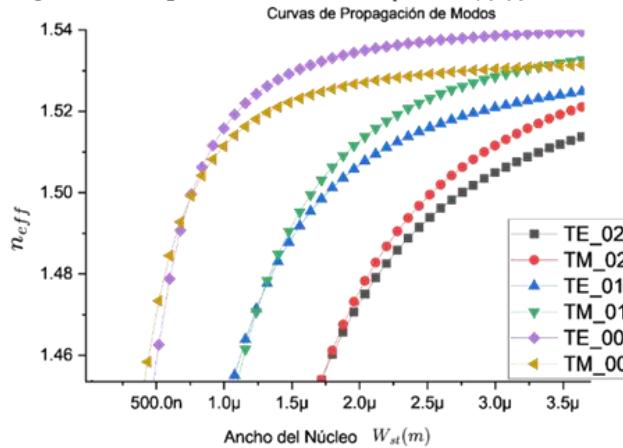
Guía de onda Strip con $\lambda = 633$ nm y $H_{\text{núcleo}} = 600$ nm, con barrido en el $W_{\text{núcleo}}$ de [100nm;80nm;3.5μm].

En este estudio, se lleva a cabo un análisis modal detallado de una guía de onda tipo Strip operando a una longitud de onda de 633 nm. Inicialmente, se analiza una configuración con una altura del núcleo de 220 nm; sin embargo, al no detectarse la presencia de modos transversales eléctricos (TE), se decide incrementar la altura del núcleo a 600 nm, considerando la literatura y las capacidades de fabricación. Este ajuste estructural tiene como objetivo mejorar las condiciones de confinamiento y favorecer la propagación de los modos TE dentro de la guía de onda.

El análisis incluye un barrido paramétrico del ancho del núcleo ($W_{\text{núcleo}}$) dentro de un rango comprendido entre 100 nm y 3.5 μm, con incrementos de 80 nm. La variación de este parámetro resulta fundamental para estudiar la evolución de los modos ópticos y su dependencia con la geometría de la guía. A través de este barrido, se identifican y caracterizan los distintos modos de propagación presentes en la estructura, lo que permite evaluar el impacto del ancho del núcleo en el confinamiento y la distribución del campo eléctrico. El ajuste en la altura del núcleo y la exploración de un rango más amplio de anchos permiten analizar el comportamiento de la guía en condiciones estructurales distintas, optimizando su diseño para aplicaciones específicas en fotónica integrada. Los resultados obtenidos, de la figura 6, evidencian la influencia de las dimensiones geométricas en la distribución modal y en la capacidad de la guía para soportar diferentes modos de propagación. Este análisis es clave para comprender la relación entre los parámetros estructurales y el comportamiento óptico de la guía, proporcionando información esencial para su optimización en diversas aplicaciones, como sensores fotónicos, interconexiones ópticas y circuitos integrados en fotónica.

Además, la figura 6, presenta las curvas de dispersión, que permiten definir las dimensiones de las guías de onda para obtener altos niveles de sensibilidad, esto se da en las zonas crecientes de las curvas donde se presentan cambios rápidos del índice de refracción (n_{eff}) ante pequeñas variaciones del ancho de la guía de onda.

Figura 6. Strip con $\lambda = 633$ nm y $H_{\text{núcleo}} = 600$ nm.
Figure 6. Strip with $\lambda = 633$ nm and $H_{\text{núcleo}} = 600$ nm.



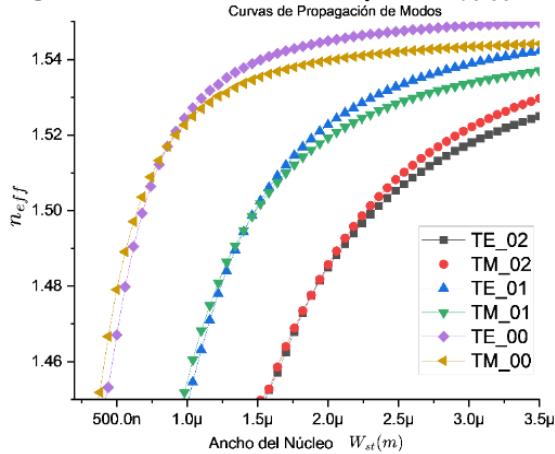
Se presenta la aparición de tres modos en la guía de onda. El primero corresponde a un modo transversal magnético (TM_{00}), que surge aproximadamente cuando el ancho del núcleo alcanza los 375 nm, seguido de un modo transversal eléctrico (TE_{00}) a un ancho de núcleo de 490 nm. Se encuentra que la región más sensible del primer modo se sitúa en el rango de 625 nm a 875 nm. El segundo modo aparece a partir de un ancho de núcleo de 1 μm e inicia con un modo transversal eléctrico (TE_{01}). Su región de mayor sensibilidad se establece en el intervalo de 1.25 μm a 1.75 μm . El tercer modo se manifiesta a partir de un ancho de núcleo de 1.7 μm y comparte la misma región de sensibilidad que el segundo modo, comprendida entre 2.2 μm y 2.5 μm .

Guía de onda Rib con $\lambda = 633$ nm y $H_{\text{núcleo}} = 220$ nm, con barrido en el $W_{\text{núcleo}}$ de [250nm;80nm;3.5 μm].

El análisis incluye un barrido paramétrico del ancho del núcleo ($W_{\text{núcleo}}$) en un rango de 250 nm a 3.5 μm , con incrementos de 80 nm. Como se muestra en la figura 7.

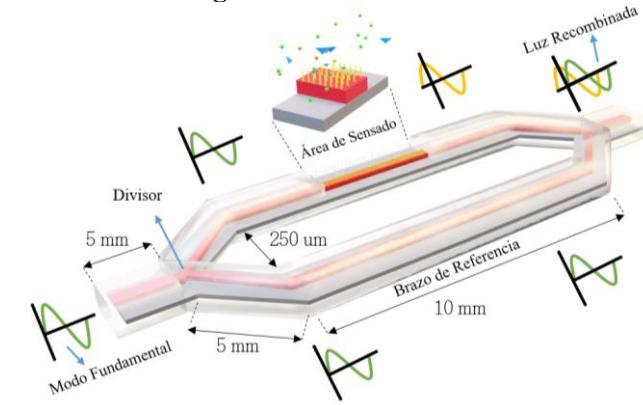
Además, en la figura 7, se presenta la aparición del modo fundamental, que inicia con un ancho de núcleo de 375 nm. El primer modo detectado es el modo transversal magnético (TM_{00}), seguido por el modo transversal eléctrico (TE_{00}), que se manifiesta cuando el ancho del núcleo alcanza 415 nm. A medida que el ancho del núcleo aumenta, se identifican modos superiores. A partir de 0.9 μm , emerge el segundo conjunto de modos: el modo transversal magnético (TM_{01}) aparece a 0.96 μm , mientras que el modo transversal eléctrico (TE_{01}) se detecta a 1 μm .

Figura 7. Rib con $\lambda = 633$ nm y $H_{\text{núcleo}} = 220$ nm.
Figure 7. Rib with $\lambda = 633$ nm and $H_{\text{núcleo}} = 220$ nm



Como resultado de la fase nueve, para diseñar y analizar el MZI, se selecciona la guía de onda tipo Strip por la facilidad de fabricación y la capacidad para identificar claramente los modos de propagación, de acuerdo con la fase siete. La figura 8 presenta la estructura del MZI, con los valores utilizados, que se basan en el estudio de [14], [15] con modificaciones en el núcleo y el sustrato.

Figura 8. Estructura MZI.
Figure 8. MZI structure.



La guía de onda presenta un núcleo de 700 nm de ancho y 600 nm de alto, mientras que el sustrato posee un ancho de 10 μm y un alto de 10 μm . La operación se realiza con una longitud de onda de 633 nm. Se emplea el material polimérico SU-8 debido a su elevado índice de refracción en comparación con otros polímeros, lo que permite cumplir con la condición necesaria para la propagación de la luz [16]. El interferómetro funciona mediante la división de un haz de luz en dos trayectorias (brazo de sensor y brazo de referencia), cada una de las cuales experimenta una variación de fase. Posteriormente, ambas señales se recombinan, generando un patrón de interferencia, fenómeno que da nombre al dispositivo [17]. La interferencia resultante puede ser constructiva o destructiva, dependiendo de la diferencia de fase acumulada en los trayectos ópticos.

Los parámetros utilizados en el diseño de este interferómetro se basan en los criterios de las fases metodológicas presentados, destacando la estructura de guía de onda que garantiza las mejores condiciones para su implementación. Los parámetros se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros para el diseño de MZI.
Table 3. Parameters for MZI design.

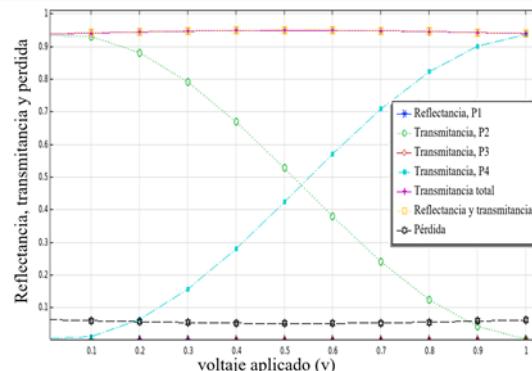
Nombre	Expresión	Descripción
Lamb1	633 [nm]	Longitud de onda
f0	c_const / Lamb1	Frecuencia
n_s	1.444	Índice de refracción del sustrato.
n_co	1.5867	Índice de refracción del núcleo
hx	Lamb1/(6*n_co)/(1-cos(alpha))	Tamaño máximo del elemento en la dirección x
hy	Lamb1/(6*n_co)/sin(alpha)	Tamaño máximo del elemento en la dirección y
r13	30 [pm/V]	Coeficiente electroóptico
V0	100 [V]	Voltaje aplicado
Epsr	35	Permisividad relativa de baja frecuencia

Para la implementación de este diseño, se utiliza Comsol Multiphysics, combinando las interfaces de Ondas Electromagnéticas y Electrostática dentro de una geometría 2D, con posibilidad de extensión a 3D. En este análisis, el campo eléctrico se representa como el producto de una envolvente de variación lenta y una función de fase rápida, lo que permite una adecuada resolución del comportamiento de las ondas.

Además, se selecciona un vector de onda apropiado para asegurar que la envolvente presente una variación espacial mucho mayor que la longitud de onda, lo que contribuye con la precisión de los resultados y la eficiencia del modelado. Para minimizar las pérdidas, se define un radio de curvatura de 2.5 mm, lo que proporciona una transmisión del 95%. Se determina que la longitud del acoplador direccional debe ser de 380 μm para garantizar una división equitativa de la potencia en los dos brazos del interferómetro.

Se realiza un análisis de la reflectancia, transmitancia y pérdida en función del voltaje aplicado, el cual evidencia el comportamiento característico de un modulador óptico basado en un Interferómetro de Mach Zehnder (MZI) [18], como se muestra en la figura 9. A medida que el voltaje aumenta, se presenta una redistribución progresiva de la potencia óptica entre los distintos puertos de salida del sistema, lo que confirma el adecuado funcionamiento del modulador en el control de la dirección de la luz.

Figura 9. Representación de reflectancia, transmitancia y pérdida en función del voltaje aplicado.
Figure 9. Representation of reflectance, transmittance, and loss as a function of applied voltage.



En particular, la luz inicialmente presente en el puerto 2 (transmitancia en verde) se atenúa gradualmente con el incremento del voltaje, mientras que la reflectancia en el puerto 1 (curva azul) aumenta de manera complementaria. Esto sugiere un control efectivo del estado de interferencia dentro del MZI, modulando la dirección en la que se acopla la luz [19].

El hecho de que la suma de la reflectancia y la transmitancia total permanezca cercana a 1 en todo el rango de voltaje indica que el sistema conserva eficientemente la potencia óptica, con pérdidas mínimas (representadas en negro). Estas pérdidas se mantienen por debajo del 5%, lo que sugiere un diseño con bajas pérdidas de inserción. Desde un punto de vista práctico, este comportamiento es crucial para aplicaciones en sistemas de comunicación óptica y conmutación fotónica, donde la capacidad de controlar dinámicamente la ruta de la luz mediante una señal eléctrica permite la implementación de moduladores y filtros sintonizables. En resumen, la figura 9 demuestra que el MZI analizado opera de manera eficiente, permitiendo un control preciso de la distribución de la luz entre los puertos de salida en función del voltaje aplicado, con pérdidas que no comprometen significativamente el rendimiento del dispositivo.

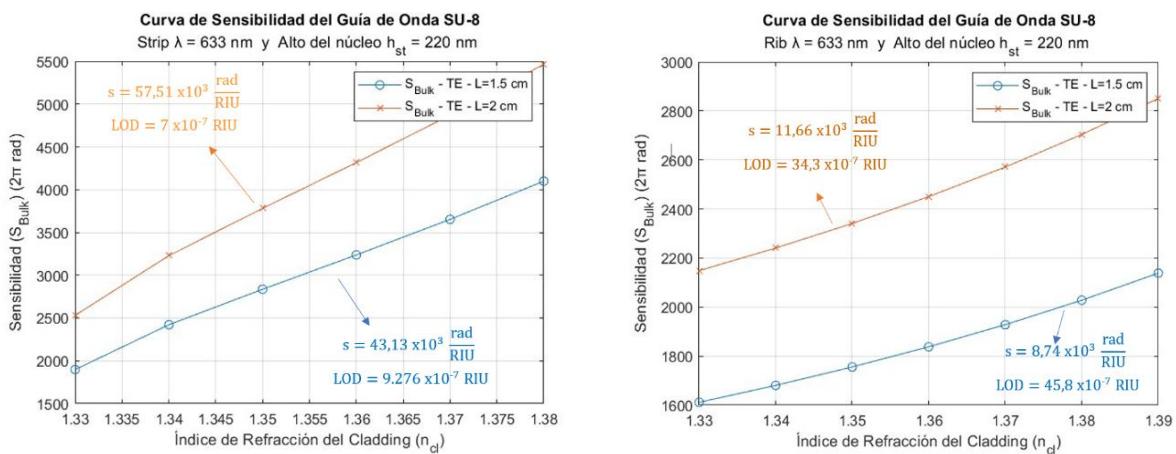
Como resultado de la fase diez, el análisis de sensibilidad de las guías de onda SU-8 es un aspecto crucial para definir el rendimiento del interferómetro y su capacidad de detección [20]. En esta fase, se evalúan estructuras de tipo Strip y Rib, explorando distintos escenarios mediante la variación de parámetros clave, como la altura, la frecuencia y el ancho del núcleo. Este enfoque permite identificar el comportamiento óptico de las estructuras y optimizar las condiciones de operación del biosensor.

Las gráficas obtenidas reflejan la influencia de estos parámetros en la sensibilidad del dispositivo, proporcionando información detallada sobre su desempeño. En la figura 10 se ilustran las configuraciones estructurales analizadas, destacando sus características y aplicaciones potenciales. Este análisis contribuye significativamente a la comprensión del impacto de cada parámetro en el diseño y mejora del biosensor.

Se destaca que el análisis se lleva a cabo utilizando dos longitudes de onda, 633 nm y 1500 nm, y dos tipos de estructuras, Strip y Rib. Además, en cada configuración, se varían las alturas del núcleo entre 220 nm y 600 nm, permitiendo evaluar el impacto de estos parámetros en la sensibilidad del dispositivo y optimizar su rendimiento.

Figura 10. Análisis de sensibilidad del MZI con SU-8 (a) guía de tipo Strip (b) guía de tipo Rib.

Figure 10. Sensitivity analysis of MZI with SU-8 (a) Strip type guide (b) Rib type guide.



Las curvas de sensibilidad presentadas en la figura 10 corresponden a guías de onda fabricadas con SU-8, utilizadas en sensores basados en Interferómetros de Mach Zehnder (MZI). En estos sistemas, la sensibilidad depende de la variación del índice de refracción del *cladding* (n_{cl}), lo que influye directamente en su capacidad para detectar cambios en el entorno. El análisis se realiza considerando las estructuras de guía de onda Strip y Rib. Además, se estudian dos alturas del núcleo (h_{st}) de 220 nm y 600 nm, lo que permite evaluar el impacto de la geometría en la sensibilidad del dispositivo.

Los resultados muestran que las guías de onda Strip presentan una mayor sensibilidad en comparación con las estructuras Rib, lo que las hace más adecuadas para aplicaciones donde la detección precisa de variaciones en n_{cl} es esencial. En particular, la configuración con $h_{st} = 220\text{ nm}$ en la estructura Strip alcanza la sensibilidad más alta, con un valor de $57.51 \times 10^3\text{ rad/RIU}$, y un límite de detección (*Limit Of Detection*, LOD) de $7.10 \times 10^{-7}\text{ RIU}$, lo que indica una capacidad de detección más fina. Por otro lado, las estructuras Rib presentan valores de sensibilidad menores y un LOD menos favorable, especialmente en la configuración con $h_{st} = 600\text{ nm}$, donde el LOD se incrementa hasta $3.43 \times 10^{-6}\text{ RIU}$, disminuyendo su precisión.

Estos hallazgos resultan clave para el diseño de interferómetros fotónicos. La optimización de la geometría de la guía de onda, en especial en términos de su estructura y altura del núcleo, puede mejorar significativamente la sensibilidad del dispositivo sin comprometer el límite de detección. En futuras investigaciones, se pueden explorar otras configuraciones híbridas para obtener un balance óptimo entre sensibilidad y estabilidad en la propagación de la señal.

En la literatura se encuentra que los interferómetros con tecnología de Silicio sobre aislante (*Silicon On Insulator*, SOI), oscilan en un rango de sensibilidad de 10^{-6} nm/RIU [20] a $44364\pi/\text{RIU}$ [5], lo que sitúa al transductor polimérico dentro del rango de alta sensibilidad. Para futuras investigaciones, se plantea la posibilidad de incorporar otros materiales al polímero con el fin de mejorar, aún más, su desempeño.

4. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se desarrolla en el marco del proyecto de investigación “Generación de peines de frecuencias ópticas usando circuitos integrados fotónicos con microresonadores para aplicación en comunicaciones ópticas”, de la convocatoria 890 de 2020 de Minciencias, con contrato ICETEX 2022-0736, y de la tesis doctoral “Diseño de transductores fotónicos usando materiales poliméricos y grafeno para aplicaciones de biosensado”, de la convocatoria de doctorados nacionales 727 de 2015 de Minciencias.

5. CONCLUSIONES

Las curvas de dispersión son muy importantes en el diseño de biosensores fotónicos ya que contribuyen a definir las dimensiones de las guías de onda para obtener altos niveles de sensibilidad, esto se da en las zonas crecientes de las curvas donde se presentan cambios rápidos de índice de refracción ante pequeñas variaciones del ancho de la guía de onda. Es decir, este hallazgo es relevante para la optimización del diseño de guías de onda basadas en polímeros, ya que permite seleccionar la geometría más eficiente para aplicaciones específicas.

La sensibilidad del interferómetro desarrollado, utilizando el material SU-8, logra obtener valores comparables con la tecnología SOI. Este resultado posiciona a las estructuras basadas en SU-8 como una alternativa viable para sensores ópticos de precisión, con la ventaja adicional de costos de fabricación reducidos. Con una sensibilidad de $57.51 \times 10^3\text{ rad/RIU}$, y un límite de detección (LOD) de $7.10 \times 10^{-7}\text{ RIU}$.

Se diseña una estructura fotónica óptima para el confinamiento de la luz, alcanzando confinamiento dentro del núcleo de la guía de onda. Este resultado es particularmente significativo, ya que demuestra que el material polimérico no solo permite una buena propagación de la luz, sino que también mejora la eficiencia del confinamiento en comparación con otros materiales convencionales. En términos de costos de producción, este enfoque representa una ventaja de aproximadamente un 30%, según el análisis basado en el estado del arte. La fabricación con SU-8 es considerablemente más económica en comparación con

tecnologías basadas en sustratos de silicio o materiales más costosos, lo que abre nuevas oportunidades para el desarrollo de dispositivos fotónicos accesibles y escalables.

6. REFERENCIAS

- [1] C. Tyszkiewicz y P. Kielan, «Evanescence Wave Sensitivity of Silica-Titania Rib Waveguides in the Single-Mode Propagation Regime», *Photonics*, vol. 10, p. 1065, sep. 2023, doi: 10.3390/photonics10091065.
- [2] N.-E. Abouelkhair, A. Slaoui, S. El Hassan, R. Laamara, y H. el Hadfi, *Enhancing phase sensitivity in Mach-Zehnder interferometer with various detection schemes using SU(1,1) coherent states*. 2024. doi: 10.48550/arXiv.2406.08007.
- [3] P. K. S., S. A., y P. Kumaar, «Analysis of BCB and SU 8 photonic waveguide in MZI architecture for point-of-care devices», *Sensors International*, vol. 2023, oct. 2022, doi: 10.1016/j.sintl.2022.100207.
- [4] X. Feng, H. Liu, y L. Wei, «Waveguide Mach-Zehnder interferometer to enhance the sensitivity of quantum parameter estimation», *Optics Express*, vol. 31, pp. 17215-17225, may 2023, doi: 10.1364/OE.487793.
- [5] C. Zhao, L. Xu, y L. Liu, «Ultrahigh Sensitivity Mach-Zehnder Interferometer Sensor Based on a Weak One-Dimensional Field Confinement Silica Waveguide», *Sensors*, vol. 21, n.º 19, p. 6600, ene. 2021, doi: 10.3390/s21196600.
- [6] A. Portes, A. J. Martins, y J. Cordoba, «Electro-Optical Biosensor Based on Embedded Graphene Capacitor», ene. 2022, p. JTh3B.16. doi: 10.1364/CLEO_AT.2022.JTh3B.16.
- [7] K. Fotiadis *et al.*, «Theoretical and Experimental Analysis of Single-Arm Bimodal Plasmo-Photonic Refractive Index Sensors», *Sensors*, vol. 24, p. 3705, jun. 2024, doi: 10.3390/s24123705.
- [8] M. Taghavi, H. Latifi, gholam mohammad Parsanasab, A. Abedi, H. Nikbakht, y M. J. Sharifi, «Simulation, Fabrication, and Characterization of a Sensitive SU-8-Based Fabry-Pérot MOEMS Accelerometer», *Journal of Lightwave Technology*, vol. PP, pp. 1-1, ene. 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2894752.
- [9] A. V. R. Portes *et al.*, «Electro-Optical Biosensor Based on Embedded Double-Monolayer of Graphene Capacitor in Polymer Technology», *Polymers*, vol. 13, n.º 20, Art. n.º 20, ene. 2021, doi: 10.3390/polym13203564.
- [10] K. Salah y B. Mounir, «A New Design for Enhancing Highly Sensitive Interferometer Biosensor Using a Silicon Rib Waveguide», *Instrumentation Mesure Métrologie*, vol. 21, pp. 231-236, dic. 2022, doi: 10.18280/i2m.210604.
- [11] N. N. Ojha, A. Kumar, y N. Kumar, «Sensitivity enhancement of a single-fiber Mach-Zehnder interferometer by sensitizing its interference length», *Applied Optics*, vol. 59, pp. 4392-4397, may 2020, doi: 10.1364/AO.389884.
- [12] F. Zhao *et al.*, «Sensitivity Enhanced Refractive Index Sensor With In-Line Fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on Double-Peanut and Er-Doped Fiber Taper Structure», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, n.º 1, pp. 245-251, 2022, doi: 10.1109/JLT.2021.3118285.
- [13] I. Doughan, K. Oyemakinwa, O. Ovaskainen, y M. Roussey, «Strip-loaded Mach-Zehnder interferometer for absolute refractive index sensing», *Scientific Reports*, vol. 14, feb. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-53326-3.
- [14] A. Bastos *et al.*, «Integrated Optical Mach-Zehnder Interferometer Based on Organic-Inorganic Hybrids for Photonics-on-a-Chip Biosensing Applications», *Sensors*, vol. 18, p. 840, mar. 2018, doi: 10.3390/s18030840.
- [15] G. Besselink *et al.*, «Asymmetric Mach-Zehnder Interferometric Biosensing for Quantitative and Sensitive Multiplex Detection of Anti-SARS-CoV-2 Antibodies in Human Plasma», *Biosensors*, vol. 12, p. 553, jul. 2022, doi: 10.3390/bios12080553.

- [16] B. Shew, C. H. Kuo, Y. C. Huang, y Y. H. Tsai, «UV-LIGA interferometer biosensor based on the SU-8 optical waveguide», *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 120, pp. 383-389, may 2005, doi: 10.1016/j.sna.2005.01.004.
- [17] D. Zhang, L. Men, y Q. Chen, «Waveguide Mach-Zehnder Interferometer for Temperature and Concentration Sensing», *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. PP, pp. 1-1, ene. 2021, doi: 10.1109/JSTQE.2021.3050956.
- [18] Y. Zhang, Y. Liu, H. Xi, T. Meng, y G. Zhao, «A Mach-Zehnder Interferometer Refractive Index Sensor on a Spoof Surface Plasmon Polariton Waveguide», *Electronics*, vol. 11, p. 3944, nov. 2022, doi: 10.3390/electronics11233944.
- [19] Y. Wei *et al.*, «High Sensitivity MZI Based on the Modular Interference With Small Group Velocity Dispersion Difference», *Journal of Lightwave Technology*, vol. PP, pp. 1-7, nov. 2023, doi: 10.1109/JLT.2023.3287999.
- [20] Y. Xie, M. Zhang, y D. Dai, «Design Rule of Mach-Zehnder Interferometer Sensors for Ultra-High Sensitivity», *Sensors*, vol. 20, n.º 9, Art. n.º 9, ene. 2020, doi: 10.3390/s20092640.
- [21] V. Ahsani, F. Ahmed, M. Jun, y C. Bradley, «Tapered Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometer for Ultra-High Sensitivity Measurement of Refractive Index», *Sensors*, vol. 19, abr. 2019, doi: 10.3390/s19071652.