VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Diseño y caracterización de un dispositivo de fibra óptica plástica con cavidad lateral y pulido en C para aplicaciones de sensado

Design and characterization of a plastic optical fiber device with a side cavity and C-shaped polish for sensing applications

Emili Andrea Capetillo Cisneros, Alexis Gonzáles García, Virginia Isabel Paramo Olvera, Mónica Trejo Duran, Ruth Ivonne Mata Chávez

[1]Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Irapuato – Salamanca, Sede Yuriria
ea.capetillocisneros@ugto.mx, a.gonzalezgarcia4@ugto.mx, vi.paramoolvera@ugto.mx, mtrejo@ugto.mx, ruth@ugto.mx

Resumen

Este trabajo presenta el análisis de potencia y la caracterización de pérdidas por atenuación en muestras generadas de fibra óptica plástica (POF) modificados estructuralmente mediante un desbaste en geometría de "C" y perforaciones de 0.3 mm de diámetro. Se evaluó cuantitativamente el impacto de la interacción superficial del núcleo de polimetilmetacrilato (PMMA) con índice de refracción $n \approx 1.49$, con fluidos de diversos índices de refracción, los cuales incluyen la Tintura de Mertodol $n \approx 1.350$, el Aceite de Olivo $n \approx 1.468$ y el Aceite de Ricino $n \approx 1.479$. Para la adquisición de datos, se emplearon de forma secuencial cuatro fuentes de iluminación LED (azul, blanco, rojo y rosa) acopladas a un Analizador de Espectros Ópticos (OSA).

Los resultados demuestran que las alteraciones mecánicas degradan las condiciones de Reflexión Interna Total (RIT), induciendo una fuga selectiva de modos ópticos que resulta proporcional a la cercanía del índice de refracción de la sustancia con respecto al del núcleo. Bajo una condición de similitud de los índices, el guiado se anuló casi por completo, requiriendo elevar la potencia eléctrica de alimentación del LED rojo hasta los 81 mW para Igualar la intensidad detectable en el instrumento que mediciones anteriores. La Muestra 2 consolidó de manera sistemática el mayor nivel de atenuación en todos los canales cromáticos debido a la severidad de su maquinado, registrando su punto más crítico bajo el LED azul con una pérdida de 3.4836 dB, lo cual confirma a esta longitud de onda como la de mayor sensibilidad espectral del sistema. Finalmente, la fuente de iluminación rosa exhibió una alteración morfológica exclusiva con un incremento anómalo de potencia en la banda comprendida entre los 550 nm y 850 nm, lo que corrobora que ciertas interacciones químicas modifican de manera selectiva la dispersión cromática de la señal transmitida.

Palabras clave: Fibra óptica, espectrofotometría, transmitancia, potencia lumínica, filamentos perforados.

Marco Teoríco

Espectro de Luz visible

La luz es parte del espectro de radiación electromagnética, constituyendo fluctuaciones en el campo eléctrico y magnético que se propaga en forma de ondas, por lo tanto, al igual que cualquier onda esta radiación transporta energía y no materia. A diferencia de otras perturbaciones físicas, estas ondas no requieren estrictamente de un medio material para transmitirse, por lo que son capaces de propagarse incluso en el vacío.

Desde una perspectiva física, la luz es energía y el fenómeno del color es una consecuencia de la interacción de la energía lumínica y la materia. El ojo humano es capaz de percibir longitudes de onda desde los 380 hasta los 700 nm.

Reflexión y refracción

Cuando un haz de luz se propaga a través de un medio transparente y experimenta una transición hacia otro material de distinta densidad, la señal lumínica se divide en dos fenómenos fundamentales:

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

- **Reflexión:** Es el cambio de dirección que experimenta una fracción de la onda lumínica al chocar con la interfaz, manteniéndose dentro del medio original. De acuerdo con las leyes de la óptica geométrica, si la superficie es regular (especular), el ángulo del rayo incidente a_1 es exactamente igual al ángulo del rayo reflejado a_2:

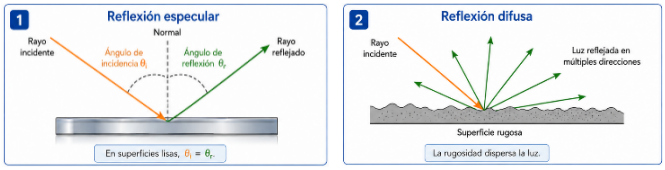


Figura 1. Diagrama de referencia Reflexión. Generado con ChatGPT.

- **Refracción:** Es la desviación que sufre la fracción del haz de luz que logra atravesar la interfaz y transmitirse al segundo medio. Debido a la diferencia de densidad óptica entre ambos materiales, se produce un cambio inmediato en la velocidad de propagación y en el ángulo de transmisión de la luz.

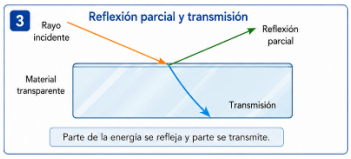


Figura 2. Diagrama de referencia Refracción. Generado por ChatGPT.

El comportamiento de este fenómeno se rige por el Índice de Refracción $\boldsymbol{n}$, un parámetro adimensional que define la relación matemática entre la velocidad de la luz en el vacío $\boldsymbol{C}$ y su velocidad dentro de un medio específico $\boldsymbol{V}$:

$$\boldsymbol{n} = \frac{\boldsymbol{C}}{\boldsymbol{V}} \qquad (1)$$

Donde:

$\boldsymbol{C}$ = velocidad de la luz en el vacío
$\boldsymbol{V}$ = velocidad de la luz en el medio

Ley de refracción de Snell

El comportamiento de refracción de los haces de luz puede describirse según la ley de refracción de snell, esta menciona: índice

"El cociente entre el seno del ángulo α de incidencia y el seno del ángulo de refracción β es constante e igual a la relación de las velocidades de la luz, c1/c2, en ambas sustancias." (Barroso Rivas & Espinosa Luna, 2013).

$$\frac{\boldsymbol{sen\ a}}{\boldsymbol{sen\ \beta}} = \frac{\boldsymbol{n_2}}{\boldsymbol{n_1}} \qquad (2)$$

Donde:

$\boldsymbol{C_1}$ = Índice de refracción en medio 1
$\boldsymbol{C_2}$ = Indice de refracción en medio 2
$\boldsymbol{\alpha = \theta_1}$ = ángulo de incidencia

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

$$\boldsymbol{\beta = \theta_2} = \text{ángulo de refracción}$$

Es decir, Si un haz de luz incide con un ángulo α desde un medio menos denso (aire), donde la luz se transmite con mayor facilidad, a un medio más denso (agua), la propagación y trayectoria del haz de luz siguen un ángulo de refracción β.

Reflexión interna total

Según (Barroso Rivas & Espinosa Luna, 2013), asegura a partir de la ley de Snell:

"Si se aumenta paulatinamente el ángulo de incidencia en un medio incidente con mayor índice de refracción que el asociado al transmitido, se alcanza un valor, llamado ángulo crítico, para el cual el haz de salida es rasante con la interfaz de los medios, esto sucede cuando $sen\,\beta = 1$ […] Para ángulos superiores al ángulo crítico se produce un fenómeno denominado reflexión total interna; es decir, no existe componente transmitida y no se producen pérdidas en la reflexión […]."

Cuando el rayo pasa de un medio con mayor índice de refracción a uno con menor índice, puede existir un ángulo crítico. En ese punto, el ángulo de refracción tiene un ángulo $\theta_2 = 90°$, esto hace que el componente del haz de luz reflejado por el medio contenga en su mayoría la potencia inicial del haz de luz antes de impactar con la superficie.

Es posible determinar el ángulo necesario a partir en el cual se presenta el fenómeno considerando el ángulo θ_2

$$n_1 sen\,\alpha = n_2\, sen\,(90°) \qquad (3)$$

Como:

$$sen\,\alpha = \frac{n_2}{n_1} \qquad (4)$$

Esto solo aplica cuando:

$$n_1 > n_2$$

La reflexión interna total puede ocurrir únicamente cuando un rayo luminoso incide desde una sustancia más densa sobre otra ópticamente menos densa. Este fenómeno es ampliamente utilizado en la fabricación de fibras ópticas para la transmisión de información.

POF (Plastic Optical Fibers – Fibra óptica plástica):

Una fibra óptica plástica (POF) consiste en una hebra fina cuya estructura concéntrica posee un núcleo de acrílico compuesto por resina de polimetilmetacrilato (PMMA) de propósito general, el cual se encuentra recubierto por un polímero de resina de flúor. De acuerdo con la literatura técnica, el índice de refracción del material del núcleo presenta valores comprendidos en un rango de entre $n \approx 1.40$ y $n \approx 1.50$.

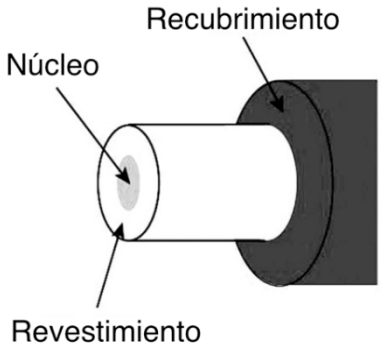


Figura 3. Imagen referencia extraída de: https://www.thefoa.org/ESP/Fibra_optica.htm

Usualmente, el núcleo está fabricado con un material que posee un índice de refracción intencionalmente mayor al del polímero de revestimiento. A través de este diseño, la luz es guiada eficazmente a lo largo del

núcleo; dicho comportamiento se fundamenta en las leyes de la óptica geométrica para asegurar que la diferencia entre los índices de refracción de ambos medios propicie las condiciones de Reflexión Interna Total (RIT). Esto permite que todo rayo de luz que haya ingresado a la fibra con el ángulo de aceptación adecuado se propague de manera confinada a lo largo del polímero del núcleo, evitando que los rayos escapen hacia el medio externo y reduciendo a niveles mínimos la pérdida de intensidad de la señal.

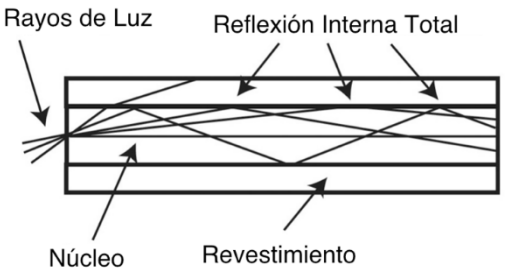


Figura 4. Figura de referencia. extraída de: https://www.thefoa.org/ESP/Fibra_optica.htm

Una vez que la luz entra en la fibra, el haz se propagará a través de trayectorias ópticas uniformes denominadas modos de propagación. Dependiendo de la cantidad de modos que se transmitan de forma simultánea, las guías de onda se clasifican en fibras monomodo y multimodo. Una fibra monomodo se compone de un solo hilo en el núcleo con el objetivo de transportar un único modo de transmisión luminosa; esta configuración se caracteriza por presentar una menor atenuación y poseer un mayor ancho de banda efectivo. Para la interconexión física de este sistema de pruebas, se utiliza la sonda QP600-1S-R, la cual es una fibra óptica tipo patchcord especializada en la conexión y transmisión estable de rangos de longitud de onda que abarcan desde el ultravioleta (200 nm) hasta el infrarrojo cercano (1100 nm).

Atenuación

Todo medio de propagación presenta atenuación o pérdida de intensidad. La luz que viaja a través de una fibra óptica no es la excepción, ya que pierde potencia conforme aumenta la distancia recorrida, esto impone un límite a la distancia máxima que pueden detectarse los pulsos. Dependiendo de factores como la longitud de onda, impurezas e imperfecciones del material por el cual se propaga. Por ello, determinar las longitudes de onda adecuadas para la transmisión, se debe evaluar los materiales en función de la longitud de onda.

Según la ley de Rayleigh, las perdidas inherentes a los materiales de las fibras aumentan a medida que las longitudes de onda se vuelven más grandes, la perdida por dispersión lumínica decrece con la cuarta potencia de λ

$$a = \frac{1}{\lambda^4} \qquad (5)$$

Por otro lado, otro tipo de perdidas pueden deberse impurezas de la fibra, imperfecciones del núcleo o revestimiento incluso en el diámetro del núcleo. En general, variaciones físicas que pueden afectar la potencia. Este tipo de perdidas es posible reducir su impacto mediante el correcto adecuamiento de las condiciones del empalme.

Las pérdidas se definen en decibeles por kilómetro (dB/Km) y a su vez este valor se multiplica por la longitud total de la fibra en kilómetros para determinar las pérdidas del cable.

La atenuación se define como:

$$a = 10 \log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right) \qquad (6)$$

Donde:

α = atenuación en dB/km
P_{in} = potencia de entrada

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

P_{out} = potencia de salida
L = longitud de la fibra en km

Materiales

A continuación, se detallan los materiales, herramientas y componentes ópticos utilizados para el desarrollo de la práctica:

Componentes Ópticos y Lumínicos

- **Cable de fibra óptica plástica (POF):** Monofilamento con un diámetro de 1 mm y núcleo de polimetilmetacrilato (PMMA). Es un cable diseñado para transportar luz de un punto a otro. A diferencia de la fibra óptica de vidrio, esta está hecha de plástico, por lo que es más flexible y resistente a los golpes. Su núcleo está fabricado con PMMA (Polimetilmetacrilato), un plástico transparente que permite el paso de la luz con pocas pérdidas.
- **Diodo LED Azul:** Fuente de iluminación ultrabrillante de longitud de onda corta utilizada para la estimulación cromática. (aproximadamente entre 450 y 495 nanómetros). Permite comparar el comportamiento de diferentes colores al viajar por la fibra óptica.
- **Diodo LED Blanco:** Fuente de iluminación de espectro continuo, es decir, contiene prácticamente todos los colores visibles. Se utiliza cuando se requiere una iluminación más parecida a la luz natural.
- **Diodo LED Rojo:** Fuente de iluminación de longitud de onda larga (aproximadamente entre 620 y 750 nanómetros). Tiene menor energía que la luz azul. Es uno de los colores más utilizados en sistemas de comunicación mediante fibra óptica plástica.
- **Diodo LED Rosa:** Fuente de iluminación utilizada para la evaluación de alteraciones morfológicas específicas. Produce una iluminación distinta a la de los demás LED. Facilita la identificación de ciertos efectos ópticos durante la práctica. Nos sirve para comparar el comportamiento de distintos colores al atravesar la fibra óptica.

Todos estos materiales trabajan en conjunto para demostrar el funcionamiento de la fibra óptica. Los LED actúan como la fuente de luz, mientras que la fibra óptica plástica (POF) guía esa luz mediante el fenómeno de reflexión interna total. Durante la práctica se observa cómo diferentes colores viajan por la fibra y cómo la intensidad de la luz puede disminuir debido a la atenuación, permitiendo comprender los principios básicos de la transmisión de información por fibra óptica.

Sustancias Químicas y Fluidos de Prueba

- **Aceite de Olivo:** Fluido externo con un índice de refracción intermedio de $n \approx 1.468$
- **Aceite de Romero:** Fluido externo con un índice de refracción intermedio de $n \approx 1.466$.
- **Aceite de Ricino:** Fluido de alta densidad óptica con un índice de refracción de $n \approx 1.479$,
- **Tintura de Mertodol:** Sustancia de bajo índice de refracción ($n \approx 1.350$) empleada para evaluar el contraste óptico amplio.

Herramientas de Preparación y Mecanizado

- **Pinzas pelacables de fibra óptica:** Herramienta de precisión utilizada para remover mecánicamente la cubierta plástica protectora sin dañar el núcleo.
- **Herramientas de corte:** Pinzas de corte micro y bisturí de alta precisión para el dimensionamiento transversal de las secciones de fibra.
- **Hojas de lija de agua:** Set de abrasivos de distintos granajes (600, 1200 y 3000) junto con hoja rosa de acabado final para los procesos de desbaste geométrico en forma de "D" y pulido superficial.
- **Perforador milimétrico manual:** Taladro manual equipado con punta intercambiable calibrada a un diámetro de 0.3 mm para la ejecución de las microperforaciones concéntricas.

Instrumentación de Medición y Sujeción

- **Medidor de potencia digital: I**nstrumento óptico para el registro cuantitativo de la potencia de salida y cálculo de pérdidas lineales.
- **Analizador de Espectros Ópticos (OSA):** Equipo de alta resolución dinámico utilizado para la captura de las respuestas espectrales de las muestras en función de la longitud de onda.
- **Sonda óptica de transporte:** Guía de onda complementaria con una longitud de 60 cm para el acoplamiento y direccionamiento de la señal lumínica hacia los módulos de prueba.
- **Posicionadores milimétricos y sujetadores de precisión:** Dos unidades de montaje mecánico con ajuste micrométrico para garantizar la alineación del sistema y evitar pérdidas por desalineamiento óptico.

Procedimiento

El proceso comenzó con la obtención de muestras a partir de una bobina de fibra plástica (POF) de 1 mm de diámetro. De esta se cortaron secciones con una longitud de entre 2 cm y 3 cm. Posteriormente, como paso previo a la manipulación física y acondicionamiento de las muestras, se retiró el recubrimiento plástico de protección de la fibra.

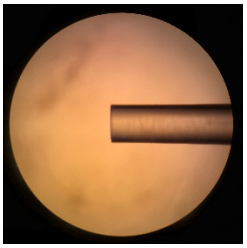


Figura 5. Muestra sin recubrimiento bajo el microscopio.

Preparación y selección de muestras:

Se elaboraron tres muestras de idéntica longitud siguiendo las especificaciones del proyecto. En el extremo de cada pieza se ejecutó una perforación de 0,3 mm de diámetro, priorizando su realizar dicha perforación en el punto medio de la fibra con respecto a la sección transversal de la fibra. La perforación se realizó mediante un taladro manual de punta intercambiable. Dado que esta técnica manual generó imperfecciones y acabados rugosos, se implementó un proceso de adecuación empleando un inserto de diámetro equivalente para limpiar y homogeneizar el conducto.

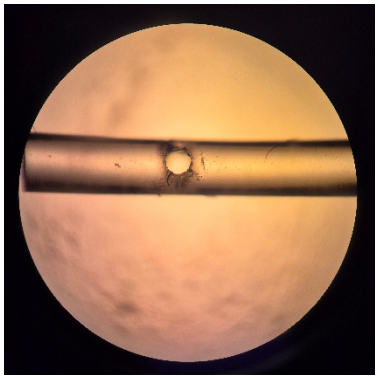


Figura 6. Fibra óptica modificada: Perforación.

Posteriormente, utilizando la perforación como guía, se ejecutó un desbaste en el extremo opuesto de la muestra, dicha manipulación se realizó utilizando un taladro giratorio motorizado con un limador con una forma cilíndrica, dicho limador realizó un desbaste con geometría en forma de 'C' en cada una de las

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

muestras. Dicho desbaste realizado debía eliminar el 30% del material de la sección transversal de la muestra. Los desbastes tenían una longitud promedio de 1.4 mm, al analizar la muestra se observó que el desbaste no genera irregularidades, no fue necesario un proceso para adecuar la fibra.

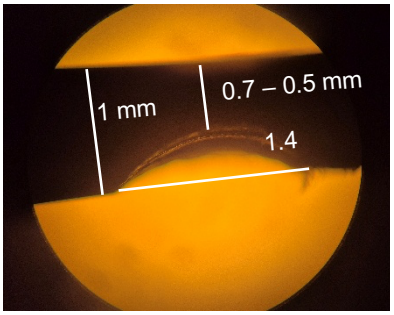


Figura 9. Medidas promedio aproximadas del desbaste generado en las muestras (solo de ejemplo).

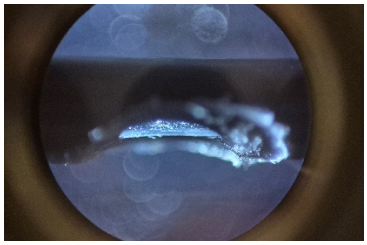
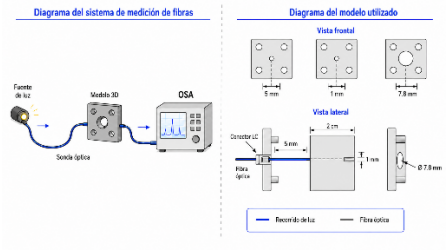


Figura 7. Desbaste en conjunto de la muestra de fibra óptica y la capa de protección.

Una vez las muestras generadas cumplieron con requisitos necesarios, se clasificaron y colocaron dentro de un recubrimiento de protección modificado para evaluar su desempeño, dicho recubrimiento se desbastó de la misma manera que la fibra óptica modificada, asegurándose que los desbastes de ambos componentes se superpongan y coincidan. Dicho desbaste servirá como soporte para añadir las sustancias que se analizarán sus implicaciones.

Elaboración de Sistema de Soporte Fibras ópticas

Utilizando el modelo impreso se elaboró el sistema de soporte utilizando 2 posicionadores milimétricos ya disponibles en el laboratorio, el sistema se elaboró siguiendo el siguiente diagrama.



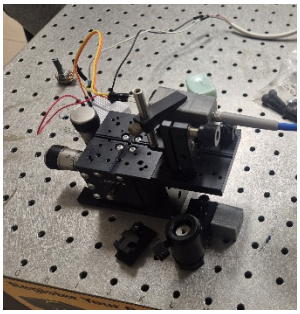


Figura 8. Imagen Ilustrativa del sistema de soporte generado.

Este soporte contiene los siguientes componentes:

- **Soporte para LEDs**: esto incluye leds ultrabrillantes tipo comercial tipo DIP, las distintas variedades de leds cumplen con las mismas medidas por lo que basta con la impresión de una única variable de dicho soporte.
- **Soporte Fibra:** Por motivos de conveniencia, se utiliza este modelo para contener y servir como recipiente las distintas muestras generadas y las sustancias añadidas para el proceso de caracterización.
- **Soporte Sonda:** Se trata de un modelo diseñado directamente para servir como interfaz directa entre la muestra de fibra generada y una sonda para transferir la luz desde el modelo generado a un aparato OSA al final del sistema
- **Sonda:** Se trata de una Sonda QP600-1SR con una longitud de un metro, encargada de la transmisión de fuentes lumínicas con un rango de longitud de onda de entre 200 a 1100 nm, su núcleo consiste en un material de polímero y está recubierta por una capa protectora de silicona.
- **Aparato OSA / Medidor de potencia:** Se trata del modelo HR2000+, dicho aparato es un instrumento electrónico que muestra cómo se distribuye la energía de una señan en

función de su frecuencia, permitiendo distinguir potencias, patrones armónicos, distorsión y ruido. Según su manual de usuario cuenta con una resolución óptica de hasta 0.035 nm y era el espectrofotómetro más rápido de disponible de Ocean Óptica durante su periodo de venta.

Todos estos componentes se integran y utilizarán para la siguiente caracterización de las muestras generadas.

Proceso de Caracterización

Para la etapa de caracterización, se emplearon únicamente Cuatro fuentes de iluminación: diodos LED ultrabrillante de color rojo, blanco, Rosa y azul. Asimismo, se estableció una medición de referencia con el propósito de asegurar que la potencia óptica de las muestras no superara los límites de detección ni saturara el Analizador de Espectro Óptico (OSA) utilizado.

Pasos evaluación transmisión de potencia muestras

1. Se identificó la fuente de LED con mayor potencia lumínica, dicho LED se utilizó como unidad de referencia para comparar las potencias de las demás fuentes y evaluar la relación entre dichos valores.
2. Se seleccionaron de manera secuencial las muestras generadas priorizando mantener la clasificación inicial.
3. Las muestras se colocaron en la sección central del sistema de soporte diseñado, donde se caracterizaron sus valores de transmisión y se obtuvieron los valores de potencia de las respectivas muestras ópticas.
4. Se intercambiaron de manera secuencial las cuatro fuentes de luz disponibles en el dispositivo. El objetivo de este procedimiento fue analizar el impacto de las manipulaciones físicas de la fibra sobre los distintos espectros de onda.
5. Se evaluaron los valores de potencia haciendo uso de un medidor de potencia calibrado para no medir interferencia de la luz del ambiente.
6. Al obtener los valores se registraron los datos en una tabla comparativa que analizaremos más adelante.
7. Una vez se realizaron las mediciones por cada una de las fuentes disponibles, se intercambia el filamento siguiendo el orden secuencial anteriormente realizado. Cuando no hubo más muestras por analizar se agruparon las mediciones en la tabla comparativa en base a la fuente medida.
8. Finalmente, se evalúa una nueva muestra sin modificar como forma de referencia inicial, para comparar los valores con y sin una muestra modificada. Dicha muestra de referencia se anexa a la tabla generada.

Análisis de Espectro

Una vez obtenidos los valores de potencia de transmisión de la luz por cada una de las fuentes lumínicas a través de cada una de las muestras generadas. Procederemos a analizar el espectro generado por dichas muestras.

De manera inicial se realizarán los procesos sin incluir sustancias externas a las muestras, pero posteriormente se repetirán las mediciones incluyendo distintos aceites variando los índices de refracción de dichas sustancias.

Análisis de Espectro sin sustancias añadidas

1. Al igual que el primer paso de caracterización es necesario adecuar las mediciones en una unidad estándar para evaluar las diferencias entre las mediciones. Se utilizó el mismo valor de referencia utilizado en el proceso de caracterización buscando que todas las muestras se encontraran bajo las mismas condiciones.
2. Se seleccionaron de manera secuencial las muestras generadas priorizando mantener la clasificación inicial.
3. Las muestras se colocaron en la sección central del sistema de soporte diseñado, donde se caracterizaron sus valores de transmisión y se obtuvieron los espectros ópticos correspondientes, con el propósito de evaluar las variaciones.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

4. Se intercambiaron de manera secuencial las cuatro fuentes de luz disponibles en el dispositivo. El objetivo de este procedimiento fue analizar el impacto de las manipulaciones físicas de la fibra sobre los distintos espectros de onda.
5. Se optó por generar espectros extra para su análisis, es necesario adecuar los valores del potenciómetro del circuito utilizado para alimentar la fuente lumínica del sistema para que el espectro se adecue correctamente a los valores máximos del sensor, esto para evaluar a detalle el espectro de ondas generado.
6. En adición, al espectro generado anteriormente, se incluye un nuevo espectro en base al valor de resistencia utilizado por cada fuente durante el proceso de caracterización de las fibras, esto proporciona un nuevo espectro de comparación con los espectros de referencia obtenidos durante el proceso de caracterización de las fibras.
7. Se caracterizaron los espectros de cada una de las muestras se almacenaron detallando en los archivos generados la configuración del circuito utilizado y la fuente lumínica Utilizada.
8. Una vez usadas todas las fuentes lumínicas disponibles, se intercambió la muestra de fibra óptica utilizada. se priorizó seguir un orden secuencial durante el proceso.
9. Se repiten los pasos 3 a 8 hasta agotar las muestras generadas.

Los espectros generados se almacenaron en una carpeta de Google drive para su posterior consulta, el enlace de acceso se incluye al final del reporte.

Por otro lado, será necesario repetir el proceso anterior con variaciones mínimas para realizar la caracterización de las muestras generadas al incluírseles una sustancia externa con un índice de refracción distinto al del material de la fibra. Con esto se busca ver el cambio de los espectros al añadir estas nuevas sustancias.

Resultados

Sustancias utilizadas

Basándose en las investigaciones, se consideró una serie de sustancias como candidatos para evaluar considerando la separación entre sus índices de refracción. Considerando las sustancias de menor índice de refracción hasta las sustancias de mayor índice de refracción.

Así se consideraron las siguientes sustancias:

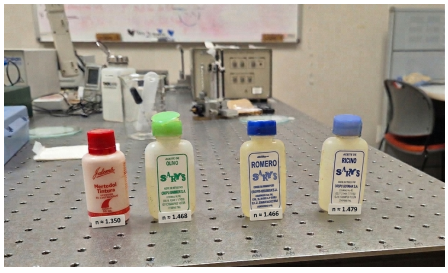


Figura 9. Sustancias utilizadas.

Sustancias utilizadas:

Tintura Mertodol. $n \approx 1.350$

Aceite de Olivo. $n \approx 1.468$

Aceite Ricino. $n \approx 1.479$

proceso de Caracterización

Una vez concluido el proceso de caracterización de las muestras podemos determinar la diferencia entre los valores de potencia de referencia de la fuente de iluminación, contrarrestándolos con los valores de potencia total medidos por el sistema final del sistema por el medidor de potencia lumínica.

Estas mediciones comparan la potencia de salida de las fuentes de iluminación al pasar a treves de una muestra de fibra óptica de referencia, sin modificaciones, comparándolas directamente con los valores obtenidos al realizar exactamente los mismos parámetros de medición con muestras manipuladas según los criterios descritos en el proceso de manipulación. Con una muestra sin manipular como unidad de referencia comparando estos valores de potencia trasladándose por las muestras restantes correspondientes. Finalmente se obtuvieron las siguientes mediciones mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 1. *Tabla comparativa evaluación muestras.*

	POTENCIA			
MUESTRA / LED	AZUL	BLANCO	ROJO	ROSA
Referencia	3.39 µW	8.56 µW	2.8 µW	7.25 µW
Muestra 1	2.11 µW	4.76 µW	2.02 µW	4.36 µW
Muestra 2	1.52 µW	4.53 µW	1.65 µW	3.63 µW
Muestra 3	2.39 µW	5.16 µW	1.88 µW	4.54 µW
5v + Resistencia.	2.1 kΩ	1 kΩ	0.66 kΩ	0.66 kΩ

De acuerdo con los datos registrados, se observa que:

- **Jerarquía de potencias:** El LED Blanco registró la mayor potencia de referencia (8.56 µW), seguido en orden decreciente por el Rosa (7.25 µW), el Azul (3.39 µW) y el Rojo (2.8 µW).
- **Efecto del circuito:** A pesar de que se variaron las resistencias para intentar igualar la potencia de los diodos (usando desde 0.66 kΩ hasta 2.1 kΩ), se mantuvo la misma diferencia de intensidad debido a la eficiencia interna de cada LED.
- **Muestras con menor pérdida (1 y 3):** Las muestras 1 y 3 presentaron el mejor rendimiento de transmisión. La Muestra 3 obtuvo los valores más altos en los LEDs Azul, Blanco y Rosa, mientras que la Muestra 1 fue ligeramente superior en el LED Rojo.
- **Muestra con mayor atenuación (2):** La Muestra 2 registró de manera constante los niveles de potencia más bajos en todos los LEDs, lo que indica que su perforación o desbaste causó una mayor dispersión y pérdida de luz.
- **Consistencia y estabilidad:** Todas las muestras conservaron exactamente el mismo patrón de intensidad de las fuentes. Esto confirma que el nuevo método de posicionamiento del soporte funciona correctamente y ofrece mediciones estables y repetibles.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización óptica de las muestras bajo el estímulo de las cuatro fuentes de iluminación disponibles (azul, blanco, rojo y rosa). En las siguientes tablas se recopilan los valores de potencia medidos para la fibra sin alteraciones (referencia) y para las piezas manipuladas físicamente, incluyendo el cálculo de la ratio de transmisión y la atenuación correspondiente expresada en decibelios (dB):

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Fuente: LED Azul.

Tabla 2. *Valores de potencia y atenuación por muestra, fuente Azul.*

		Potencia entrada	3.39 µW	[DB]
		Potencia salida	P.entr/P.sal	
Muestra 0	Caras pulidas sin quitar curvatura	3.39 µW	1	0
Muestra 1	Caras pulidas con desbaste	2.11 µW	0.6224	2.0592
Muestra 2	Caras pulidas con desbaste	1.52 µW	0.5561	3.4836
Muestra 3	Caras pulidas con desbaste	2.39 µW	0.7214	1.5180

Fuente: LED Blanco.

Tabla 3. *Valores de potencia y atenuación por muestra, fuente Blanco.*

		Potencia entrada	8.56 µW	[DB]
		Potencia salida	P.entr/P.sal	
Muestra 0	Caras pulidas sin quitar curvatura	8.56 µW	1	0
Muestra 1	Caras pulidas con desbaste	4.76 µW	0.5561	2.5487
Muestra 2	Caras pulidas con desbaste	4.53 µW	0.5292	2.7638
Muestra 3	Caras pulidas con desbaste	5.16 µW	0.6028	2.1982

Fuente: LED Rojo.

Tabla 4. *Valores de potencia y atenuación por muestra, fuente Rojo.*

		Potencia entrada	2.80 µW	[DB]
		Potencia salida	P.entr/P.sal	
Muestra 0	Caras pulidas sin quitar curvatura	2.80 µW	1	0
Muestra 1	Caras pulidas con desbaste	2.02 µW	0.7214	1.4181
Muestra 2	Caras pulidas con desbaste	1.65 µW	0.5893	2.2967
Muestra 3	Caras pulidas con desbaste	1.88 µW	0.6714	1.7300

Fuente: LED Rosa.

Tabla 5. *Valores de potencia y atenuación por muestra, fuente Rosa.*

		Potencia entrada	7.25 uW	[DB]
		Potencia salida	P.entr/P.sal	
Muestra 0	Caras pulidas sin quitar curvatura	7.25 µW	1	0
Muestra 1	Caras pulidas con desbaste	4.76 µW	0.6014	2.2085
Muestra 2	Caras pulidas con desbaste	3.63 µW	0.5007	3.0043
Muestra 3	Caras pulidas con desbaste	4.54 µW	0.6262	2.0328

A partir de los valores obtenidos podemos considerar una serie de observaciones que valen la pena destacar.

- **La Muestra 2 generó el mayor desperdicio de luz:** De manera consistente en los cuatro colores de LED, la Muestra 2 es la que presenta los valores más altos de pérdida real en decibelios. El caso más crítico es el del LED azul donde la atenuación sube hasta 3.4836 dB, seguido por el LED rosa con 3.0043 dB (lo que físicamente significa que se desperdició la mitad de la potencia original). Esto demuestra que el maquinado o manipulación de la Muestra 2 fue el más agresivo con el núcleo de la fibra.

- **Las Muestras 1 y 3 son las más eficientes:** Estas dos muestras mantuvieron una proporción de transmisión más alto y, por ende, menores pérdidas. La Muestra 3 destaca especialmente al conseguir la menor atenuación con el LED azul (1.5180 dB) y con el LED blanco (2.1982 dB), mientras que la Muestra 1 tuvo su mejor desempeño con el LED rojo (1.4181 dB).

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

- **El LED Azul es el más sensible a las manipulaciones:** La longitud de onda del color azul experimentó el comportamiento más drástico de todo el experimento, registrando tanto la pérdida más baja (1.5180 dB en Muestra 3) como la pérdida más alta de toda la práctica (3.4836 dB en Muestra 2). Las fuentes de luz blanca y rosa mantuvieron pérdidas mucho más estables y emparejadas entre sí en todas las muestras.

Resultados Espectros

- ***Espectros originales de referencia.***

  A continuación, se presentan las gráficas de caracterización óptica agrupadas por color de LED. Estas gráficas permiten comparar la emisión de la fuente con y sin las muestras de referencia, con el fin de analizar cómo influye la presencia o modificación de dichas muestras.

Espectros Azul – Referencia y diferentes muestras

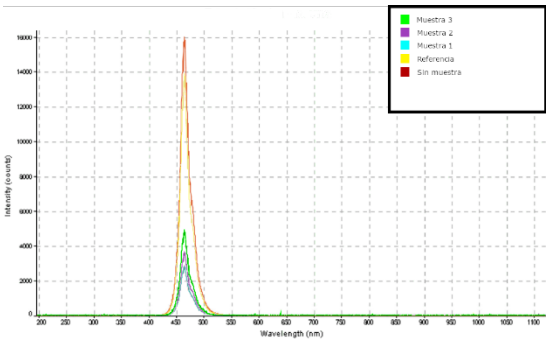


Figura 10. Espectro Led azul, muestras con y sin muestra referencia, y muestras sin sustancias.

Espectros Rojo – Referencia y diferentes muestras

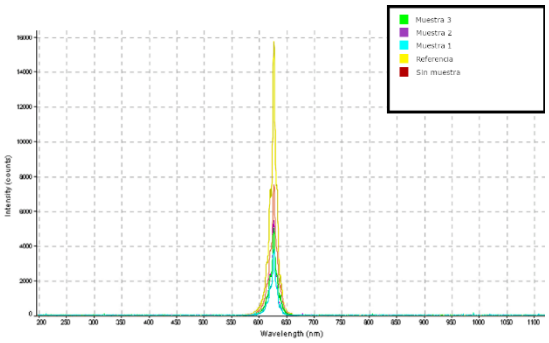


Figura 12. Espectro Led rojo, muestra con y sin referencia, muestras sin sustancias.

Espectros Blanco – Referencia y diferentes muestras

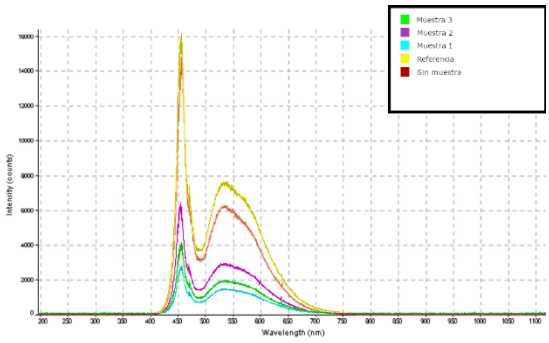


Figura 11. Espectro Led Blanco, muestra con y sin referencia, muestras sin sustancias.

Espectros Rosa – Referencia y diferentes muestras

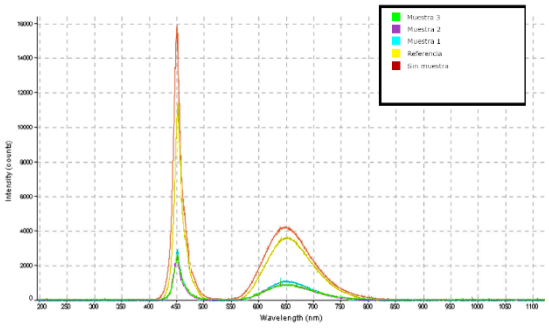


Figura 13. Espectro Led rosa, muestra con y sin referencia, muestras sin sustancias.

Finalmente, el hecho de que todas las curvas mantengan la misma forma, pero en diferentes escalas confirma que las manipulaciones físicas en la fibra alteran la potencia total de la luz transmitida (causando atenuación), pero no modifican la longitud de onda de la fuente de iluminación

- **Espectros muestras con sustancias agregadas**

  A continuación, se presentan las gráficas de caracterización óptica agrupadas por color de LED. En cada una se muestra la relación entre la longitud de onda detectada por el sensor y su correspondiente intensidad, especificando las muestras utilizadas en la leyenda.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Estas gráficas permiten comparar la emisión de la fuente con y sin las muestras de referencia, con el fin de analizar cómo influye la presencia o modificación de dichas muestras.

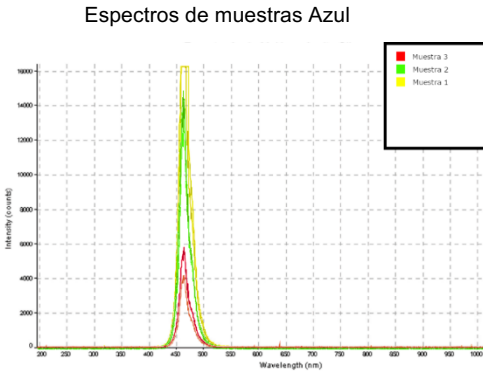


Figura 14. Espectros en conjunto fuente Azul

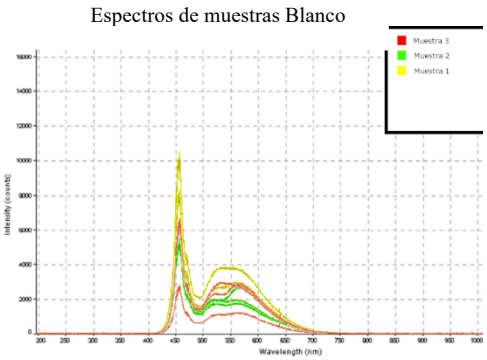


Figura 23. Espectros en conjunto fuente blanca.

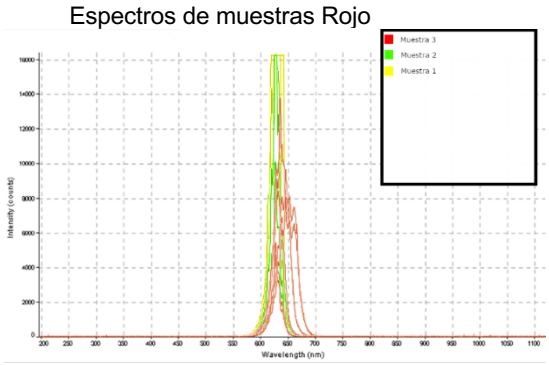


Figura 24. Espectros en conjunto fuente Rojo.

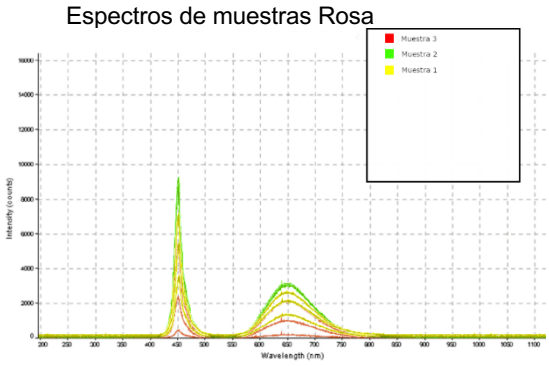


Figura 25. Espectros en conjunto fuente Rosa.

Los espectros generados por el led rojo son un caso especial: al agregar el aceite de olivo el espectro cambia conforme la potencia de alimentación del led, por ello se añadieron nuevos espectros en la figura 26 para capturar el fenómeno.

El análisis físico se fundamenta en la Reflexión Interna Total (RIT) que confina la luz en el núcleo de PMMA de la fibra $n \approx 1.49$. Al retirar la cubierta protectora y aplicar modificaciones como el desbaste en "C" y las perforaciones, el núcleo de la fibra entra en contacto directo con las sustancias externas. La variación del índice de refracción n de estos fluidos altera el contraste óptico con el núcleo, modificando el guiado y forzando la fuga selectiva de la señal lumínica.

La Tintura de Mertodol $n \approx 1.350$ conserva un mejor guiado de luz debido a que mantiene una diferencia de índices amplia respecto al núcleo, evitando que las condiciones de RIT se degraden drásticamente. Por el contrario, el Olivo $n \approx 1.468$ reduce considerablemente este contraste. Esta cercanía de índices estrecha el ángulo crítico de propagación y provoca la deserción de múltiples modos de luz hacia el fluido, lo que explica por qué bajo la iluminación azul con aceite de olivo fue necesario elevar la potencia eléctrica del LED a 3.458 mW para contrarrestar la atenuación.

El escenario de pérdidas es más crítico con el Aceite de Ricino $n \approx 1.479$, cuyo índice es el más cercano al del núcleo de la fibra. Esta similitud en los índices anula la capacidad de la fibra desbastada para reflejar internamente la luz, haciendo que el núcleo actúe como un emisor hacia el exterior. Este fenómeno justifica el comportamiento del LED rojo en la muestra tres con aceite de ricino, donde la señal experimentó pérdidas tan extremas que la intensidad espectral continuó decayendo incluso al elevar la alimentación a un valor crítico de 81 mW.

Por otra parte, la fuente de iluminación rosa evidenció un comportamiento exclusivo, registrando un incremento anómalo de intensidad entre los 550 nm y 850 nm al añadir cloruro de benzalconio. Este cambio sugiere que las propiedades químicas de la sustancia actúan como filtro óptico o generan una respuesta de fotoluminiscencia secundaria ante las ondas más cortas del LED rosa, aumentando la potencia de forma selectiva en las longitudes de onda largas en comparación con la referencia.

Finalmente, la muestra dos consolidó las pérdidas más altas en todos los canales de color. Al combinar una modificación deficiente con la adición de compuestos de alto índice de refracción como los aceites, se maximiza la tasa de rayos de luz que escapan de la guía de onda, atenuando la señal capturada por el OSA y elevando el consumo eléctrico necesario para intentar restablecer la línea base uniforme de medición.

Conclusión

En conclusión, se cumplió de manera exitosa el objetivo de evaluar el impacto de las manipulaciones físicas de la fibra (desbaste en "C" y perforaciones) y la adición de sustancias sobre los distintos espectros de onda del sistema. Se comprobó experimentalmente que alterar la geometría de la guía de onda rompe de forma severa las condiciones de Reflexión Interna Total (RIT) dentro del núcleo de PMMA con $n \approx 1.49$. Esto expone el campo evanescente y los modos guiados a los fluidos externos, provocando una atenuación y fuga selectiva de la señal lumínica que resulta directamente proporcional a las propiedades ópticas del compuesto circundante.

La magnitud de las pérdidas registradas responde estrictamente al índice de refracción n de las sustancias mediante el principio de acoplamiento de índices. Compuestos con un menor índice, como la Tintura de Mertodol $n \approx 1.350$, preservan una diferencia amplia respecto al núcleo y permiten retener un guiado de luz más eficiente. Por el contrario, fluidos con índices muy cercanos al del PMMA, como el Aceite de Ricino $n \approx 1.479$, anulan casi por completo la capacidad de reflexión de la fibra desbastada, haciendo que el núcleo actúe como un emisor hacia el exterior; este fenómeno se traduce en pérdidas críticas de potencia que obligan a incrementar drásticamente la alimentación eléctrica de las fuentes (alcanzando un máximo de 81 mW en el canal rojo) para poder registrar lecturas en el instrumento.

Finalmente, el desempeño general de las muestras como sensor demostraron estar condicionadas tanto por la severidad del maquinado como por la longitud de onda de trabajo. La Muestra 2 se consolidó de manera sistemática como la modificación más agresiva del núcleo, acumulando los mayores niveles de atenuación en todos los canales ópticos y registrando su punto más crítico bajo la fuente azul con una pérdida real de 3.4836 dB. Al contrastar las fuentes de iluminación, el LED azul evidenció ser el canal más sensible y propenso a sufrir variaciones de potencia ante los cambios geométricos, mientras que el LED rosa manifestó un comportamiento morfológico exclusivo mediante un incremento anómalo de intensidad entre los 550 nm y 850 nm, lo cual confirma que ciertas sustancias químicas modifican la dispersión cromática o inducen efectos de fotoluminiscencia secundaria en rangos específicos del espectro.

En conjunto, los resultados validan la viabilidad de emplear fibras ópticas plásticas desbastadas como plataforma para el desarrollo de sensores ópticos de bajo costo basados en intensidad. La combinación entre la modificación controlada de la fibra y la selección adecuada de la longitud de onda de iluminación permite obtener respuestas diferenciadas frente a sustancias con distintos índices de refracción, lo que abre la posibilidad de desarrollar sensores químicos o biosensores para aplicaciones de monitoreo de líquidos. Como trabajo futuro, resulta conveniente optimizar el proceso de fabricación para reducir la variabilidad entre muestras, ampliar el número de sustancias evaluadas y aplicar métodos de procesamiento de señales y reconocimiento de patrones que permitan mejorar la selectividad y sensibilidad del sistema sensor.

Referencias

Barroso Rivas, S., & Espinosa Luna, R. (2013). *CARACTERIZACIÓN POLARIMÉTRICA DE FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO.* Centro de Investigaciones de Óptica. León, Guanajuato: A.C. https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/467

Castellarin, E. (2003). *Procesos de fabricación de fibras ópticas.* Tesis, Universidad de Belgrano, Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática Ingeniería Industrial: Departamento de investigación. https://repositorio.ub.edu.ar/handle/123456789/303

Rivas, S. B. (2013). *Caracterización polarimétrica de fibrasópticas monomodo.* Tesis de postgrado, Centro de Investigaciones en Óptica, Maestría en Optomecatrónica, León, Gto. https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/467