



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
LICENCIATURA EN FÍSICA APLICADA

**INTERFERÓMETRO DE MICHELSON EN FIBRA ÓPTICA
UTILIZANDO UNA REJILLA DE PERIODO LARGO PARA LA
DETECCIÓN DE ACETONA**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN FÍSICA APLICADA

PRESENTA

ANGÉLICA RUÍZ MÁRQUEZ

DIRECTOR DE TESIS

DRA. GEORGINA BELTRÁN PÉREZ

PUEBLA, PUE.

FEBRERO 2025

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta la aplicación del interferómetro de Michelson (MI por sus siglas en inglés) implementado en fibra óptica estándar para la detección de acetona, la cual es un biomarcador de la diabetes mellitus. La configuración del MI consistió en una rejilla de periodo largo (LPFG por sus siglas en inglés) grabada por el método de arco eléctrico sobre una fibra SMF-28. Con el objetivo de obtener un mejor contraste en el MI se varió el periodo de la LPFG con valores de 515 y 530 nm, con 40 puntos de grabado, por otra parte, la distancia entre la LPFG y el corte final de fibra fueron de 3, 4 y 5 cm. Para la construcción del MI se realizó la foto-deposición de nanopartículas de oro esféricas de 25 nm, en la punta de la fibra con una potencia de 30 mW a 980 nm. Por otra parte, también se utilizaron películas reflejantes construidas a base de nitrato de plata y el corte perpendicular de la punta de la fibra. Como película sensible se utilizó polidimetilsiloxano (PDMS). Las caracterizaciones del sensor MI se realizaron dentro de un cámara de teflón de 1L de volumen, en donde se inyectaron 0.1 μ L de acetona diez veces y se midió durante 10 min. en cada inyección. A partir de los resultados obtenidos se realizó un programa en MATLAB para aplicar técnicas de análisis de multivariadas, tales como: Análisis de componentes principales (PCA) y Regresión por proyección de estructuras latentes (PLSR). Los resultados muestran que el menor límite de detección fue de 2.162 ppm para el sensor con periodo de 530 nm usando nanopartículas de oro.

Dedicatoria

*Para mi familia, cuyo amor y apoyo incondicional han sido mi mayor
fortaleza.*

Agradecimientos

A mi familia.

A mi asesora de tesis, la Dra. Georgina Beltrán Pérez.

A los Drs. y maestros del cuerpo académico de optoelectrónica.

Al Dr. Marcos Rodríguez Torres del laboratorio de sensores y biosensores.

Al Dr. Plácido Zaca Morán del laboratorio de láseres y fibras ópticas de CU2.

A los catedráticos de la FCFM.

A mis amigos del laboratorio de optoelectrónica.

A mis amigos de la carrera y universidad.

Contenido

Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Acetona como biomarcador de la diabetes mellitus	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Técnicas para la detección de la acetona.....	3
1.3.1 Cromatografía de Gases (GC).....	4
1.3.2. Espectroscopía Láser.....	4
1.3.3. Sensores Electrónicos	5
1.3.4. Sensores Ópticos.....	5
1.4 Sensores de fibra óptica para la detección de acetona	6
1.5 Objetivos Generales y Particulares de la tesis	8
1.5.1 Objetivo General.....	8
1.5.3 Objetivos Particulares	8
Capítulo 2.....	9
Teoría de fibras ópticas	9
2.1 Qué es una fibra óptica y propagación de la luz en una fibra óptica.....	9
2.2. Modos	12
2.3. Teoría de modos para guías de ondas circulares.....	13
2.4. Fibras Ópticas Monomodo.....	14
2.5. Ecuaciones de Maxwell en Fibras Ópticas	14
2.6. Ecuaciones de onda para fibras de índice escalonado	16
2.7. Ecuación modal.....	18
2.8. Modos en fibras de índice escalonado	19
Capítulo 3.....	21
Interferómetros en fibra óptica	21
3.1 Interferencia de la Luz.....	22
3.2. Tipos de interferómetros	23
3.2.1 Interferómetro de Mach-Zehnder	24
3.2.2 Interferómetro de Sagnac.....	24
3.2.3 Interferómetro de Fabry-Pérot	25

3.2.4 Interferómetro de Michelson (MI).....	26
Capítulo 4.....	28
Teoría de rejillas de periodo largo	28
4.1 Rejillas en fibra óptica.....	28
4.2 Rejillas de periodo largo (LPFGs)	28
4.3 Tipos de rejillas de periodo largo.....	29
4.3.1 Rejilla de periodo largo uniforme	29
4.3.2 Rejilla de periodo largo no uniforme (de periodo variable)	30
4.3.3 Rejilla de periodo largo con corrimiento de fase.....	30
4.3.4 Rejilla de periodo largo inclinada	30
4.4 Técnicas de fabricación de rejillas en fibra óptica.....	31
4.4.1 Irradiación con láser ultravioleta	31
4.4.2 Inscripción interna	32
4.4.3 Técnica de Fabricación Interferométrica.....	32
4.4.4 Técnica de mascara de fase.....	33
4.4.5 Fabricación punto por punto	34
4.4.6 Exposición a un arco eléctrico	34
4.5 Interferómetro de Michelson usando una rejilla de periodo largo	36
4.5.1 Teoría	37
4.5.2 Esquema y Matrices para una LPFG.....	38
4.5.3 Matrices de Transferencia.....	38
4.5.4 Matrices de Estado	38
4.5.5 Propagación del Campo Eléctrico	39
Capítulo 5.....	43
Análisis Multivariante	43
5.1 Análisis de Componentes Principales (PCA)	43
5.1.1 Fundamentos Matemáticos	43
5.1.2 Procedimiento del PCA	43
5.1.3 Análisis de componentes principales en dos variables	44
5.1.4 Análisis de componentes principales en p variables	46
5.1.5 Resumen final del procedimiento para PCA	47

5.1.6 Interpretación y utilización de PCA.....	48
5.2 Regresión por proyección de estructuras latentes (PLSR)	49
5.2.1 Principio básico de PLSR	49
5.2.2 Pasos fundamentales de PLSR	49
5.2.3 Aplicaciones comunes.....	50
5.2.4 Diferencias con otras técnicas	50
5.2.5 Formalismo PLSR.....	50
Capítulo 6.....	53
Arreglo Experimental	53
6.1 Fabricación de la LPFG	53
6.2 Diseño y caracterización del interferómetro de Michelson	54
6.2.1 Proceso de fotodeposición de nanopartículas de oro	55
6.2.2 Síntesis y depósito de una película reflejante (plata metálica) por medio de la reacción de Tollens.....	56
6.2.3 Depósito de Polidimetilsiloxano	59
6.3 Medición de acetona	59
Capítulo 7	61
Resultados y discusiones	61
Capítulo 8.....	73
Conclusiones	73
Referencias.....	75
Referencias.....	77

Lista de Figuras

Fig. 1: Representación del ángulo crítico y reflexión total interna entre dos diferentes materiales.	10
Fig. 2: Esquema de una estructura de fibra de silicio convencional conformada por un núcleo sólido circular de índice de refracción n_1 rodeado por una cubierta que tiene un índice de refracción $n_2 < n_1$ y un revestimiento de plástico elástico que encapsula la fibra.	11
Fig. 3: Comparación de fibras ópticas convencionales monomodo de índice escalonado y multimodo de índice escalonado e índice graduado [15].	12
Fig. 4: Variación de la función de Bessel $J_n(x)$ para los tres primeros órdenes ($n = 0, 1, 2$) graficada como una función de x	19
Fig. 5: Variación de la función de Bessel modificada de segunda clase $kn(x)$ para los tres primeros órdenes ($n = 0, 1, 2$) graficada como una función de x	19
Fig. 6: Vistas de los extremos de la fibra de los vectores de campo eléctrico transversales para los cuatro modos de orden más bajo en una fibra de índice escalonado.	20
Fig. 7: Sensor extrínseco.	21
Fig. 8: Sensor intrínseco.	21
Fig. 9: Sensor de fase o interferométrico [16].	22
Fig. 10: Ondas de dos fuentes puntuales superpuestas espacialmente.	22
Fig. 11: Configuración del MZI.	24
Fig. 12: Configuración del SI.	25
Fig. 13: Configuración del FPI.	26
Fig. 14: Configuración del MI.	26
Fig. 15 Espectro de transmisión de una LPFG uniforme.	30
Fig. 16: Técnica de irradiación con láser ultravioleta [20].	32
Fig. 17: Técnica de Fabricación Interferométrica (con separadores de amplitud) [20].	33
Fig. 18: Técnica de Máscara de Fase [20].	33
Fig. 19: Esquemático de la fabricación de una rejilla mediante la técnica punto a punto [20].	34
Fig. 20: Método de exposición a un arco eléctrico [20].	35
Fig. 21: a) Configuración básica de un MI y b) esquema de un MI en línea compacto (21).	36
Fig. 22: Esquema de la propagación del campo eléctrico dentro de la fibra óptica. ..	40
Fig. 23: Perfil de transmisión de un MI formado por una LPFG de $\Lambda = 515 \mu\text{m}$	42
Fig. 24: Configuración del grabado de la LPFG.	54

Fig. 25: Variación de la distancia d.....	54
Fig. 26: Proceso de fotodeposición de nanopartículas de oro.	56
Fig. 27: Proceso de síntesis y depósito de plata metálica en forma de una película de plata, donde a) muestra las disoluciones de AgNO ₃ e KOH previo a su mezcla, b) ambas disoluciones son mezcladas en el mismo contenedor observado una disolución transparente, c) agregación de 100 μL NH ₃ a la mezcla de AgNO ₃ y KOH, lo que produce una oxidación y d) la agregación de la dextrosa como agente estabilizador para obtener la separación de los aldehídos y la plata metálica que se deposita sobre las paredes del vial de vidrio.....	58
Fig. 28: Configuración de medición del espectro. a) Caracterización del MI en modo de reflexión, b) Detección de acetona.	59
Fig. 29: Espectros de reflexión sin película reflejante, sin la película sensora (PDMS) y sin la interacción de la acetona para a) el sensor 1 con periodo de 515 μm y distancia del corte de 5 cm, b) el sensor 2 con periodo de 530 μm y distancia del corte de 3 cm, c) el sensor 3 con periodo de 530 μm y distancia del corte de 4 cm, d) el sensor 4 con periodo de 530 μm y distancia del corte de 5 cm.	62
Fig. 30: Espectros de salida medidos con acetona para el sensor con a) nanopartículas de oro, periodo de 515 μm y distancia del corte de 5 cm, b) nanopartículas de oro, periodo de 530 μm y distancia del corte de 3 cm, c) película reflejante de AgNO ₃ , periodo de 530 μm y distancia del corte de 4 cm, d) periodo de 530 μm, distancia del corte de 5 cm y sin película reflejante.	63
Fig. 31: Análisis PCA de los espectros en las tres primeras PCs para el sensor con a) nanopartículas de oro, periodo de 515 μm y distancia del corte de 5 cm, b) nanopartículas de oro, periodo de 530 μm y distancia del corte de 3 cm, c) película reflejante de AgNO ₃ , periodo de 530 μm y distancia del corte de 4 cm, d) periodo de 530 μm, distancia del corte de 5 cm y sin película reflejante.	66
Fig. 32: PLS-R de los datos experimentales (ppm) utilizando 4 LS para el sensor con a) nanopartículas de oro, periodo de 515 μm y distancia del corte de 5 cm, b) nanopartículas de oro, periodo de 530 μm y distancia del corte de 3 cm, c) película reflejante de AgNO ₃ , periodo de 530 μm y distancia del corte de 4 cm, d) periodo de 530 μm, distancia del corte de 5 cm y sin película reflejante.	68

Lista de Tablas

TABLA 1: COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE CADA SENSOR.	70
TABLA 2: LOD PARA CADA SENSOR.....	71
TABLA 3: ECUACIÓN DE PREDICCIÓN DE CADA SENSOR.	72

Capítulo 1

1. Introducción

1.1 Acetona como biomarcador de la diabetes mellitus

La cetosis es un estado metabólico natural en el que el cuerpo obtiene energía de la grasa almacenada debido a la falta de glucosa o azúcar, situación que ocurre durante períodos prolongados de ayuno o al seguir una dieta muy baja en carbohidratos. Cuando la glucosa, que es la principal fuente de energía del organismo, se reduce o no está disponible, el cuerpo comienza a producir cuerpos cetónicos a partir de la descomposición de las células grasas. Estos cuerpos cetónicos son transportados al cerebro y los músculos para ser utilizados como fuente de energía, permitiendo así el correcto funcionamiento del cuerpo.

Los síntomas de la cetosis pueden variar entre personas, pero el más común es un cambio en el aliento, que adquiere un olor similar al de la acetona [1]. La cetosis se puede confirmar principalmente evaluando la cantidad de cuerpos cetónicos en la orina y en la sangre. La presencia de cuerpos cetónicos en la orina se mide con una tira reactiva que cambia de color; aunque es un método más rápido, la medición de cuerpos cetónicos en la orina puede variar según el nivel de hidratación de la persona, dando resultados falsos positivos cuando está deshidratada o falsos negativos si ha bebido mucha agua.

Una forma más precisa de confirmar la cetosis es a través de un análisis de sangre, donde una pequeña muestra de sangre se envía al laboratorio para medir la concentración de cuerpos cetónicos (se considera cetosis cuando esta concentración en sangre supera los 0.5 mmol/L), sin embargo, al ser un método invasivo puede no ser el más adecuado para algunos pacientes.

Investigaciones han demostrado que la cetosis puede tener varios beneficios para la salud, como la pérdida de peso. Este proceso puede ayudar a reducir el apetito, llevando a consumir menos alimentos y favoreciendo la pérdida de grasa abdominal (grasa visceral) mientras se mantiene la masa muscular. Otros beneficios potenciales de la cetosis incluyen el tratamiento y control de enfermedades como la epilepsia, trastornos neurológicos (Alzheimer, autismo), enfermedades cardíacas, síndrome metabólico y diabetes [2].

La utilización de las cetonas por parte del cerebro condiciona en parte, que las manifestaciones neurológicas de la hipoglucemia aparezcan a niveles de glucosa más bajos que el resto de los síntomas.

Los cuerpos cetónicos son fundamentalmente tres:

- El ácido acetoacético.
- El beta-hidroxibutírico que es el ácido más dominante en pacientes con cetoacidosis.

- La acetona, que se forma a partir de la descarboxilación del ácido acético y que no es un ácido

La acetona es volátil y se excreta a través del aliento, lo que provoca un aliento con olor característico, a menudo descrito similar al quitaesmalte [3].

El aliento humano contiene varios cientos de compuestos orgánicos volátiles (COV) en concentraciones que van desde partes por billón (ppb) hasta partes por millón (ppm). El origen celular y bioquímico de muchos de estos COV no ha sido determinado y algunos de ellos podrían ser de origen exógeno. La concentración de acetona en el aliento varía de 0.3 a 0.9 ppm en personas sanas, e incrementa a valores por arriba de 1.8 ppm en personas con diabetes. Por lo tanto, la acetona puede actuar como biomarcador de afecciones metabólicas (diabetes mellitus) en el torrente sanguíneo. Utilizando técnicas de análisis del aliento, se ha demostrado que las concentraciones de acetona en el aliento exhalado se correlacionan con las concentraciones de acetona en la sangre, así como con otras cetonas como el beta-hidroxibutirato. Además, también se ha descubierto que el nivel de glucosa en sangre puede correlacionarse con los niveles de COV como la acetona. La medición de acetona en el aliento puede permitir un mejor control diagnóstico de la condición diabética de un paciente que mediante el uso únicamente de mediciones de glucosa en sangre.

La diabetes mellitus (DM) constituye una de las enfermedades crónicas más frecuentes en niños y adolescentes. La cetoacidosis diabética (CAD) es la causa principal de mortalidad en niños afectados de DM tipo 1 (DM1), se debe a una disminución en la insulina efectiva circulante, así como al aumento de hormonas contrarreguladoras, como glucagón, catecolaminas, cortisol y hormona de crecimiento. Ambos producen un aumento en la producción de glucosa por el hígado y el riñón, además de una disminución en su utilización periférica con hiperglucemia e hiperosmolaridad.

La cetosis puede ocurrir en personas con diabetes, particularmente en aquellas con DM1 (y ocasionalmente DM2) que ocurre cuando los niveles de cetonas en el aliento se vuelven peligrosamente altos debido a la falta de insulina. Sin insulina suficiente, las células no pueden usar glucosa de manera efectiva, lo que lleva al cuerpo a descomponer la grasa para obtener energía, resultando en la producción de cetonas [4].

1.2 Justificación

El aliento humano contiene miles COV diferentes derivados de los procesos metabólicos del cuerpo. En pacientes con diabetes mellitus, el cuerpo produce cantidades excesivas de cetonas, como acetona, porque el cuerpo utiliza grasas en lugar de glucosa para producir energía, que luego se exhala durante la respiración. La acetona se ha utilizado con éxito como biomarcador de la diabetes mellitus, especialmente en la diabetes mellitus tipo 1. Durante la diabetes mellitus, el hígado produce cuerpos cetónicos para actuar como fuente de energía adicional, que luego se metaboliza en acetona y otros cuerpos cetónicos. La acetona que se produce viaja a través de la sangre y se excreta a través de la orina o el aliento. Se ha descubierto que la cuantificación de la concentración de acetona en el aliento

humano, utilizando técnicas de análisis del aliento, se correlaciona fuertemente con la concentración de acetona en la sangre y otros cuerpos cetónicos como el beta-hidroxiacetato. Por lo tanto, la medición de acetona en el aliento proporciona un mejor control diagnóstico de la condición diabética de un paciente.

Aunque los análisis de sangre y orina son métodos ampliamente utilizados y efectivos para el diagnóstico y monitoreo de la diabetes, presentan varias desventajas relacionadas con la invasividad, comodidad, costos, precisión y logística, lo que puede afectar la experiencia del paciente y la eficiencia del proceso diagnóstico.

El método de detección de acetona en el aliento para detectar diabetes presenta varias ventajas significativas en comparación con los métodos convencionales de análisis de sangre y de orina. A continuación, se detallan estas ventajas:

1. **No invasivo:** La detección de acetona en el aliento es un método no invasivo. No requiere la extracción de sangre, lo cual puede ser más cómodo y menos estresante para los pacientes, especialmente aquellos que tienen aversión a las agujas o a las muestras de sangre.
2. **Rápido y conveniente:** El análisis de acetona en el aliento es generalmente más rápido que el análisis de sangre. Los resultados pueden obtenerse en cuestión de minutos, mientras que los análisis de sangre a menudo requieren tiempo para el procesamiento en laboratorio.
3. **Portabilidad:** Los dispositivos para medir acetona en el aliento pueden ser portátiles y utilizados en cualquier lugar, lo que facilita su uso en entornos como consultorios médicos, clínicas y hogares.
4. **Costo efectivo:** En general, los dispositivos para medir acetona en el aliento pueden ser menos costosos que los equipos de laboratorio necesarios para los análisis de sangre. Esto puede hacer que la detección sea más accesible, especialmente en áreas donde los recursos son limitados.
5. **Monitorización continua:** Algunos dispositivos permiten una monitorización continua de los niveles de acetona en el aliento, lo que puede ser útil para controlar la diabetes tipo 1 y tipo 2, así como para ajustar la dosis de insulina o la gestión de la dieta.

En resumen, la detección de acetona en el aliento ofrece numerosas ventajas sobre los métodos convencionales de análisis de sangre y de orina, destacándose por su comodidad, rapidez, no invasividad y potencial para un monitoreo más frecuente y accesible de la diabetes [5].

1.3 Técnicas para la detección de la acetona.

La acetona ($\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$, $M_w = 58.08$), también conocida como metilcetona, dimetilcetona, dimetilformaldehído, 2-propanona, propen-2-ona, β -cetopropano o ácido piroacético, es la más simple de las cetonas. En condiciones normales es un líquido transparente, incoloro, con olor afrutado, muy inflamable y volátil, poco viscoso y

ampliamente soluble en agua y en disolventes orgánicos como éter etílico o metanol. El vapor de acetona es más pesado que el aire y es capaz de difundir sus emisiones gaseosas a largas distancias. Se puede encontrar naturalmente en el medio ambiente y también se puede producir artificialmente. Se usa para disolver otras sustancias y para producir plásticos, pinturas, recubrimientos, y productos de limpieza y de cuidado personal. Las fuentes artificiales de acetona incluyen gases de escape de vehículos, humo de tabaco y vertederos. Las plantas, los árboles, los insectos, los microbios (gérmenes), las erupciones volcánicas y los incendios forestales liberan acetona naturalmente, también se encuentra de manera natural en muchas frutas y verduras. El cuerpo humano también produce niveles bajos de acetona en el aliento, y algunas afecciones pueden hacerlos aumentar [5].

Muchos estudios han informado sobre el análisis no invasivo de la acetona en el aliento para la detección de enfermedades utilizando técnicas como la cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS), y muchas otras técnicas sensibles. Aunque estas técnicas son sensibles y fiables, no son portátiles para el seguimiento diario. A continuación, se da una descripción de las diferentes técnicas utilizadas para la detección de acetona.

1.3.1 Cromatografía de gases (GC)

La cromatografía de gases es una técnica analítica en la que se utiliza una fase móvil gaseosa para separar compuestos en una muestra. En la detección de acetona, una muestra se volatiliza e inyecta en una columna cromatográfica, donde los diferentes componentes se separan en función de sus interacciones con la fase estacionaria de la columna. Un detector, como el detector de ionización de llama (FID) o el detector de masas (MS), identifica y cuantifica la acetona presente.

Ventajas:

- Alta precisión y sensibilidad.
- Capacidad para separar y detectar múltiples compuestos.

Desventajas:

- Equipamiento costoso y voluminoso.
- Requiere personal especializado para su operación [6].

1.3.2. Espectroscopía láser

La espectroscopía láser, especialmente la espectroscopía de absorción láser se utiliza para la detección de acetona en el aliento humano. Esta técnica se basa en la absorción selectiva de luz láser por las moléculas de acetona a una longitud de onda específica.

Ventajas:

- Alta selectividad y sensibilidad.
- Rápida y no invasiva (en el contexto de análisis de aliento).

Desventajas:

- Costo elevado de los equipos láser.
- Requiere calibración y mantenimiento cuidadoso [7].

1.3.3. Sensores electrónicos

Los sensores electrónicos para la detección de acetona incluyen sensores basados en semiconductores, como el óxido de metal (MOS). Estos sensores detectan cambios en la conductividad eléctrica cuando las moléculas de acetona interactúan con la superficie sensible del sensor.

Ventajas:

- Bajo costo y tamaño compacto.
- Fácil integración en dispositivos portátiles.

Desventajas:

- Sensibilidad a otros compuestos volátiles, lo que puede causar interferencias.
- Requiere calibración regular [8].

1.3.4. Sensores Ópticos

Los sensores ópticos para la detección de acetona utilizan principios como la fluorescencia o la absorción óptica. Un material sensible a la acetona cambia sus propiedades ópticas (como la intensidad de la fluorescencia) cuando está en contacto con acetona.

Ventajas:

- Alta sensibilidad y especificidad.
- Rápida respuesta y posibilidad de monitoreo en tiempo real.

Desventajas:

- Posible interferencia de otras sustancias que también interactúan con el material sensible.
- Requiere desarrollo y optimización de los materiales sensores [9].

Cada una de estas técnicas de detección de acetona tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la elección de la técnica adecuada varía dependiendo de factores como la sensibilidad requerida, el entorno de medición, y los recursos disponibles.

Es por eso que en este trabajo se presenta el uso de sensores de fibra óptica para la detección de acetona, ya que estos ofrecen una combinación única de sensibilidad,

precisión, resistencia a condiciones adversas y capacidad de integración que los hace superiores a muchos métodos tradicionales de detección de acetona.

1.4 Sensores de fibra óptica para la detección de acetona

Los sensores de fibra óptica para la detección de acetona implican el uso de fibras ópticas recubiertas con materiales sensibles a este compuesto. Cuando la acetona está presente, altera las propiedades ópticas de la fibra, lo que a su vez puede percibirse como cambios en la intensidad de la luz transmitida. Presentan varias ventajas significativas en la detección de acetona en comparación con otros métodos tradicionales de detección. A continuación, se detallan algunas de estas ventajas:

1. Alta sensibilidad y precisión: Los sensores de fibra óptica pueden detectar concentraciones muy bajas de acetona, ofreciendo una alta sensibilidad y precisión en las mediciones.
2. Inmunidad a interferencias electromagnéticas: A diferencia de los sensores electrónicos tradicionales, los sensores de fibra óptica no son afectados por interferencias electromagnéticas, lo que garantiza mediciones más fiables en entornos ruidosos.
3. Pequeño tamaño y flexibilidad: Las fibras ópticas son extremadamente delgadas y flexibles, lo que permite su uso en aplicaciones donde el espacio es limitado o se requiere un diseño flexible.
4. Capacidad de monitoreo en tiempo real: Los sensores de fibra óptica permiten el monitoreo continuo y en tiempo real de los niveles de acetona, lo que es crucial para aplicaciones donde se necesita una respuesta inmediata.
5. Resistencia a condiciones extremas: Estos sensores pueden operar en ambientes hostiles, con temperaturas extremas y en presencia de sustancias químicas corrosivas, lo que amplía su rango de aplicaciones.
6. Larga vida útil y bajo mantenimiento: Las fibras ópticas tienen una vida útil prolongada y requieren un mantenimiento mínimo, lo que reduce los costos operativos a largo plazo.
7. Seguridad: Al no conducir electricidad, los sensores de fibra óptica son seguros de usar en entornos donde existen riesgos de explosión o en atmósferas inflamables.
8. Multiplexación: Es posible multiplexar varios sensores de fibra óptica en una sola línea, lo que permite monitorear múltiples puntos simultáneamente con un solo sistema de detección.
9. Alta selectividad: Los sensores de fibra óptica pueden diseñarse para ser altamente selectivos para la acetona, reduciendo las interferencias de otras sustancias presentes en el entorno.

10. Compatibilidad con tecnología avanzada: Estos sensores son compatibles con tecnologías avanzadas de procesamiento de datos y telecomunicaciones, facilitando la integración en sistemas de monitoreo y control automatizados.

En resumen, los sensores de fibra óptica ofrecen una serie de ventajas que los hacen ideales para la detección de acetona en una amplia gama de aplicaciones, desde el monitoreo médico hasta la detección industrial y ambiental. Su alta sensibilidad, resistencia a condiciones extremas, y capacidad de integración en sistemas avanzados los posicionan como una solución superior en comparación con otros métodos de detección tradicionales [10].

Para potenciar el uso de los sensores de fibra óptica se implementan interferómetros debido a su alta sensibilidad y precisión en la detección de cambios físicos. Los interferómetros pueden detectar cambios extremadamente pequeños en las propiedades de la luz (como la fase y la longitud de onda) que viaja a través de la fibra óptica, lo que permite que los sensores detecten variaciones minúsculas en el entorno, como cambios de temperatura, presión, deformación y vibraciones. Además, estos dispositivos funcionan midiendo las diferencias de fase entre dos o más haces de luz. Dado que la fase de la luz puede ser afectada por factores externos como la temperatura o la presión, los interferómetros pueden detectar estos cambios con gran precisión. Otra ventaja es la capacidad de multiplexación, que permite a los sistemas interferométricos monitorear múltiples puntos a lo largo de una sola fibra óptica mediante técnicas como la multiplexación por división de tiempo o longitud de onda, creando redes de sensores distribuidos. La fibra óptica es inmune a las interferencias electromagnéticas, lo que hace que los sensores basados en interferómetros sean ideales para entornos con altos niveles de interferencia eléctrica. Además, los interferómetros de fibra óptica pueden ser muy compactos y ligeros, lo que es beneficioso en aplicaciones donde el espacio y el peso son limitados. Finalmente, estos dispositivos son muy versátiles y pueden ser diseñados para medir una amplia gama de parámetros físicos y químicos, lo que los hace útiles en diversas aplicaciones, desde el monitoreo estructural hasta la medición ambiental y biomédica. En resumen, la implementación de un interferómetro en un sensor de fibra óptica permite aprovechar la capacidad de la luz para detectar cambios extremadamente pequeños y precisos en el entorno, proporcionando una herramienta de medición altamente sensible y versátil [11].

En aplicaciones de sensores destaca el uso del MI debido a su alta precisión, versatilidad y simplicidad relativa, permitiendo mediciones sensibles y confiables de una amplia gama de parámetros físicos y químicos en diversas condiciones y entornos. En espacio libre su funcionamiento se basa en la división de un haz coherente de luz en dos haces, los cuales recorren caminos ópticos diferentes, al final de cada camino se encuentra un espejo $\sim 100\%$ reflejante, lo que permite el regreso de la luz para que coincidan nuevamente en un punto del espacio. De esta forma se obtiene el patrón de interferencia con el cual es posible determinar pequeñas variaciones entre los caminos seguidos por los haces [12]. En el presente trabajo se presenta la implementación del MI en fibra óptica, este funciona de manera similar al MI clásico, pero emplea fibras ópticas en lugar de espejos y

camino libre, se utiliza una LPFG para dividir la intensidad de la luz de entrada, proveniente de una fuente coherente, y los espejos se sustituyen por el propio extremo de la fibra debidamente terminado junto con una película reflectora.

1.5 Objetivos Generales y Particulares

1.5.1 Objetivo General

La presente tesis tiene como objetivo desarrollar un MI basado en fibra óptica para la detección de acetona. Se busca desarrollar un sensor eficiente para la monitorización precisa de concentraciones de acetona, contribuyendo así al desarrollo de un método más efectivo y accesible para el diagnóstico y control de enfermedades metabólicas como la diabetes.

1.5.3 Objetivos Particulares

1. Eficientizar el funcionamiento del sensor interferométrico en base a un estudio experimental usando diferentes películas reflejantes en la punta de la fibra previamente cortada de manera perpendicular, una de nanopartículas de oro esféricas de 25 nm, y una película reflejante construida a base de nitrato de plata (AgNO_3).
2. Optimizar el espectro mediante la implementación del interferómetro variando las longitudes de camino óptico, esto realizando el corte perpendicular de la fibra a diferentes distancias, así mismo variando el periodo de la LPFG con valores de 515 y 530 nm, con 40 puntos de grabado.
3. Utilizar las técnicas de análisis de multivariantes tales como: PCA y PLSR para determinar la respuesta de los sensores desarrollados.

Capítulo 2

Teoría de fibras ópticas

2.1 Qué es una fibra óptica y propagación de la luz en una fibra óptica

En la transmisión de la luz ocurren dos fenómenos físicos, la reflexión y la refracción. La reflexión es la desviación o cambio de dirección del haz de luz que incide en la superficie del medio. La refracción es el cambio de dirección y velocidad del haz de luz al pasar de un medio a otro con diferentes índices de refracción. La velocidad de la luz depende del material por donde viaja. En el vacío, la luz tiene una velocidad constante máxima, pero cuando pasa a través de un material transparente, se ralentiza en una cantidad dependiente de una propiedad del material llamado índice de refracción (n). El índice de refracción del medio es la relación entre la velocidad de la onda luminosa en el vacío y la velocidad de la onda luminosa propagada en el medio (Ecuación 1) [13].

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Dependiendo del ángulo en el que incide el haz, este presentará un comportamiento y una dirección distintos. El ángulo crítico es aquel en el que el haz no se refracta y se desplaza a lo largo del límite entre los dos medios de propagación. Si el ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico, el haz se divide: una parte se refracta y la otra se refleja. Finalmente, cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, ocurre una reflexión total interna. Este comportamiento de refracción se explica por la ley de Snell, Ecuación 2 [14]. En la Fig. 1, si $n_1 > n_2$, la ecuación de Snell predice la condición de reflexión interna total.

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (2)$$

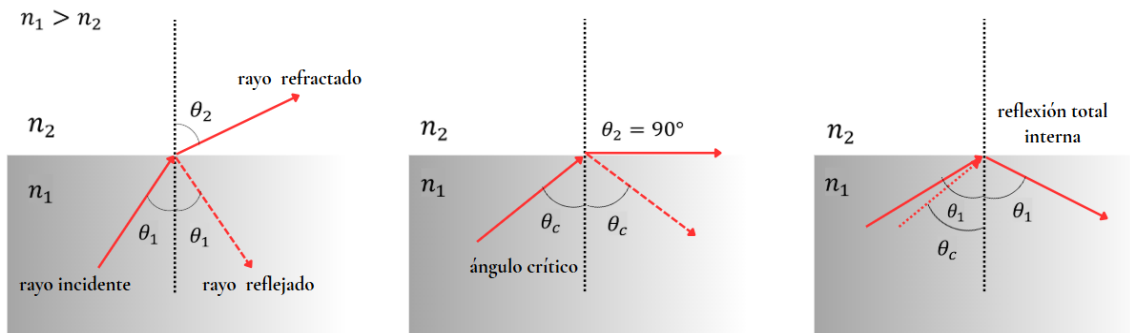


Fig. 1: Representación del ángulo crítico y reflexión total interna entre dos diferentes materiales.

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica que opera a frecuencias ópticas. Esta guía de onda de fibra normalmente tiene forma cilíndrica. Confina la energía electromagnética en forma de luz dentro de sus superficies mediante el principio de reflexión interna total, y guía la luz en una dirección paralela a su eje. Las propiedades de transmisión de una guía de onda óptica están determinadas por sus características estructurales, que tienen un efecto importante en la determinación de cómo se ve afectada una señal óptica a medida que se propaga a lo largo de la fibra. La estructura establece básicamente la capacidad de la fibra para transportar información y también influye en la respuesta de la guía de onda a las perturbaciones ambientales.

La propagación de la luz a lo largo de una guía de onda se puede describir en términos de un conjunto de ondas electromagnéticas guiadas llamadas modos de la guía de onda. Estos modos guiados se conocen como modos ligados o atrapados de la guía de onda. Cada modo guiado es un patrón de distribuciones de campos eléctricos y magnéticos que se repite a lo largo de la fibra a intervalos iguales. Sólo un cierto número discreto de modos son capaces de propagarse a lo largo de la guía. Estos modos son aquellas ondas electromagnéticas que satisfacen la ecuación de onda homogénea en la fibra y la condición de contorno en las superficies de la guía de onda.

Aunque en la literatura se han analizado muchas configuraciones diferentes de la guía de onda óptica, la estructura más aceptada es la del cilindro dieléctrico sólido único de radio a e índice de refracción n_1 como se muestra en la Fig. 2. Este cilindro se conoce como el núcleo de la fibra (core por su nombre en inglés). El núcleo está rodeado por una cubierta dieléctrica sólida (cladding por su nombre en inglés), que tiene un índice de refracción n_2 menor que n_1 ($n_2 < n_1$). Aunque, en principio, una cubierta no es necesaria para que la luz se propague a lo largo del núcleo de la fibra, sirve para varios propósitos. La cubierta reduce la pérdida por dispersión que resulta de las discontinuidades dieléctricas en la superficie del núcleo, agrega resistencia mecánica a la fibra y protege al núcleo de la absorción de contaminantes superficiales con los que podría entrar en contacto.

En las fibras ópticas estándar, el material del núcleo es un compuesto de vidrio de silicio (SiO_2) de alta pureza y está rodeado por una cubierta de vidrio. Las fibras con núcleo de plástico de mayor pérdida y cubierta de plástico también se utilizan ampliamente.

Además, la mayoría de las fibras están encapsuladas en un material plástico elástico y resistente a la abrasión. Este material agrega más resistencia a la fibra y aísla o amortigua mecánicamente las fibras de pequeñas irregularidades geométricas, distorsiones o rugosidades de las superficies adyacentes. Estas perturbaciones podrían causar pérdidas por dispersión inducidas por curvaturas microscópicas aleatorias que pueden surgir cuando las fibras se incorporan a cables o se sostienen sobre otras estructuras [15].

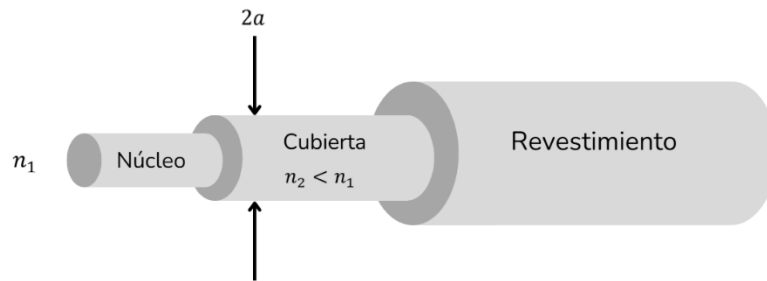


Fig. 2: Esquema de una estructura de fibra de silicio convencional conformada por un núcleo sólido circular de índice de refracción n_1 rodeado por una cubierta que tiene un índice de refracción $n_2 < n_1$ y un revestimiento de plástico elástico que encapsula la fibra.

Las variaciones en la composición del material del núcleo dan lugar a los dos tipos de fibra comúnmente utilizados que se muestran en la Fig. 3. En el primer caso, el índice de refracción del núcleo es uniforme en todo su recorrido y sufre un cambio abrupto (o escalón) en el límite de la cubierta. Esto se denomina fibra de índice escalonado (step-index fiber por su nombre en inglés). En el segundo caso, el índice de refracción del núcleo se hace variar en función de la distancia radial desde el centro de la fibra. Este tipo es una fibra de índice graduado (graded-index fiber por su nombre en inglés).

Tanto las fibras de índice escalonado como las de índice graduado se pueden dividir en 2 clases, monomodo y multimodo. Como su nombre lo indica, una fibra monomodo solo admite un modo de propagación, mientras que las fibras multimodo contienen dos o más modos. En la Fig. 3 se dan algunos tamaños típicos de fibras monomodo y multimodo para brindar una idea de la escala dimensional. En ciertas aplicaciones, las fibras multimodo ofrecen algunas ventajas en comparación con las fibras monomodo, sin embargo, estas son afectadas por el fenómeno de dispersión intermodal, por tanto, no son aptas para los propósitos de este trabajo.

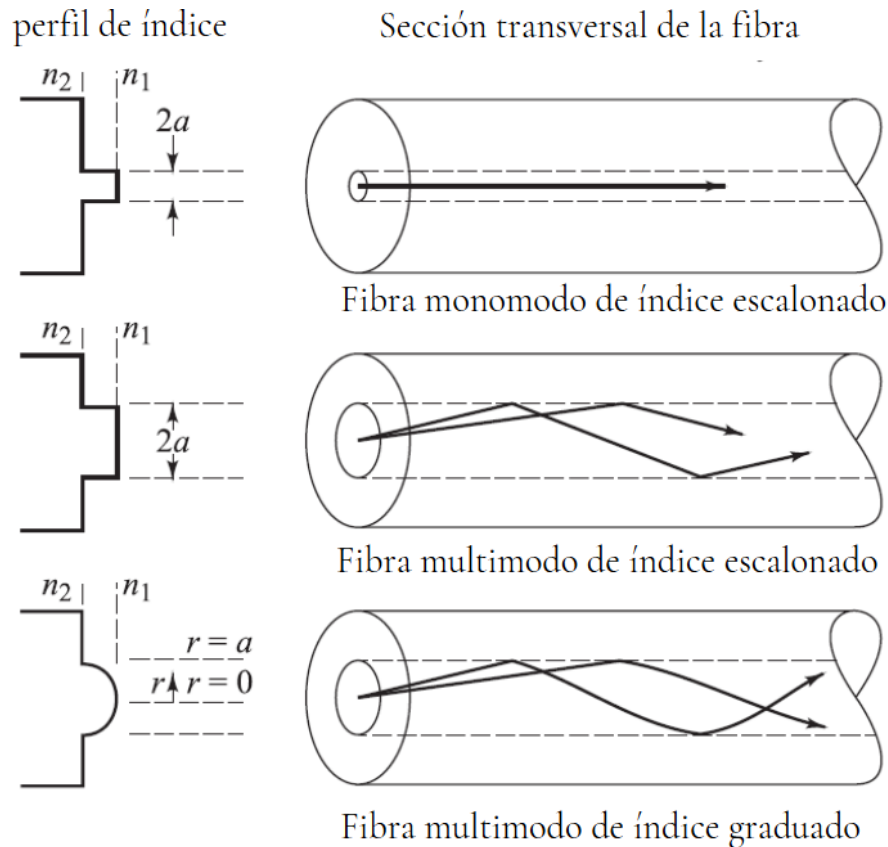


Fig. 3: Comparación de fibras ópticas convencionales monomodo de índice escalonado y multimodo de índice escalonado e índice graduado [15].

2.2. Modos

Un modo es la distribución espacial transversal de la intensidad producida por la luz que puede viajar dentro de la fibra óptica (FO). En una FO de índice escalonado, pueden viajar uno o más modos dentro del núcleo en forma simultánea. La cantidad de modos soportados por una FO, depende de varios factores. Por un lado, de la estructura de la fibra como, el radio del núcleo y los índices de refracción materiales del núcleo y de la cubierta. Y, por otro lado, también depende de la longitud de onda de la luz que viaja dentro de la FO. Cada modo dentro de la FO viaja a una velocidad característica, es decir, experimenta un índice de refracción propio del modo, conocido como índice modal o efectivo.

En una FO, hay tres tipos de modos: los guiados, los radiados y los fugados. Los modos guiados, son aquellos que están confinados en el núcleo y además pueden ser transmitidos por la FO. Los modos radiados no están confinados en el núcleo, pero si en la cubierta y dadas sus características de propagación, se atenuarán rápidamente al salir del núcleo. Los modos fugados (o en fuga) son aquellos que igualmente no están confinados en el núcleo, pero tampoco en la cubierta. Sus características de propagación permiten que

estos modos se “filtren” fuera de la FO y no se transmiten. En el contexto de este trabajo se revisará lo concerniente a modos guiados y en forma particular al modo fundamental del núcleo.

El campo de luz electromagnética que se guía a lo largo de una fibra óptica se puede representar mediante una superposición de modos guiados. Cada uno de estos modos guiados consta de un conjunto de configuraciones de campo electromagnético simples. Para campos de luz monocromáticos de frecuencia en radianes ω , un modo que viaja en la dirección z positiva (es decir, a lo largo del eje de la fibra) tiene una dependencia del tiempo y de z dada por:

$$e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3)$$

donde el factor β es la componente z de la constante de propagación de onda $k = 2\pi/\lambda$ y es el parámetro de principal interés para describir los modos de fibra. Para los modos guiados, β puede asumir solo ciertos valores discretos, que se determinan a partir del requisito de que el campo modal debe satisfacer las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de contorno del campo eléctrico y magnético en la interfaz núcleo-cubierta. Un modo guiado que viaja en la dirección z (a lo largo del eje de la fibra) se puede descomponer en una familia de ondas planas superpuestas que forman colectivamente un patrón de onda estacionaria en la dirección transversal al eje de la fibra [15].

2.3. Teoría de modos para guías de ondas circulares

Para lograr una comprensión más detallada del mecanismo de propagación de potencia óptica en una fibra, es necesario resolver las ecuaciones de Maxwell sujetas a las condiciones de contorno cilíndricas en la interfaz entre el núcleo y la cubierta de la fibra.

Al resolver las ecuaciones de Maxwell para guías de ondas metálicas huecas, solo se encuentran modos eléctricos transversales (TE) y modos magnéticos transversales (TM). Sin embargo, en las fibras ópticas, las condiciones de contorno entre el núcleo y la cubierta conducen a un acoplamiento entre los componentes del campo eléctrico y magnético. Esto da lugar a modos híbridos, lo que hace que el análisis de guías de ondas ópticas sea más complejo que el análisis de guías de ondas metálicas.

Los modos híbridos se designan como modos HE o EH , dependiendo de si el campo eléctrico transversal (el campo E) o el campo magnético transversal (el campo H) es mayor para ese modo. Los dos modos de orden más bajo se designan como HE_{11} y TE_{01} , donde los subíndices se refieren a posibles modos de propagación del campo óptico.

Aunque la teoría de propagación de la luz en fibras ópticas es bien conocida, una descripción completa de los modos guiados y de radiación requiere el uso de campos electromagnéticos híbridos de seis componentes que tienen expresiones matemáticas muy complejas [15]. En la práctica, se puede llevar a cabo una simplificación de estas

expresiones, ya que las fibras suelen construirse de manera que la diferencia en los índices de refracción del núcleo y la cubierta sea muy pequeña; es decir, $n_1 - n_2 \leq n_1$. Con esta suposición, solo se deben considerar cuatro componentes de campo y sus expresiones se vuelven significativamente más simples. Los componentes de campo se denominan modos linealmente polarizados (LP) y se etiquetan como LP_{jm} , donde j y m son números enteros que designan soluciones de modo, j indica el número de máximos del campo eléctrico en la dirección radial, y m el número de máximos en la dirección azimutal (angular). En este esquema para los modos de orden más bajo, cada modo LP_{0m} se deriva de un modo HE_{1m} y cada modo LP_{1m} proviene de los modos TE_{0m} , TM_{0m} y HE_{0m} . Por lo tanto, el modo fundamental LP_{01} corresponde a un modo HE_{11} .

2.4. Fibras Ópticas Monomodo

Las fibras ópticas monomodo están diseñadas para permitir la propagación de un solo modo de luz, generalmente el modo fundamental LP_{01} . Estas fibras son utilizadas en comunicaciones de larga distancia y alta velocidad debido a su baja dispersión modal.

2.5. Ecuaciones de Maxwell en Fibras Ópticas

Las ecuaciones de Maxwell describen cómo los campos eléctricos y magnéticos se propagan en un medio dieléctrico como una fibra óptica. En el caso de una fibra óptica, estas ecuaciones se resuelven en coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z) debido a la simetría circular de la fibra.

Para analizar la guía de onda óptica, debemos considerar las ecuaciones de Maxwell que dan las relaciones entre los campos eléctricos y magnéticos. Suponiendo un material dieléctrico isotrópico lineal que no tiene corrientes y cargas libres, estas ecuaciones toman la forma:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (7)$$

donde $D = \epsilon E$ y $B = \mu H$. El parámetro ϵ es la permitividad (o constante dieléctrica) y μ es la permeabilidad del medio.

Se puede derivar una relación que define los fenómenos ondulatorios de los campos electromagnéticos a partir de las ecuaciones de Maxwell. Las ecuaciones de onda para los campos eléctricos y magnéticos son:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (9)$$

respectivamente.

Consideremos las ondas electromagnéticas que se propagan a lo largo de la fibra cilíndrica que se muestra en la Fig. 2. Para esta fibra, se define un sistema de coordenadas cilíndricas (r, Φ, z) con el eje z a lo largo del eje de la guía de onda. Si las ondas electromagnéticas se propagan a lo largo del eje z , tendrán una dependencia funcional de la forma:

$$\vec{E} = E_0(r, \Phi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (10)$$

$$\vec{H} = H_0(r, \Phi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (11)$$

que son armónicos en el tiempo t y la coordenada z . Como ya se mencionó, el parámetro β es el componente z del vector de propagación y estará determinado por las condiciones de contorno de los campos electromagnéticos en la interfaz entre el núcleo y la cubierta.

Las ecuaciones de onda en coordenadas cilíndricas para los campos eléctrico y magnético son respectivamente:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \Phi^2} + q^2 E_z = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \Phi^2} + q^2 H_z = 0 \quad (13)$$

donde $q^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \beta^2 = K^2 - \beta^2$.

Es interesante notar que estas ecuaciones contienen cada una solo E_z o solo H_z . Esto parece implicar que los componentes longitudinales de E y H están desacoplados y pueden elegirse arbitrariamente siempre que satisfagan las ecuaciones (12) y (13). Sin embargo, en general, el acoplamiento de E_z y H_z es requerido por las condiciones de contorno de los componentes del campo electromagnético. Si las condiciones de contorno no conducen al acoplamiento entre los componentes del campo, se pueden obtener soluciones de modo en las que $E_z = 0$ o $H_z = 0$. Cuando $E_z = 0$, es decir cuando el campo eléctrico es completamente transversal (sin componente en la dirección de propagación), los modos se denominan modos eléctricos transversales o TE , y cuando $H_z = 0$ (El campo magnético es completamente transversal) se denominan modos magnéticos transversales o TM . Existen modos híbridos si tanto E_z como H_z son distintos de cero. Estos se designan como modos HE o EH , dependiendo de si H_z o E_z , respectivamente, hacen una mayor contribución al campo transversal. El hecho de que los modos híbridos estén presentes en las guías de ondas ópticas hace que su análisis sea más complejo que es el caso más simple de las guías de ondas metálicas huecas, donde solo se encuentran los modos TE y TM , [15].

2.6. Ecuaciones de onda para fibras de índice escalonado

Ahora utilizamos los resultados anteriores para encontrar los modos guiados en una fibra de índice escalonado. Un procedimiento matemático estándar para resolver ecuaciones como la ecuación (12) es utilizar el método de separación de variables, que supone una solución de la forma:

$$E_z = AF_1(r)F_2(\Phi)F_3(z)F_4(t) \quad (14)$$

Al sustituir y separar variables, obtenemos tres ecuaciones independientes. Para la parte radial $R(r)$:

$$\frac{\partial^2 F_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_1}{\partial r} + \left(q^2 - \frac{v^2}{r^2} \right) F_1 = 0 \quad (15)$$

donde F_1 es la función radial.

Esta es la ecuación diferencial de Bessel, cuyas soluciones son las funciones de Bessel de primera clase $J_v(Ur)$. Se puede derivar una ecuación análoga para H_z .

Para la configuración de la fibra de índice escalonado, consideramos un núcleo homogéneo de índice de refracción n_1 y radio a , que está rodeado por una cubierta infinita de índice n_2 . La razón para suponer una cubierta infinitamente gruesa es que los modos guiados en el núcleo tienen campos que decaen exponencialmente fuera del núcleo y estos deben tener valores insignificantes en el límite exterior de la cubierta. En la práctica, las fibras ópticas se diseñan con cubiertas que son lo suficientemente gruesas para que el campo del modo guiado no alcance el límite exterior de la cubierta. Para tener una idea de los patrones de campo, las distribuciones de campo eléctrico para varios de los modos guiados de orden inferior en una guía de onda de placa simétrica se mostraron en la Fig. 3. Los campos varían armónicamente en la región guía de índice de refracción n_1 y decaen exponencialmente fuera de esta región.

Ahora se debe resolver la ecuación (15) para las regiones dentro y fuera del núcleo. Para la región interior las soluciones para los modos guiados deben permanecer finitas cuando $r \rightarrow 0$, mientras que en el exterior las soluciones deben decaer a cero cuando $r \rightarrow \infty$. Por lo tanto, para $r < a$ las soluciones son funciones de Bessel de primera clase de orden n . Para estas funciones usamos la designación común $J_\nu(Ur)$. Aquí, $u^2 = K_1^2 - \beta^2$ con $K_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda}$. Las expresiones para E_z y H_z dentro del núcleo son, por lo tanto

$$E_z(r < a) = AJ_\nu(ur)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (16)$$

$$H_z(r < a) = BJ_\nu(ur)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (17)$$

donde A y B son constantes arbitrarias determinadas por las condiciones de contorno, U es el número de onda transversal en el núcleo, y ν es el orden de la función de Bessel, correspondiente a la dependencia azimutal.

Fuera del núcleo, las soluciones de la ecuación [15] están dadas por funciones de Bessel modificadas de segundo tipo, $K_\nu(wr)$, donde $w^2 = \beta^2 - K_2^2$ con $K_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda}$. Las expresiones para E_z y H_z fuera del núcleo son, por lo tanto

$$E_z(r > a) = CK_\nu(wr)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (18)$$

$$H_z(r > a) = DK_\nu(wr)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (19)$$

donde C y D son constantes arbitrarias.

2.7. Ecuación modal

Las soluciones para β deben determinarse a partir de las condiciones de frontera, así como las constantes A y C del campo eléctrico y, B y D del campo magnético. Las condiciones de frontera requieren que los componentes tangenciales E_ϕ y E_z de E dentro y fuera de la interfaz dieléctrica en $r = a$ deben ser los mismos (el campo eléctrico y su derivada deben ser continuos en la interfaz entre el núcleo y la cubierta), y de manera similar para los componentes tangenciales H_ϕ y H_z . Las condiciones de frontera nos llevan a la ecuación característica, a esto se agrega que, para la guía de onda de fibra dieléctrica, todos los modos son modos híbridos excepto aquellos para los que $v = 0$. Cuando $v = 0$, resultan dos ecuaciones de valores propios diferentes. Estas son

$$\frac{J'_v(ua)}{uJ_v(ua)} + \frac{K'_v(wa)}{wK_v(wa)} = 0 \quad (20)$$

donde:

- $u = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}$ es la frecuencia espacial que determina la frecuencia de oscilación dentro del núcleo.
- $w = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}$ es la frecuencia espacial que determina la razón de decaimiento en la cubierta.
- a es el radio del núcleo.
- n_1 es el índice de refracción del núcleo.
- n_2 es el índice de refracción de la cubierta.
- $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda en el vacío.

Para el campo E_z en el núcleo de la fibra, utilizamos las funciones de Bessel de primera clase $J_v(Ur)$ (ver Fig. 4) que son regulares en el origen ($r=0$). En la cubierta, donde la solución debe decaer exponencialmente para $r \rightarrow \infty$, se espera que el campo disminuya rápidamente con la distancia radial, utilizamos las funciones de Bessel modificadas de segunda clase $K_v(wr)$.

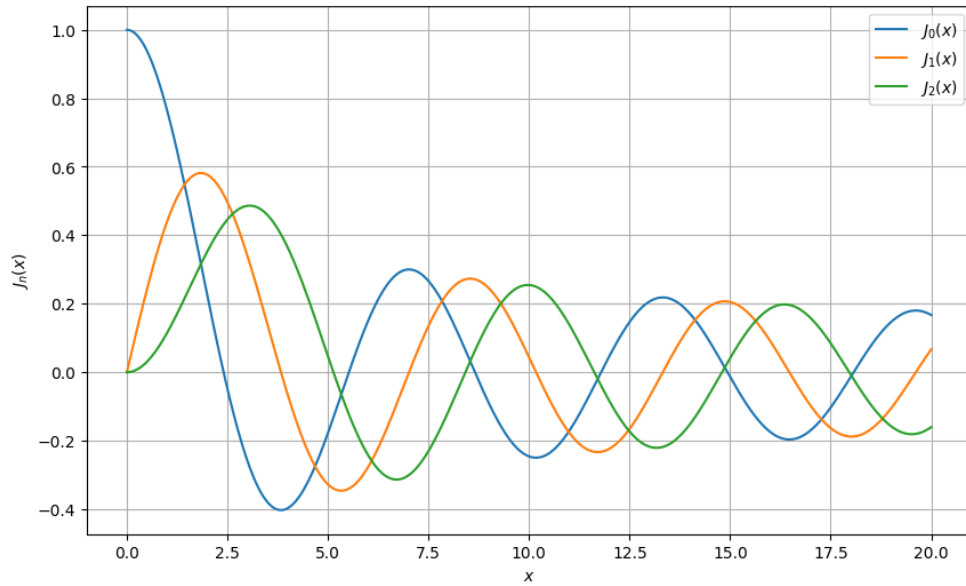


Fig. 4: Variación de la función de Bessel $J_n(x)$ para los tres primeros órdenes ($n = 0, 1, 2$) graficada como una función de x .

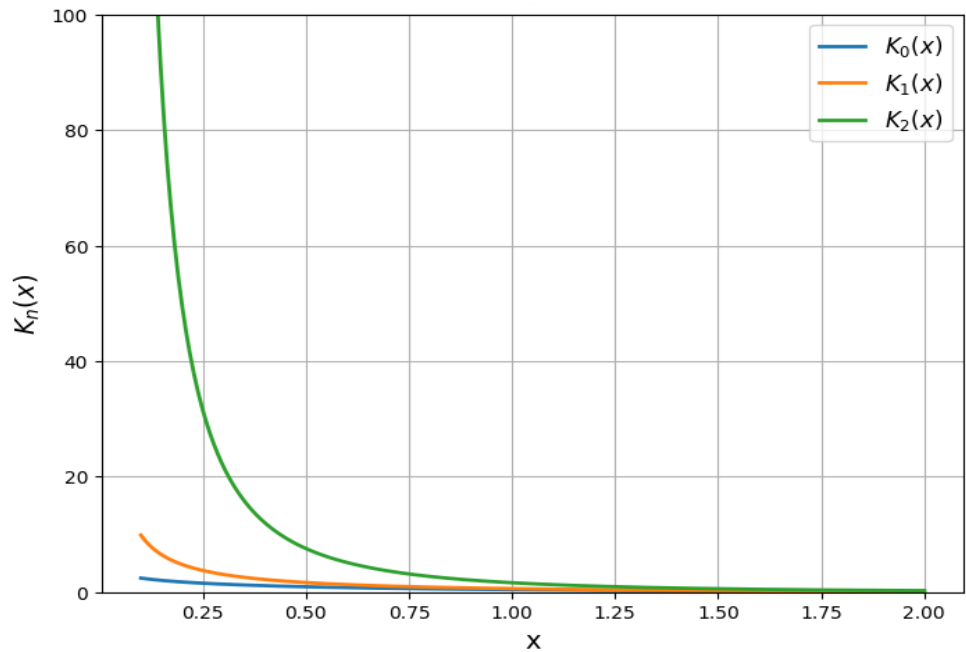


Fig. 5: Variación de la función de Bessel modificada de segunda clase $k_n(x)$ para los tres primeros órdenes ($n = 0, 1, 2$) graficada como una función de x .

2.8. Modos en fibras de índice escalonado

Para ayudar a describir los modos, primero examinaremos el comportamiento de las funciones de Bessel de tipo J . Estas se grafican en la Fig. 4 para los primeros tres órdenes. Las funciones de Bessel de tipo J son similares a las funciones armónicas ya que exhiben un comportamiento oscilatorio para k en el dominio de los reales, como es el caso de las

funciones sinusoidales. Debido al comportamiento oscilatorio de J_ν , tendrá m raíces para un valor ν dado. Estas raíces se designarán por $\beta_{\nu m}$, y los modos correspondientes son $TE_{\nu m}$, $TM_{\nu m}$, $EH_{\nu m}$ o $HE_{\nu m}$. Los esquemas de los patrones de campo eléctrico transversal para los cuatro modos de orden más bajo sobre la sección transversal de una fibra de índice escalonado se muestran en la Fig. 6 [15].

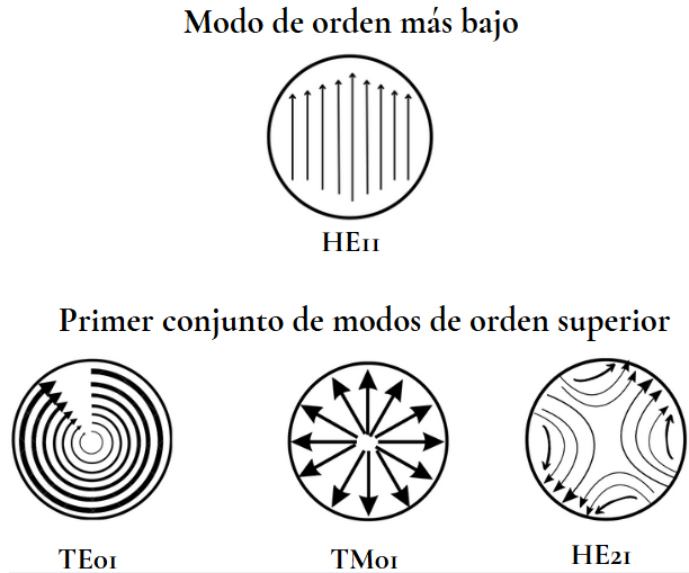


Fig. 6: Vistas de los extremos de la fibra de los vectores de campo eléctrico transversales para los cuatro modos de orden más bajo en una fibra de índice escalonado.

Capítulo 3

Interferómetros en fibra óptica

Los sensores de fibra óptica son clasificados en dos grupos, en extrínsecos e intrínsecos dependiendo de la modificación del haz de luz que pasa a través de ellos respecto a los cambios de su entorno. En un sensor extrínseco (Fig. 7), la fibra solo guía el haz de luz al elemento sensor óptico, este es externo a la fibra, en donde se modula el haz de luz dependiendo de los efectos de los cambios de su entorno [16].

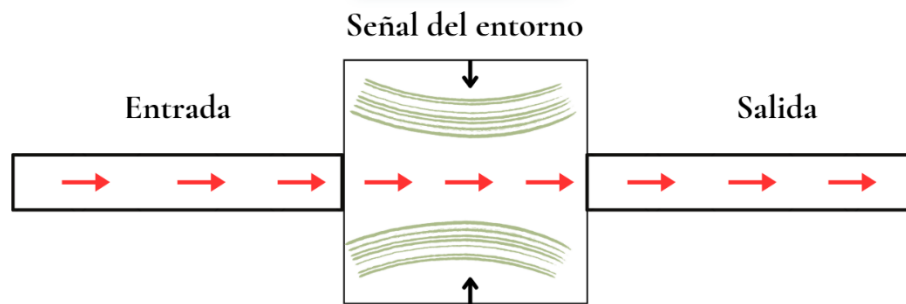


Fig. 7: Sensor extrínseco.

En un intrínseco (Fig. 8), la fibra además de ser la guía del haz de luz también es el elemento sensor, donde el haz de luz se modula directamente por los cambios de su entorno sin abandonar la fibra.

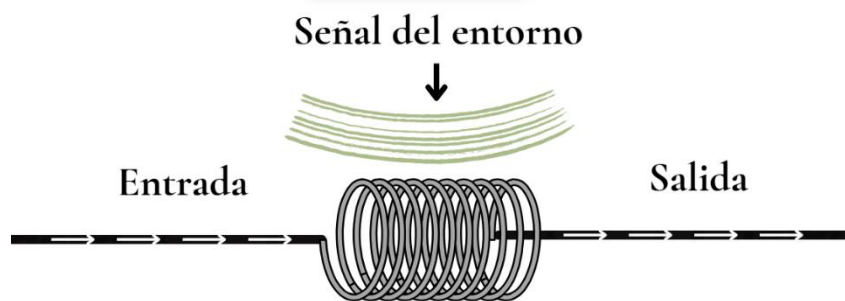


Fig. 8: Sensor intrínseco.

Los sensores de fibra óptica se pueden dividir de acuerdo con su principio de operación. Por ejemplo: sensores de intensidad, de polarización y de fase o interferométricos.

Los sensores de intensidad se basan en la atenuación de la señal mediante la absorción o la dispersión frente a un objetivo.

Los sensores de polarización se basan en el cambio de estado de polarización de la luz. Las fibras sometidas a estrés o tensión tienden a cambiar el índice de refracción y por lo tanto existe una diferencia de fase entre las diferentes direcciones de polarización del campo eléctrico.

Los sensores de fase o interferométricos (Fig. 9) usan la interferencia de dos o más haces de luz coherentes que se propagan por diferentes caminos ópticos en donde uno de ellos es el camino de referencia y el otro es el camino sensor provocando un desfase entre las señales de acuerdo con el parámetro medido. Estos sensores pueden estar contruidos por interferómetros como: Fabry-Perot (FPI, Fabry-Perot Interferometer), Mach-Zehnder (MZI, Mach - Zehnder Interferometer), Sagnac (SI, Sagnac Interferometer), Michelson (MI, Michelson Interferometer), etc. Para este trabajo de tesis se utilizó un interferómetro tipo Michelson (MI) [16].

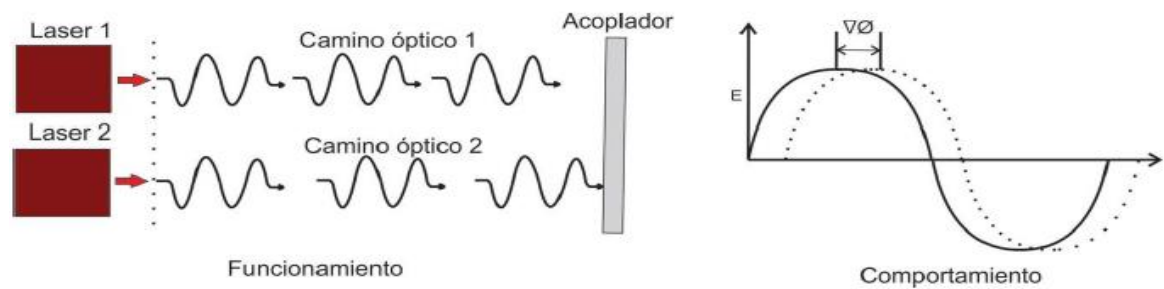


Fig. 9: Sensor de fase o interferométrico [16].

3.1 Interferencia de la Luz

La irradiancia puede definirse como la cantidad de luz que incide sobre una superficie o la cantidad de energía en un área por unidad de tiempo. La interferometría es el fenómeno que resulta de la interferencia entre dos o más ondas de luz, produciendo una irradiancia resultante que difiere de la suma de las irradiancias individuales (ver Fig. 10).

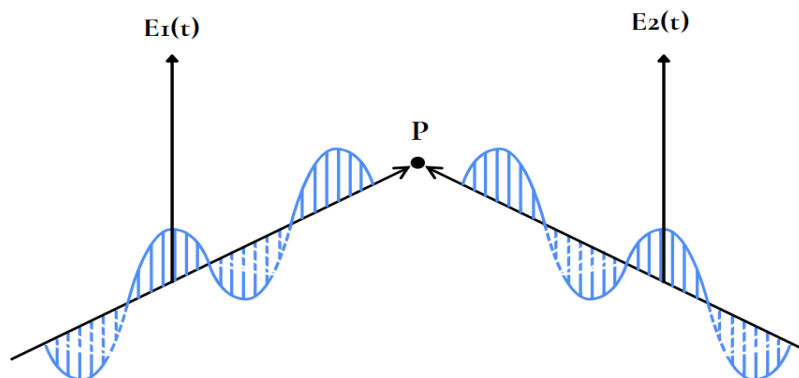


Fig. 10: Ondas de dos fuentes puntuales superpuestas espacialmente.

Cuando dos ondas separadas llegan al mismo punto y se superponen, simplemente se suman o restan algebraicamente en cada punto de la zona de superposición.

Después de pasar por esta zona, cada onda continúa su camino sin alteraciones. En el análisis de este fenómeno, de acuerdo con la referencia [23], el campo eléctrico total de la interferencia de dos ondas en un punto P en el espacio está dado por la suma de los campos eléctricos de cada onda.

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) = E_{01} \cos(\omega t) + E_{02} \cos(\omega t + \Delta\phi) \quad (21)$$

La irradiancia es proporcional al promedio temporal de la magnitud de la intensidad de campo eléctrico

$$I = \vec{E} \cdot \vec{E} \quad (22)$$

donde:

$$\langle E^2 \rangle_T = E_{01}^2 \frac{1}{2} + E_{02}^2 \frac{1}{2} + 2E_{01}E_{02} \frac{1}{2} \cos(\Delta\phi) \quad (23)$$

Recordando que la irradiancia es proporcional al cuadrado de la amplitud, obtenemos la ecuación matemática para la condición de interferencia de dos haces

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (24)$$

que se deduce del análisis de la interferencia de dos ondas coherentes. Aquí I , es la intensidad resultante de la superposición de las dos ondas, I_1 y I_2 son las intensidades de las dos ondas individuales, y $\Delta\phi$ es la diferencia de fase entre las dos ondas [16].

3.2. Tipos de interferómetros

Los interferómetros en fibra óptica son dispositivos que utilizan la interferencia de la luz para medir variaciones en las propiedades ópticas de la fibra. Son herramientas clave en la detección de cambios de fase, temperatura, presión y otras variables físicas. Estos dispositivos tienen aplicaciones en telecomunicaciones, sensores y sistemas de medida.

La interferometría en fibra óptica es una técnica que utiliza la interferencia de las ondas de luz que viajan a través de fibras ópticas para realizar mediciones precisas de diferentes parámetros físicos, como temperatura, presión, deformación y desplazamiento.

Los sensores de fibra óptica aprovechan las propiedades de la interferencia para medir cambios en parámetros físicos. Como se mencionó en el capítulo anterior, existen diferentes tipos de sensores interferométricos [17], algunos de ellos se describen a continuación.

3.2.1 Interferómetro de Mach-Zehnder

El interferómetro de Mach-Zehnder (MZI por sus siglas en inglés) (Fig. 11) en fibra óptica se caracteriza por su configuración que consta de dos divisores de haz o acopladores de fibra óptica, que dividen y recombinan la luz. La luz se divide en dos brazos separados que pueden tener diferentes longitudes o experimentar diferentes condiciones ambientales, lo que genera una diferencia de fase entre los haces debido a la diferencia en los caminos ópticos recorridos. Este tipo de interferómetro se utiliza principalmente en sensores de temperatura, presión y deformación. A diferencia de los interferómetros de camino libre, en los que la luz viaja por el aire o el vacío, en los interferómetros de fibra óptica la luz se confina dentro de las fibras ópticas, lo que hace que los sistemas sean más compactos y robustos, menos susceptibles a perturbaciones externas y no requieran una alineación tan precisa.

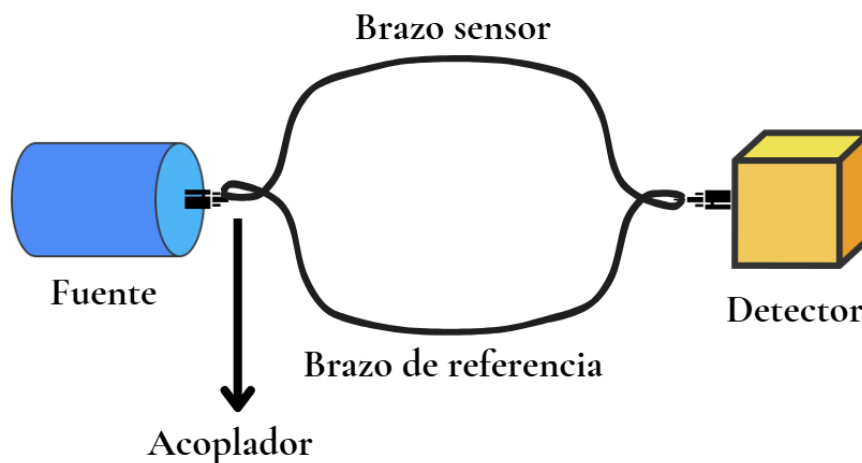


Fig. 11: Configuración del MZI.

3.2.2 Interferómetro de Sagnac

El interferómetro de Sagnac (SI por sus siglas en inglés) en fibra óptica utiliza un bucle de fibra óptica por donde la luz viaja en direcciones opuestas. Los haces de luz que viajan en direcciones opuestas se recombinan al final del bucle, y la diferencia de fase se debe a la

rotación del bucle, lo que lo hace ideal para aplicaciones en giroscopios de fibra óptica utilizados en navegación y medición de rotación. A diferencia de los interferómetros de camino libre, en los cuales la luz se propaga libremente, en el SI en fibra óptica la luz se confina dentro de la fibra óptica, eliminando pérdidas y aumentando la sensibilidad. Además, es más estable y menos susceptible a interferencias externas y vibraciones, siendo más compacto y fácil de integrar en sistemas móviles. En este arreglo que se muestra en la Fig. 12 se utiliza un acoplador de cuatro puertos como divisor del haz de entrada, el cual entra por el puerto A, y es dividido en dos haces por los puertos (C y D) cuales se propagarán en direcciones opuestas dentro del lazo de fibra.

Posteriormente, los haces nuevamente pasan por el acoplador e interfieren debido a la diferencia de fase entre los dos haces contra propagándose.

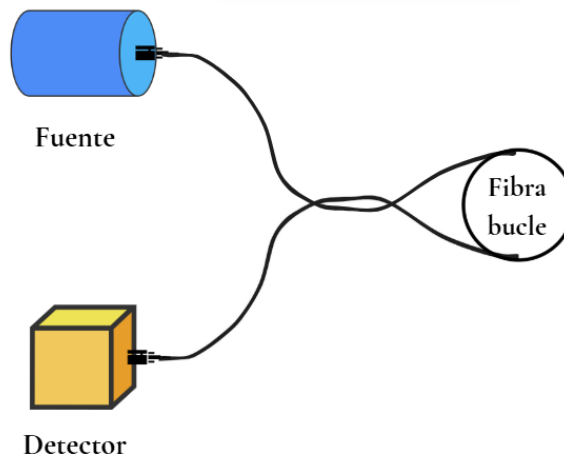


Fig. 12: Configuración del SI.

3.2.3 Interferómetro de Fabry-Pérot

El interferómetro de Fabry-Pérot (FPI por sus siglas en inglés) (Fig. 13) en fibra óptica consiste en una cavidad resonante formada por dos superficies reflectantes en una fibra óptica. La luz realiza múltiples reflexiones dentro de la cavidad, y la diferencia de fase se acumula a través de estas múltiples reflexiones, creando franjas de interferencia. Este tipo de interferómetro se utiliza en sensores de presión, temperatura y medición de índice de refracción. En comparación con los interferómetros de camino libre, donde la cavidad resonante está en el aire o el vacío, en el FPI en fibra óptica la cavidad resonante está dentro de la fibra óptica, lo que mejora la precisión y estabilidad. Además, es más fácil de miniaturizar para aplicaciones en espacios reducidos y ofrece mayor resistencia a condiciones ambientales adversas.

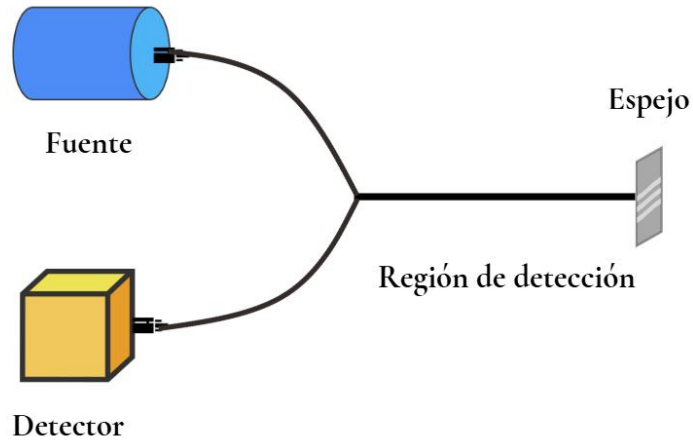


Fig. 13: Configuración del FPI.

3.2.4 Interferómetro de Michelson (MI)

El MI en fibra óptica es un divisor de amplitud, similar al de Mach-Zehnder, pero con la diferencia de que un brazo se refleja en un espejo y retorna a través del mismo camino. La luz en este interferómetro se divide en un brazo fijo y otro variable, permitiendo medir diferencias en los recorridos ópticos, como se muestra en la Fig. 14. La interferencia se genera por la diferencia en el recorrido del haz reflejado, y es utilizado en la medición de distancia, velocidad y deformación. Comparado con los interferómetros de camino libre, el MI en fibra óptica guía la luz dentro de las fibras ópticas, lo que reduce pérdidas y mejora la estabilidad. Además, es menos sensible a vibraciones y perturbaciones externas debido a la confinación de la luz en las fibras y requiere menos mantenimiento y recalibración.

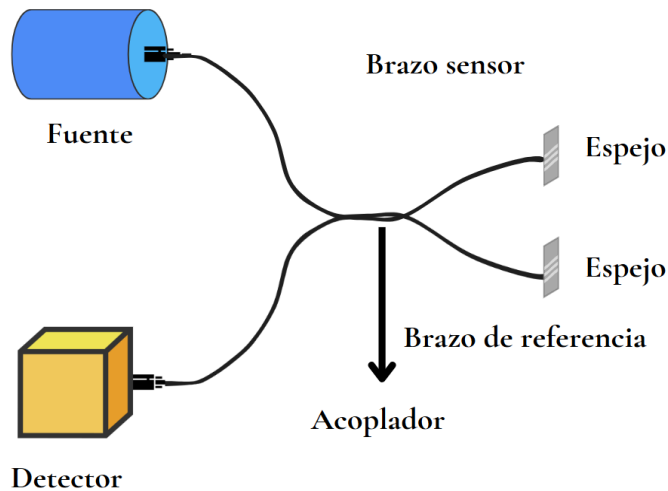


Fig. 14: Configuración del MI.

En este trabajo de tesis se trabajó con el MI por su configuración sencilla y su facilidad de implementación. Se realiza una configuración distinta al MI en fibra óptica ordinario, el equivalente del acoplador es una LPFG, los dos brazos o los dos caminos del interferómetro equivalen a los caminos formados por el núcleo, la cubierta y la presencia de la rejilla. Por último, los reflectores son reemplazados por un corte perpendicular en el extremo de la fibra junto con una película reflejante.

Capítulo 4

Teoría de rejillas de periodo largo

4.1 Rejillas en fibra óptica

Las rejillas en fibra óptica son un tipo particular de filtro que selecciona longitudes de onda específicas y funciona mediante reflexión o transmisión, basándose en los principios básicos de reflexión, refracción y difracción de la luz en estructuras periódicas adimensionales. Estos componentes se crean esencialmente cuando se modula periódicamente el índice de refracción del núcleo de un segmento de la fibra. De acuerdo con su funcionamiento, existen dos tipos de rejillas en fibra óptica; las rejillas de Bragg y las rejillas de periodo largo [18].

Las rejillas de Bragg (RB) reciben su nombre debido a que su funcionamiento se basa en la ley de reflexión de Bragg. Fueron las primeras rejillas inscritas en fibra óptica, gracias al descubrimiento de la fotosensibilidad de estas fibras. La característica principal de este tipo de rejillas es su capacidad para reflejar o rechazar en transmisión una banda estrecha de longitudes de onda, específicamente aquellas que cumplen con la condición de Bragg. Para ello, es necesario que el periodo de la modulación (Λ) sea relativamente pequeño ($\leq 1 \mu\text{m}$).

Existe otro tipo de rejillas las cuales son relevantes para el tema de esta tesis. Las rejillas de período largo en fibra óptica o LPFGs (Long Period Fiber Gratings) se desarrollaron a partir de las rejillas de Bragg. Las rejillas de período largo se diferencian de las rejillas de Bragg en que, como su nombre lo indica, el período de la modulación del índice de refracción en la fibra es mucho mayor ($\geq 100 \mu\text{m}$). La razón del aumento del período de modulación en estas fibras es debido a que se desea acoplar la luz del modo guiado fundamental del núcleo a los modos de propagación de la cubierta. Por esta razón es que normalmente a las rejillas de Bragg se les conoce como rejillas de reflexión, mientras que a las rejillas de período largo se les conoce como rejillas de transmisión [19].

4.2 Rejillas de periodo largo (LPFGs)

Las rejillas de periodo largo tienen un periodo de modulación de centenares de micras de manera que el periodo permite el acoplamiento de luz del modo fundamental hacia los modos de propagación directa de la cubierta de la fibra óptica. Debido a esta característica, las LPFGs se pueden utilizar como filtros de supresión de banda con baja reflexión. Las rejillas en fibra satisfacen la condición de Bragg de ajuste de fase entre el modo del núcleo y los modos guiados de la cubierta o los modos de radiación. Esta condición es dependiente de la longitud de onda y está dada por:

$$\beta_{01} - \beta = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (25)$$

donde β_{01} y β son las constantes de propagación del modo fundamental y del modo con el cual ocurre el acoplamiento respectivamente. En una LPFG, el valor de $\Delta\beta$ es pequeño y por esta razón el periodo está en el rango de centenas de micrómetros, comparada con el periodo de las rejillas de Bragg cuyo periodo es del orden de 1 μm . Como $\Delta\beta$ es discreto y es una función de la longitud de onda el acoplamiento hacia los modos de la cubierta es altamente selectivo, lo que lleva a una pérdida dependiente de la longitud de onda. Por lo que, cualquier modulación de las propiedades del núcleo y la cubierta modifica la respuesta espectral de la rejilla, lo que permite que sean utilizadas como dispositivos de sensado [20].

4.3 Tipos de rejillas de periodo largo

4.3.1 Rejilla de periodo largo uniforme

La LPFG uniforme se caracteriza por tener sus planos perpendiculares al eje longitudinal de la fibra óptica, manteniendo un período constante. Este tipo de rejilla puede funcionar como un filtro de rechazo de banda. Facilita el acoplamiento de luz entre el modo fundamental del núcleo y los modos de la cubierta de diferente orden, lo que da como resultado un espectro de transmisión que presenta bandas de atenuación, como se muestra en la Fig. 15. La longitud de onda de resonancia de estas bandas de atenuación está determinada por

$$\lambda = (n_{co} - n_{cl})\Lambda = \Delta n_e \Lambda \quad (26)$$

donde n_{co} es el índice efectivo del modo del núcleo, n_{cl} es el índice efectivo del modo de la cubierta, Λ es el periodo de modulación de la rejilla y $\Delta n_e = (n_{co} - n_{cl})$ es la diferencia entre los índices efectivos del núcleo y la cubierta respectivamente [20].

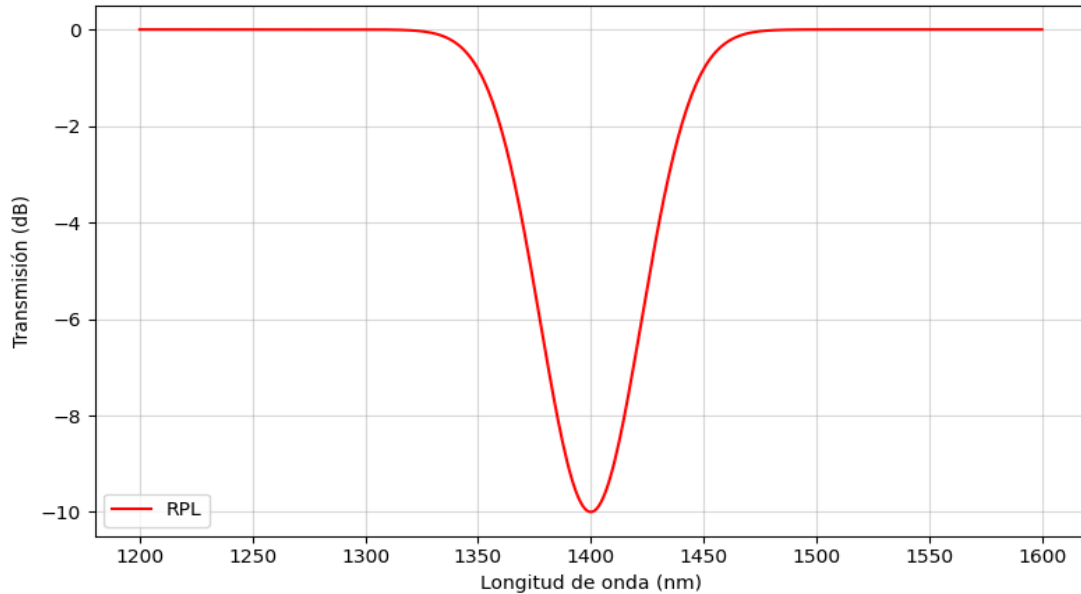


Fig. 15 Espectro de transmisión de una LPFG uniforme.

4.3.2 Rejilla de periodo largo no uniforme (de periodo variable)

En estas rejillas, el periodo de modulación del índice de refracción varía, y esta variación puede describirse también como en la ecuación (27). Sin embargo, el periodo de la rejilla es mucho mayor que en una rejilla de Bragg. La longitud de resonancia ahora depende del eje longitudinal y se define como

$$\lambda(z) = \Delta n_e(z)\Lambda(z) \quad (27)$$

es posible emplear estas rejillas para compensar la dispersión cromática en sistemas de largo alcance y alta velocidad de transmisión, ya que tienen características similares a las rejillas de Bragg de periodo variable [20].

4.3.3 Rejilla de periodo largo con corrimiento de fase

Al aplicar un desplazamiento de fase en una LPFG, es posible generar una banda de paso muy estrecha en el espectro de transmisión de la rejilla. La ubicación y magnitud del desplazamiento de fase pueden ajustarse para obtener un espectro de transmisión particular [20].

4.3.4 Rejilla de periodo largo inclinada

Estas rejillas presentan planos inclinados en relación con el eje longitudinal de la fibra, lo que intensifica el acoplamiento entre el modo del núcleo y los modos guiados de la cubierta [20].

4.4 Técnicas de fabricación de rejillas en fibra óptica

La fotosensibilidad en las fibras ópticas marcó el comienzo del desarrollo de tecnologías para la fabricación de rejillas de fibra óptica. La fotosensibilidad se refiere a un cambio permanente en el índice de refracción de una fibra óptica cuando esta es expuesta a luz con una longitud de onda e intensidad específicas. Esta propiedad fue estudiada inicialmente para crear rejillas de Bragg, aunque más tarde también se aplicó en el desarrollo de LPFGs. Se descubrió que al exponer la fibra a luz ultravioleta (UV), especialmente las fibras dopadas con germanio, se producía un cambio permanente en el índice de refracción. Este método se perfeccionó con el tiempo y se convirtió en el más utilizado para la fabricación de rejillas de fibra óptica.

En un principio, las técnicas de fabricación se limitaban a la exposición de la fibra a la luz UV. Sin embargo, con la introducción de las LPFGs, que requieren menor precisión, aumentó el interés por diversificar las tecnologías de fabricación. En los últimos años, se han desarrollado nuevas tecnologías para la fabricación de LPFGs, cada una con sus propias ventajas en comparación con los métodos anteriores, aunque algunas son útiles solo para aplicaciones específicas [20].

4.4.1 Irradiación con láser ultravioleta

Esta tecnología es la más investigada hasta la fecha para la fabricación de rejillas, tanto de período largo como de Bragg. La mayoría de los dispositivos ópticos se fabrican principalmente utilizando este método. La creación de estas rejillas se basa en la fotosensibilidad. Las fibras ópticas más comúnmente empleadas para esta técnica son las dopadas con germanio debido a su alta fotosensibilidad. Esta tecnología incluye diversos métodos de fabricación para diferentes tipos de rejillas. El descubrimiento y demostración de esta tecnología se dio por Hill et al. cuando observaron que al irradiar la fibra (dopada con germanio) con un láser de luz UV, la intensidad de luz reflejada aumentaba hasta reflejar casi por completo la luz. Posteriormente, se utilizaron láseres con longitudes de onda más cortas (la mitad), lo que permitió aplicar este método a longitudes de onda fuera del rango visible, aunque estos nuevos métodos utilizaban una inscripción externa de las rejillas. El interés en este tema llevó al desarrollo de diversas técnicas mediante la irradiación de luz UV.

A medida que se investigó más sobre el tema, se desarrollaron técnicas más simples, eficientes y precisas para la inscripción de rejillas en fibra óptica mediante irradiación UV. Esta tecnología de fabricación implica puntos de defecto conocidos como centros de color que provocan pérdidas en la transmisión debido a sus bandas de absorción (ver Fig. 16), por lo que deben ser considerados en el análisis de las rejillas. La magnitud del cambio en el índice de refracción con este método depende de varios factores, como la longitud de onda, la intensidad, la dosis total de radiación, la composición del material del núcleo de la fibra y el procesamiento de la fibra antes de la exposición a la luz UV. Existen diferentes procesos de fabricación de rejillas que utilizan la exposición a la luz UV y que se pueden clasificar según el tipo de inscripción (interna o externa).

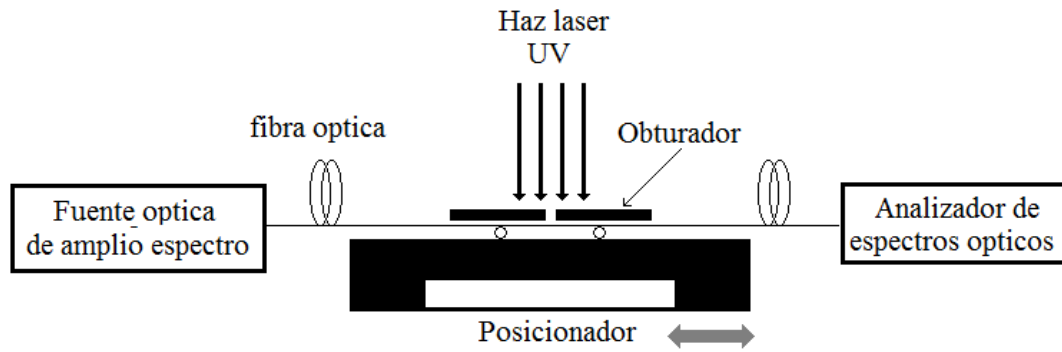


Fig. 16: Técnica de irradiación con láser ultravioleta [20].

4.4.2 Inscripción interna

Este método, mencionado anteriormente, fue utilizado por Hill et al. en 1978 para demostrar el funcionamiento de las rejillas. La técnica empleaba un láser de argón ionizado a 488 nm para irradiar la fibra óptica dopada con germanio. La luz coherente propagada a través de la fibra interfería con una pequeña cantidad de luz reflejada desde el extremo de la fibra, creando un patrón de onda estacionaria. Este patrón formaba una rejilla en el núcleo de la fibra debido a los puntos de alta intensidad que alteraban permanentemente el índice de refracción del núcleo. Este proceso se conoce como inscripción interna porque la luz se irradia internamente a través del núcleo de la fibra, a diferencia de los métodos donde la fibra se expone a la luz externamente. Una desventaja de este método es que la rejilla debía tener una longitud de varias decenas de centímetros para obtener un espectro de reflexión útil, ya que el cambio en el índice de refracción era muy pequeño. Aunque estas rejillas han caído en desuso, es importante mencionarlas debido a su relevancia en el desarrollo de rejillas de fibra óptica [20].

4.4.3 Técnica de Fabricación Interferométrica

Este método fue implementado por primera vez por Meltz et al. en 1989 y también es conocido como Técnica Holográfica Transversal. Fue uno de los primeros métodos de inscripción externa en ser probado. Se le llama así porque un haz de luz UV se divide en dos haces mediante un dispositivo conocido como interferómetro, y luego estos dos haces son dirigidos, con la ayuda de dos espejos, a un mismo punto de la fibra. Cuando estos haces interfieren entre sí, crean un patrón que graba una rejilla con modulación periódica en la fibra. Un esquema de este método se puede ver en la Fig. 17.

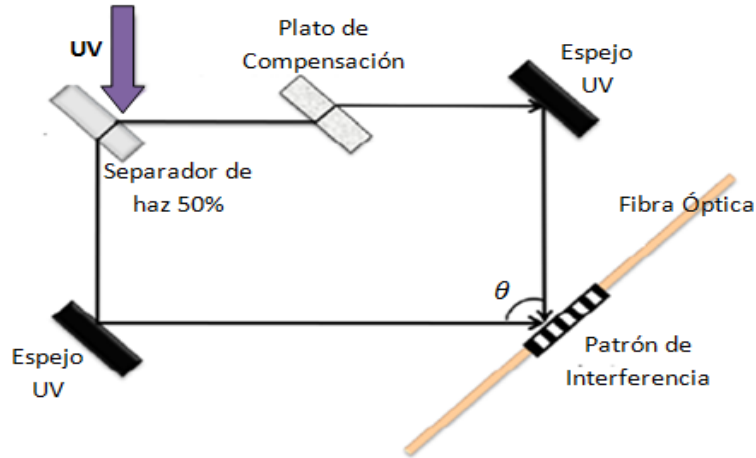


Fig. 17: Técnica de Fabricación Interferométrica (con separadores de amplitud) [20].

La principal desventaja de este método es la susceptibilidad a vibraciones mecánicas ya que desplazamientos en el orden de micrones en cualquier componente del interferómetro pueden hacer que se desvanezca la rejilla. Por esta razón rejillas de calidad sólo pueden ser producidas si se usa un láser con buena coherencia temporal y espacial, así como estabilidad en la potencia de salida y longitud de onda [20].

4.4.4 Técnica de máscara de fase

Este método utiliza un dispositivo óptico de difracción, conocido como máscara de fase, para modificar la forma en que se inscribe espacialmente el haz de luz ultravioleta. La máscara de fase puede ser descrita como una superficie grabada en un sustrato de sílice, transparente a la luz ultravioleta. Las características clave de estas máscaras incluyen la relación entre la marca y el espacio de los surcos, así como la profundidad de estos. Cuando el haz de luz ultravioleta incide sobre la máscara de fase, se difracta en diferentes órdenes de difracción ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) y parte del haz también se transmite a través de la máscara (Fig. 18).

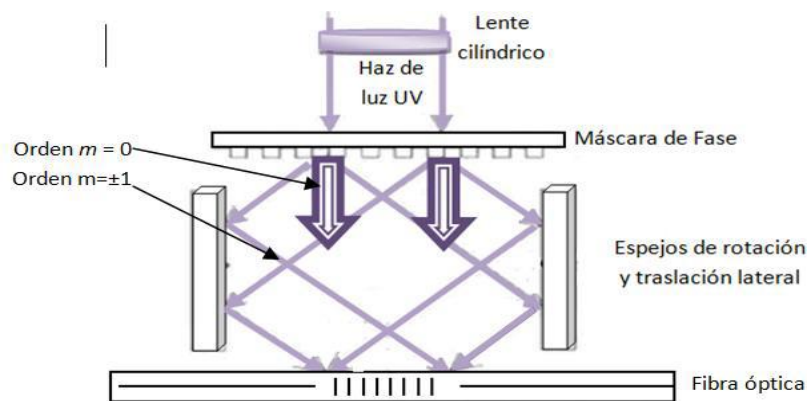


Fig. 18: Técnica de Máscara de Fase [20].

4.4.5 Fabricación punto por punto

Esta técnica, conocida como escritura de rejillas, implica modificar el índice de refracción en los planos de la rejilla de forma secuencial. Utiliza pulsos de luz ultravioleta dirigidos a través de una máscara con una abertura, junto con un lente que enfoca la luz hacia el núcleo de la fibra desde un ángulo lateral. Después de cada irradiación, la fibra se desplaza una distancia igual al período de la rejilla para inscribir la siguiente sección de la rejilla. Este método requiere un sistema de traslación preciso y estable para garantizar una grabación exitosa, tal como se observa en la Fig. 19.

Aunque más lento y laborioso que otros métodos, ofrece flexibilidad para ajustar parámetros como la longitud, el período y la respuesta espectral de la rejilla. Es ideal para crear rejillas no uniformes o con período variable. Además, permite controlar la intensidad de los pulsos en diferentes puntos para lograr una apodización precisa mediante variaciones controladas del índice de refracción.

Sin embargo, la desventaja que presenta este método es que el proceso es tardado, además de que pueden ocurrir errores de traslación de la fibra lo que provoca que el periodo de la rejilla no sea completamente uniforme [20].

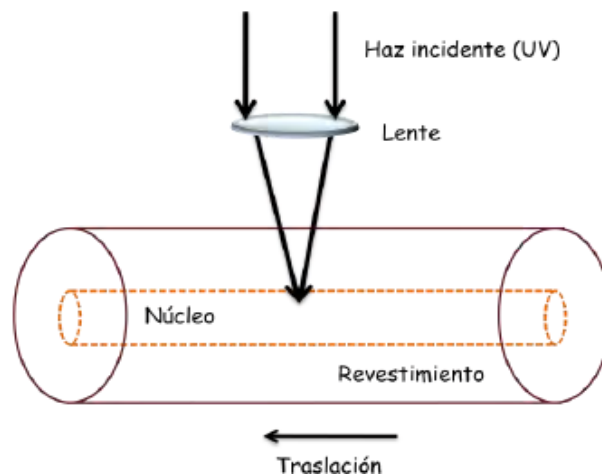


Fig. 19: Esquemático de la fabricación de una rejilla mediante la técnica punto a punto [20].

4.4.6 Exposición a un arco eléctrico

En este método, la fibra óptica se expone a un arco eléctrico generado por un par de electrodos colocados sobre ella. Este procedimiento es sencillo y de bajo costo. Para crear la rejilla, la fibra debe moverse periódicamente, similar a la fabricación punto por punto. El control de la corriente del arco eléctrico es crucial para el éxito en la fabricación de la rejilla. Este tipo de rejillas depende de tres parámetros principales: la potencia del arco eléctrico, el tiempo de exposición y la tensión aplicada a la fibra. Se utiliza una empalmadora para generar el arco eléctrico sobre la fibra, cuya posición se controla mediante una etapa de posicionamiento lineal de precisión (EPLP). Además, se puede agregar un peso con una polea en el otro extremo de la fibra para aplicar tensión. Este proceso se puede monitorear colocando una fuente de luz blanca y un analizador de espectro en los extremos de la fibra,

para observar el acoplamiento durante la fabricación de la LPFG. La Fig. 20 muestra la configuración de este proceso de fabricación [21].

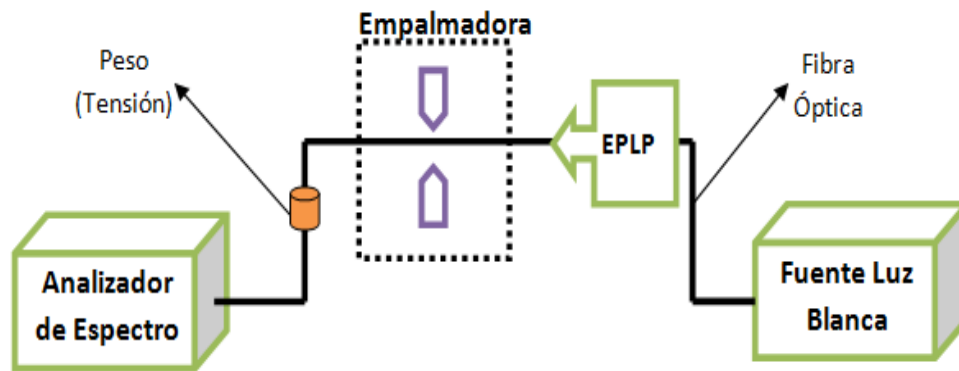


Fig. 20: Método de exposición a un arco eléctrico [20].

Hay varios tipos de rejillas que se pueden crear utilizando este método, dependiendo de la corriente de entrada, la potencia del arco eléctrico y la tensión aplicada a la fibra. De este modo, es posible fabricar LPFGs con diferentes mecanismos para inducir el cambio en el índice efectivo de los modos en la fibra, tales como la modulación del índice o del radio de la fibra óptica.

Las rejillas de período largo fabricadas mediante un arco eléctrico responden a distintos mecanismos que definen la clasificación de estas rejillas. En LPFGs fabricadas mediante esta técnica, el principal mecanismo de modificación del índice es la difusión de dopantes en la fibra en arcos inducidos por corrientes altas y moderadas.

El análisis teórico de la respuesta de las rejillas de período largo inducidas por medio de un láser UV, las cuales tienen una modulación simétrica del índice de refracción en la sección Transversal del núcleo de la fibra, está bastante desarrollado y actualmente es un campo que ha madurado lo suficiente. No obstante, las limitantes del método de fabricación basado en la exposición de la fibra a luz UV, como lo son su complejidad, costo y poca variedad de fibras ópticas con las que se puede usar, hacen que las tecnologías alternativas de fabricación como lo es el método de exposición a un arco eléctrico adquieran importancia en el ámbito de las comunicaciones ópticas.

En este trabajo se fabricaron rejillas de periodo largo mediante el método de exposición a un arco eléctrico, ya que este presenta varias ventajas en comparación con los métodos tradicionales de irradiación con láser ultravioleta. En primer lugar, el equipo necesario para generar un arco eléctrico es generalmente más simple y menos costoso que los sistemas de láser ultravioleta, lo que reduce los costos de instalación y mantenimiento. Además, la exposición a un arco eléctrico permite la fabricación de rejillas en un tiempo más corto, ya que no requiere de tiempos prolongados de exposición. Este método puede ser aplicado a una mayor variedad de fibras ópticas, incluidas aquellas que no son fotosensibles, mientras que la irradiación con láser ultravioleta requiere fibras dopadas con germanio u otros materiales fotosensibles. Las rejillas fabricadas mediante arco eléctrico suelen mostrar una mayor estabilidad térmica, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en entornos con

variaciones de temperatura. Asimismo, el arco eléctrico puede inducir cambios más profundos en el índice de refracción de la fibra, permitiendo la creación de rejillas con una mayor capacidad de modulación. Finalmente, este método permite un control más preciso de los parámetros como la corriente, la potencia del arco y la tensión aplicada, lo que resulta en una mayor precisión en la fabricación de las rejillas. Estas ventajas hacen que el método de exposición a un arco eléctrico sea una opción atractiva para la fabricación de LPFGs en diversas aplicaciones [20].

4.5 Interferómetro de Michelson usando una rejilla de periodo largo

El concepto básico es la interferencia entre los haces en dos brazos, pero cada haz se refleja en el extremo de cada brazo en un MI como se muestra en la Fig. 21 a). Dado que los MI utilizan modos de reflexión, son compactos y prácticos. La capacidad de multiplexación con conexión paralela de varios sensores es otro punto beneficioso de los MI. En un MI tradicional, las dos trayectorias ópticas se establecen mediante la separación física de los brazos del interferómetro, es decir, es esencial ajustar la diferencia de longitud de fibra (diferencia de camino óptico) entre el brazo de referencia y el brazo de detección de un MI dentro de la longitud de coherencia de la fuente de luz. Sin embargo, también es posible una configuración en línea de MI como se muestra en la Fig. 21 b). En esta configuración, una parte del haz del modo central está acoplada a los modos de la cubierta, que se reflejan junto con el haz del modo central desacoplado por el reflector común en el extremo de la fibra [21].

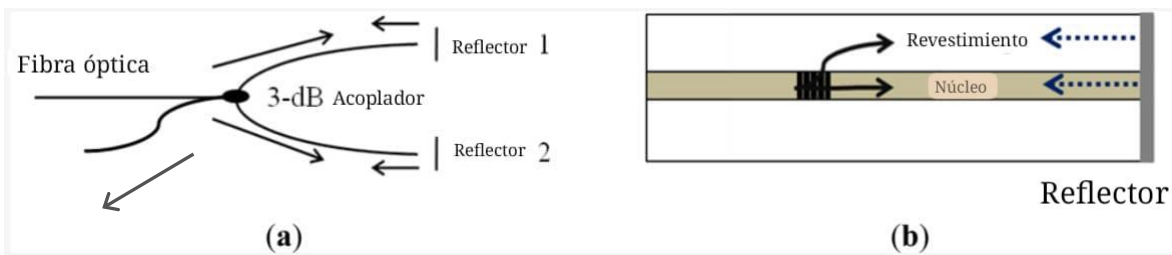


Fig. 21: a) Configuración básica de un MI y b) esquema de un MI en línea compacto (21).

Este trabajo presenta un MI de cavidad compuesta que utiliza el acoplamiento de modos en una LPFG para establecer las dos trayectorias ópticas en una sola fibra.

La estructura de la LPFGs se fabrica recubriendo el extremo cortado de la fibra con una película metálica reflectante en un punto más allá de la ubicación de la LPFGs. La luz se guía tanto en el modo de núcleo como en el de la cubierta después de incidir en la LPFGs ya que esta actúa como un divisor de haz dentro de la fibra, con lo que estos modos se reflejan en el espejo de la fibra. Cuando se encuentra la LPFGs una vez más, una fracción de la potencia óptica en el modo de la cubierta se recombina con el modo de núcleo fundamental.

Existe un cambio de fase entre los modos de núcleo y la cubierta reacomplados porque experimentan diferentes longitudes de trayectoria óptica (debido a diferentes índices de material). Por lo tanto, se observa un patrón de franjas característico en el espectro de reflectancia obtenido a partir de esta configuración de sensor, similar al que se encuentra en la transmisión de una cascada de LPFGs gemela [22].

Los índices de refracción externos (perturbaciones externas) solo afectan la longitud del camino óptico del modo de la cubierta, que es el producto de su longitud de propagación y su índice de refracción efectivo. Los cambios resultantes en la diferencia de longitud del camino óptico entre los modos de núcleo y la cubierta causan cambios de fase en el patrón de franjas de interferencia [22].

4.5.1 Teoría

Para el acoplamiento de luz desde un modo guiado por el núcleo a un modo de la cubierta en fibra óptica, el campo eléctrico se puede expresar mediante la ecuación.

$$E(z) = [A_{01}^{co}(z)e^{-j\delta_m z}]e^{j\beta_{01}^{co}z} + [A_m^{cl}(z)e^{-j\delta_m z}]e^{j\beta_m^{cl}z} \quad (28)$$

donde $A_{01}^{co}(z)$ es la amplitud del primer modo que viaja en el núcleo, $A_m^{cl}(z)$ es el modo del modo de la cubierta a lo largo de la longitud de la LPFG ($0 \leq z \leq L$). L es la longitud del LPFG. β_{01}^{co} y β_m^{cl} son las constantes de propagación respectivas $\delta_m = \left(\frac{1}{2}\right) - \left[(\beta_{01}^{co}) - (\beta_m^{cl}) - \left(\frac{2\pi}{\Lambda}\right) \right]$ es la desintonía con respecto a la longitud de onda de resonancia, donde Λ es el período del LPFG.

Las expresiones de modo acoplado para LPFG se expresan como en la ecuación (29) y la ecuación (30):

$$\frac{dA_{01}^{co}}{dz} = j[\delta_m A_{01}^{co} + k_m A_m^{cl}] \quad (29)$$

$$\frac{dA_m^{cl}}{dz} = -j[\delta_m A_m^{cl} + k_m A_{01}^{co}] \quad (30)$$

donde k_m es el coeficiente de acoplamiento del modo de la cubierta del LP_{01} y k_m se denomina fuerza de acoplamiento.

Basados en la referencia [23] podemos modelar un caso similar, es decir en nuestro caso se tratará con una sola LPFG. Para simplificar, asumiremos que el campo eléctrico se acopla y desacopla solo una vez en la LPFG, y consideraremos el reflejo en el extremo de la fibra.

4.5.2 Esquema y Matrices para una LPFG

En este caso, el campo eléctrico incidente pasa a través de una sola LPFG, se acopla a la cubierta y luego se refleja en el extremo de la fibra. Después de la reflexión, el campo eléctrico interactúa nuevamente con la LPFG y se acopla de nuevo al núcleo.

4.5.3 Matrices de Transferencia

1. Matriz M_1 para la LPFG:

$$M_1 = \begin{bmatrix} t_1 & r_1 \\ r_1 & t_1^* \end{bmatrix} \quad (31)$$

- t_1 : Coeficiente de transmisión de la LPFG1.
- r_1 : Coeficiente de reflexión de la LPFG1.
- t_1^* : Conjugado complejo del coeficiente de transmisión de la LPFG1

Esta matriz describe cómo el campo eléctrico se transmite y se refleja en la LPFG.

2. Matriz M_ϕ para el cambio de fase:

$$M_\phi = \begin{bmatrix} e^{j(\phi/2)} & 0 \\ 0 & e^{-j(\phi/2)} \end{bmatrix} \quad (32)$$

- ϕ : Fase acumulada por el campo eléctrico al viajar una distancia d .

Esta matriz introduce un cambio de fase en los modos del núcleo y la cubierta.

3. Matriz M_2 para la distancia de propagación:

$$M_2 = \begin{bmatrix} e^{j(d\pi\Delta n/\lambda)} & 0 \\ 0 & e^{-j(d\pi\Delta n/\lambda)} \end{bmatrix} \quad (33)$$

- d : Distancia entre la LPFG y el extremo de la fibra.
- Δn : Diferencia de índice de refracción.
- λ : Longitud de onda.

Esta matriz introduce un cambio de fase específico a la distancia d entre la LPFG y el extremo de la fibra.

4.5.4 Matrices de Estado

4. Matriz B para las amplitudes de los modos:

$$B = \begin{bmatrix} A_{01}^{co}(z) \\ A_m^{cl}(z) \end{bmatrix} \quad (34)$$

- $A_{01}^{co}(z)$: Amplitud del modo del núcleo.
- $A_m^{cl}(z)$: Amplitud del modo de la cubierta.

Esta matriz representa las amplitudes de los modos propagándose a lo largo de la fibra.

5. Matriz R para la reflexión en el extremo de la fibra:

$$R = \begin{bmatrix} \left(\frac{n_{co} - n_e}{n_{co} + n_e}\right) e^{-j\delta_p} & 0 \\ 0 & \left(\frac{n_{cl} - n_e}{n_{cl} + n_e}\right) e^{-j\delta_s} \end{bmatrix} \quad (35)$$

- n_{co} : Índice de refracción del núcleo.
- n_{cl} : Índice de refracción de la cubierta.
- n_e : Índice de refracción externo.
- δ_p : Fase del modo del núcleo.
- δ_s : Fase del modo de la cubierta.

Esta matriz describe la reflexión del campo eléctrico en la superficie perpendicular al extremo de la fibra sin considerar la película reflejante.

4.5.5 Propagación del Campo Eléctrico

Para modelar el comportamiento del campo eléctrico en este sistema, consideramos los siguientes pasos:

1. El campo eléctrico incidente E_{in} pasa a través de la LPFG y se acopla a la cubierta.
2. El modo de la cubierta recorre la distancia d hasta el extremo de la fibra, acumulando una fase.
3. El campo eléctrico se refleja en el extremo de la fibra y vuelve a recorrer la distancia d hacia la LPFG, acumulando otra fase.
4. El campo eléctrico se acopla de nuevo al núcleo a través de la LPFG y produce interferencia.

La ecuación para el campo eléctrico reflejado puede escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} t_{bp} \\ r_{bp} \end{bmatrix} = M_1 M_\phi M_2 R M_2 M_\phi M_1 B \quad (36)$$

donde:

- M_1 : Matriz de transferencia de la LPFG.

- M_ϕ : Matriz de cambio de fase debido a la propagación en la cubierta.
- M_2 : Matriz de cambio de fase debido a la distancia d .
- R : Matriz de reflexión en el extremo de la fibra.
- B : Matriz de estado inicial.

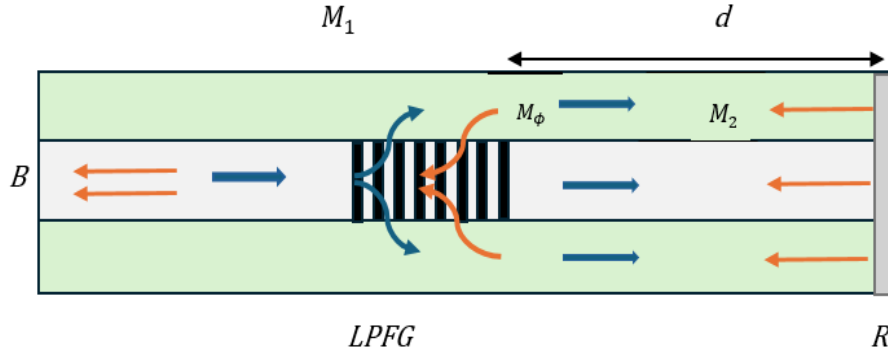


Fig. 22: Esquema de la propagación del campo eléctrico dentro de la fibra óptica.

La multiplicación de matrices se hace en el orden en que los eventos ocurren en el sistema físico. Cada matriz representa una transformación que el campo eléctrico experimenta a lo largo de su trayecto. Por lo tanto, para encontrar el estado final del campo eléctrico, multiplicamos las matrices en el orden en que ocurren las transformaciones, como se muestra en la Fig. 22.

Inicialmente, el campo eléctrico está en el estado B . Primero, el campo eléctrico pasa por la LPFG (representado por M_1), acoplándose del modo del núcleo al modo de la cubierta. Luego, el campo eléctrico recorre una distancia d en la cubierta, acumulando una fase (representado por M_ϕ). Después, el campo eléctrico continúa recorriendo la distancia d (representado por M_2). El campo eléctrico se refleja en el extremo de la fibra (representado por R). Luego, el campo eléctrico recorre de nuevo la distancia d en la cubierta, acumulando otra fase (representado por M_2). Después, el campo eléctrico recorre de nuevo una distancia d (representado por M_ϕ). Finalmente, el campo eléctrico pasa por la LPFG nuevamente (representado por M_1), acoplándose de regreso del modo de la cubierta al modo del núcleo.

De esta forma llegamos a que las ecuaciones para el coeficiente de transmisión t_{bp} y el coeficiente de reflexión r_{bp} se expresan como:

$$t_{bp} = \left[t_1 \left(\frac{n_{co}-n_e}{n_{co}+n_e} \right) e^{-i\delta_p} e^{j\left(2\frac{d\pi\Delta n}{\lambda}+\phi\right)} \left(t_1 A_{01}^{co}(z) + r_1 A_m^{cl}(z) \right) \right] + \left[r_1 \left(\frac{n_{cl}-n_e}{n_{cl}+n_e} \right) e^{-i\delta_s} e^{-j\left(2\frac{d\pi\Delta n}{\lambda}+\phi\right)} \left(r_1 A_{01}^{co}(z) + t_1^* A_m^{cl}(z) \right) \right] \quad (37)$$

$$r_{bp} = \left[r_1 \left(\frac{n_{co}-n_e}{n_{co}+n_e} \right) e^{-i\delta_p} e^{j\left(2\frac{d\pi\Delta n}{\lambda}+\phi\right)} \left(t_1 A_{01}^{co}(z) + r_1 A_m^{cl}(z) \right) \right] + \left[t_1^* \left(\frac{n_{cl}-n_e}{n_{cl}+n_e} \right) e^{-i\delta_s} e^{-j\left(2\frac{d\pi\Delta n}{\lambda}+\phi\right)} \left(r_1 A_{01}^{co}(z) + t_1^* A_m^{cl}(z) \right) \right] \quad (38)$$

Considerando las condiciones de contorno $A_{01}^{co}(0) = 1$ y $A_m^{cl}(0) = 0$, las ecuaciones para t_{bp} y r_{bp} se reducen a:

$$t_{bp} = t_1^2 \left(\frac{n_{co}-n_e}{n_{co}+n_e} \right) e^{-i\delta_p} e^{j\left(2\frac{d\pi\Delta n}{\lambda}+\phi\right)} + r_1^2 \left(\frac{n_{cl}-n_e}{n_{cl}+n_e} \right) e^{-i\delta_s} e^{-j\left(2\frac{d\pi\Delta n}{\lambda}+\phi\right)} \quad (39)$$

$$r_{bp} = t_1 r_1 \left(\frac{n_{co}-n_e}{n_{co}+n_e} \right) e^{-i\delta_p} e^{j\left(2\frac{d\pi\Delta n}{\lambda}+\phi\right)} + r_1 t_1^* \left(\frac{n_{cl}-n_e}{n_{cl}+n_e} \right) e^{-i\delta_s} e^{-j\left(2\frac{d\pi\Delta n}{\lambda}+\phi\right)} \quad (40)$$

Si solo se considera la transmisión y asumimos que $n_{co} \approx n_{cl}$, la transmitancia de potencia T_{bp} en contra propagación se da por la ecuación (41)

$$T_{bp} = \left| \left(\frac{n_{co} - n_e}{n_{co} + n_e} \right) \left(t_1^2 e^{-i\delta_p} e^{j(\phi+2C)} + r_1^2 e^{-i\delta_s} e^{-j(\phi+2C)} \right) \right|^2 \quad (41)$$

donde C representa la diferencia en el camino óptico.

$$C = \frac{d\pi\Delta n}{\lambda} \quad (42)$$

De la ecuación (41) podemos observar que el espectro de reflectancia final expresa cómo se está produciendo la interferencia en el MI en el modo de propagación de vuelta. La ecuación indica que el sistema es sensible a los cambios en los parámetros d , Δn , y λ , así como a las fases δ_p y δ_s . Esto sugiere que el sistema puede ser utilizado para detectar cambios en el entorno, en este caso, la presencia de moléculas de acetona que afectan el índice de refracción; sumado a esto se colocaron películas reflectantes en la punta de la fibra para evitar una disminución en la intensidad. La Fig. 23 muestra el perfil de transmisión de un MI formado por una sola LPFG.

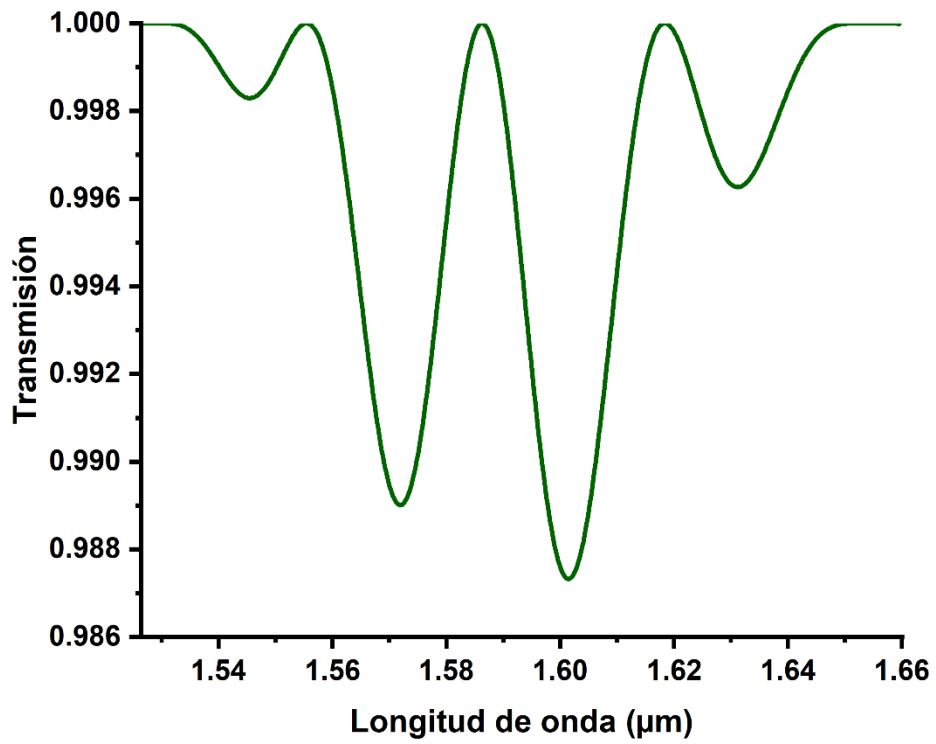


Fig. 23: Perfil de transmisión de un MI formado por una LPFG de $\Lambda = 515 \mu\text{m}$.

Capítulo 5

Análisis Multivariante

5.1 Análisis de componentes principales (PCA)

El PCA es una técnica estadística utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos mientras se conserva la mayor cantidad posible de variabilidad presente. Esta técnica es especialmente útil en situaciones donde se manejan grandes volúmenes de datos con muchas variables correlacionadas entre sí. PCA transforma el conjunto de datos original en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas, llamadas componentes principales, que se ordenan de manera que las primeras retengan la mayor cantidad de variabilidad de los datos originales [24].

5.1.1 Fundamentos matemáticos

PCA se basa en la idea de encontrar nuevas variables (componentes principales) que sean combinaciones lineales de las variables originales y que maximicen la varianza de los datos proyectados. Matemáticamente, esto se puede describir mediante la descomposición en valores propios (eigenvalue decomposition) o la descomposición en valores singulares (singular value decomposition, SVD) de la matriz de covarianza de los datos.

Dado un conjunto de datos X con n observaciones y p variables, primero se centra X restando la media de cada variable para obtener una matriz Z . La matriz de covarianza C se calcula como:

$$C = \frac{1}{n - 1} Z^T Z \quad (43)$$

luego, se resuelve la ecuación de valores propios:

$$C v_i = \lambda_i v_i \quad (44)$$

donde v_i son los vectores propios (eigenvectores) y λ_i son los valores propios (eigenvalores). Los vectores propios forman la base de los componentes principales y los valores propios indican la varianza explicada por cada componente.

5.1.2 Procedimiento del PCA

1. **Estandarización de los datos:** Debido a que PCA es sensible a las escalas de las variables, es importante estandarizar los datos de modo que cada variable tenga una media de cero y una desviación estándar de uno para garantizar que contribuyan de manera igualitaria al análisis.

2. **Cálculo de la matriz de covarianza:** Una vez que los datos están estandarizados, se calcula la matriz de covarianza para comprender cómo las variables varían juntas, es decir, para capturar las relaciones entre las variables.
3. **Cálculo de los valores y vectores propios de la matriz de covarianza:** Los valores y los vectores propios de la matriz de covarianza se calculan para identificar las direcciones principales de variabilidad en los datos.
4. **Selección de componentes principales:** Los vectores propios se ordenan de forma descendente en función de sus valores propios asociados. Los primeros k vectores propios, correspondientes a los k valores propios más grandes, se seleccionan como componentes principales.
5. **Transformación de los datos:** Se multiplica el vector propio obtenido y los datos originales para obtener los componentes principales. Los datos originales se proyectan sobre los vectores propios seleccionados para obtener las nuevas variables, es decir, los componentes principales.
6. Seleccionar los k componentes principales para visualizar los datos e identificar patrones [24].

5.1.3 Análisis de componentes principales en dos variables

Paso 1: Estandarización de los datos

Para estandarizar los datos, transformamos las variables x_1 y x_2 de manera que cada una tenga una media de cero y una desviación estándar de uno. Sea x_{1i} y x_{2i} las i -ésimas observaciones de las variables x_1 y x_2

$$z_{1i} = \frac{x_{1i} - \bar{x}_1}{\sigma_{x_1}} \quad (45)$$

$$z_{2i} = \frac{x_{2i} - \bar{x}_2}{\sigma_{x_2}} \quad (46)$$

donde \bar{x}_1 y \bar{x}_2 son las medias de las variables x_1 y x_2 , y σ_{x_1} y σ_{x_2} son las desviaciones estándar de x_1 y x_2 , respectivamente.

Paso 2: Cálculo de la matriz de covarianza

Una vez estandarizados los datos, calculamos la matriz de covarianza Σ :

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{pmatrix} \quad (47)$$

donde σ_{11} es la varianza de x_1 , σ_{22} es la varianza de x_2 , y $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ es la covarianza entre x_1 y x_2 . Estas se calculan como:

$$\sigma_{11} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)^2 \quad (48)$$

$$\sigma_{22} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{2i} - \bar{x}_2)^2 \quad (49)$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2) \quad (50)$$

Paso 3: Cálculo de los valores y vectores propios de la matriz de covarianza

Para encontrar los valores y vectores propios de Σ , resolvemos la ecuación característica:

$$\det(\Sigma - \lambda I) = 0 \quad (51)$$

lo cual da lugar a la siguiente ecuación:

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} - \lambda & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (52)$$

esto se traduce en la ecuación cuadrática:

$$(\sigma_{11} - \lambda)(\sigma_{22} - \lambda) - \sigma_{12}^2 = 0 \quad (53)$$

resolviendo esta ecuación cuadrática obtenemos los valores propios λ_1 y λ_2 :

$$\lambda_{1,2} = \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \pm \sqrt{(\sigma_{11} + \sigma_{22})^2 - 4(\sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2)}}{2} \quad (54)$$

una vez obtenidos los valores propios, los vectores propios se encuentran resolviendo:

$$(\Sigma - \lambda I)v = 0 \quad (55)$$

para cada valor propio λ

Paso 4: Selección de componentes principales

Ordenamos los valores propios en orden descendente y seleccionamos los vectores propios correspondientes a los k valores propios más grandes como los componentes principales.

Paso 5: Transformación de los datos

Los datos originales se proyectan sobre los vectores propios seleccionados para obtener los componentes principales. Si v_1 y v_2 son los vectores propios correspondientes a los valores propios λ_1 y λ_2 :

$$PC_1 = v_1^T X \quad (56)$$

$$PC_2 = v_2^T X \quad (57)$$

donde X es la matriz de datos estandarizados.

Paso 6: Selección de los k componentes principales para visualizar los datos

Seleccionamos los primeros k componentes principales para visualizar los datos e identificar patrones. El primer componente principal (PC_1) representa la mayor varianza observada sujeta a cumplir la condición de ortonormalidad.

Finalmente, el problema se reduce a resolver el problema de los valores propios de la matriz de varianza-covarianza de los datos, de manera que determinar los componentes principales es equivalente a determinar los valores y los vectores propios de la matriz Σ .

5.1.4 Análisis de componentes principales en p variables

Vamos a extender el procedimiento de PCA para p variables siguiendo los mismos pasos que hemos detallado para el caso de dos variables.

Paso 1: Estandarización de los datos

Para asegurarnos de que cada variable contribuya de manera igualitaria al análisis, estandarizamos los datos para que cada variable tenga una media de cero y una desviación estándar de uno. Dado un conjunto de datos con n observaciones y p variables, el valor estandarizado z_{ij} de la variable j en la observación i se calcula como:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad (58)$$

donde \bar{x}_j es la media de la variable j y σ es la desviación estándar de la variable j .

Paso 2: Cálculo de la matriz de covarianza

Una vez estandarizados los datos, calculamos la matriz de covarianza S de tamaño $p \times p$. La entrada s_{jk} de la matriz de covarianza es:

$$s_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_{ij} - \bar{z}_j)(z_{ik} - \bar{z}_k) \quad (59)$$

donde $\bar{z}_j = 0$ y $\bar{z}_k = 0$ debido a la estandarización.

Paso 3: Cálculo de los valores y vectores propios de la matriz de covarianza

Para encontrar los valores propios λ y los vectores propios a de S , resolvemos la ecuación característica:

$$[\det(S - \lambda I) = 0] \quad (60)$$

esto nos da p valores propios $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ y los correspondientes vectores propios a_1, a_2, \dots, a_p .

Paso 4: Selección de componentes principales

Ordenamos los valores propios en orden descendente. Los primeros k vectores propios (correspondientes a los k mayores valores propios) se seleccionan como los componentes principales.

Paso 5: Cálculo de los vectores propios asociados

Para cada valor propio λ_i , resolvemos:

$$[(S - \lambda_i I)a_i = 0] \quad (61)$$

para encontrar el vector propio a_i . Normalizamos cada vector propio para que su norma sea uno: $[|a_i| = 1]$

Paso 6: Proyección de los datos

Los datos originales se proyectan sobre los vectores propios seleccionados para obtener los nuevos datos en el espacio de los componentes principales. Si X es la matriz de datos estandarizados de tamaño $n \times p$ y A es la matriz de los primeros k vectores propios (de tamaño $p \times k$), entonces la proyección de los datos es:

$$[Z = XA] \quad (62)$$

donde Z es la matriz de los componentes principales de tamaño $n \times k$.

5.1.5 Resumen final del procedimiento para PCA

1. Estandarización de los datos:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad (63)$$

2. Matriz de covarianza:

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1p} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{p1} & s_{p2} & \cdots & s_{pp} \end{pmatrix} \quad (64)$$

3. Valores y vectores propios:

$$[\det(S - \lambda I) = 0] \quad (65)$$

Valores propios: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$.

Vectores propios: a_1, a_2, \dots, a_p .

4. Selección de componentes principales:

Ordenar $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ y seleccionar los primeros k vectores propios.

5. Cálculo de vectores propios:

Resolver $(S - \lambda_i I)a_i = 0$ para cada λ_i y normalizar.

6. Proyección de los datos:

$$[Z = XA] \quad (66)$$

donde A contiene los primeros k vectores propios.

5.1.6 Interpretación y utilización de PCA

Los componentes principales obtenidos pueden ser utilizados para diversas finalidades, tales como la visualización de datos, la reducción de dimensionalidad y la eliminación de ruido. Una de las aplicaciones más comunes es la visualización en dos o tres dimensiones, lo cual facilita la interpretación y la identificación de patrones en datos de alta dimensionalidad.

Además, PCA puede ser utilizado en técnicas de preprocesamiento de datos para algoritmos de aprendizaje automático. Al reducir la dimensionalidad, PCA ayuda a disminuir el tiempo de computación y a mejorar la eficiencia de los modelos predictivos.

5.2 Regresión por proyección de estructuras latentes (PLSR)

PLSR es una técnica estadística multivariante utilizada para modelar la relación entre un conjunto de variables predictoras y uno o varios conjuntos de variables respuesta. Es especialmente útil cuando el número de variables predictoras es grande y hay colinealidad entre ellas, es decir, cuando algunas variables predictoras están altamente correlacionadas entre sí.

5.2.1 Principio básico de PLSR

PLSR combina aspectos de la regresión lineal y el PCA. Su objetivo principal es encontrar una representación compacta de las variables predictoras que mantenga la mayor correlación posible con las variables respuesta. Esto se logra a través de un proceso de reducción de dimensionalidad en el que se proyectan las variables a un espacio de componentes latentes.

5.2.2 Pasos fundamentales de PLSR

1. Construcción de Componentes Latentes: PLSR busca construir componentes latentes (variables nuevas) que son combinaciones lineales de las variables predictoras originales. A diferencia de PCA, las componentes latentes de PLSR se seleccionan para maximizar la covarianza con las variables respuesta, lo que las hace más relevantes para el modelo.

2. Proyección: Las variables predictoras originales se proyectan en este nuevo espacio de componentes latentes. Cada componente captura la mayor cantidad de varianza posible en las variables predictoras, pero también está orientada para maximizar su relación con las variables respuesta.

3. Regresión en el Espacio Latente: Una vez que se ha reducido el número de componentes, PLSR realiza la regresión en este espacio de menor dimensión, lo que permite encontrar la relación entre las variables latentes proyectadas y las variables respuesta. Esto facilita la interpretación y mejora la estabilidad del modelo.

Ventajas de PLSR

- Manejo de Colinealidad: Al trabajar con proyecciones en componentes latentes, PLSR puede manejar situaciones donde hay una fuerte correlación entre las variables predictoras.

- Reducción de Dimensionalidad: Permite reducir la dimensión del conjunto de datos, lo cual es útil cuando se trabaja con muchas variables predictoras (como en espectros o señales).

- Predicciones Robustas: Las proyecciones hacia un espacio latente pueden mejorar la precisión y estabilidad de las predicciones, especialmente cuando los datos tienen ruido o son complejos.

5.2.3 Aplicaciones comunes

PLSR es muy utilizada en áreas como:

- Quimiometría: Para analizar espectros químicos y predecir la concentración de sustancias.

- Sensores y Análisis de Datos: Para el análisis de sensores que responden a varias variables y cuya respuesta puede estar correlacionada.

- Procesos Industriales: Donde se requieren modelos predictivos robustos para conjuntos de datos de alta dimensión.

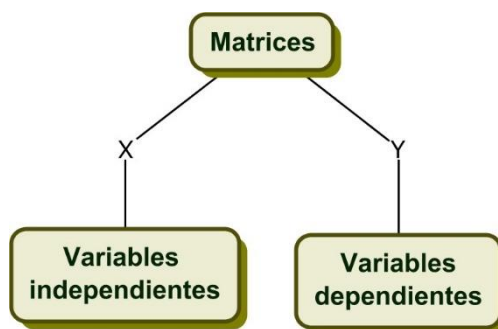
5.2.4 Diferencias con otras técnicas

- PCA vs. PLSR: PCA se enfoca solo en capturar la varianza de las variables predictoras, mientras que PLSR busca maximizar la covarianza entre los componentes latentes y las variables respuesta, lo que lo hace más adecuado para problemas de regresión.

- Regresión Lineal Múltiple vs. PLSR: La regresión lineal múltiple puede ser ineficaz cuando hay muchas variables correlacionadas o ruido en los datos. PLSR, al trabajar con un número reducido de componentes, puede generar un modelo más estable y fácil de interpretar.

En resumen, PLSR es una herramienta poderosa para construir modelos predictivos cuando las variables son numerosas y están correlacionadas, facilitando un análisis más robusto y confiable en comparación con otros métodos de regresión.

5.2.5 Formalismo PLSR



El formalismo de PLSR tiene enfoque específico en la regresión, donde el objetivo es modelar una relación lineal entre las matrices de variables independientes (**X**) y las variables dependientes (**Y**). A continuación, se detalla el formalismo de PLSR:

1. Inicialización:

$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{y}}$; donde $\bar{\mathbf{y}}$ es el vector relacionado con las concentraciones, es decir, una columna de **Y**.

2. Cálculo del vector de pesos (**w**):

Se define el vector de pesos **w**:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{X}'\mathbf{u}}{\mathbf{u}'\mathbf{u}} \quad (67)$$

Este vector ayuda a encontrar las componentes latentes LS que mejor explican la covarianza entre **X** y **Y**. El vector de peso **w** nos dice que tanto aportan las respectivas LS al resultado final, y es jerárquico ($w_0 > w_1 > w_2 > \dots > w_n$).

3. Cálculo del vector **t** (puntuaciones)

Las puntuaciones latentes **t** se obtienen proyectando **X** sobre **w**:

$$\mathbf{t} = \mathbf{X}\mathbf{w} \quad (68)$$

Este vector de puntuaciones representa la proyección de **X** en el espacio de las componentes latentes.

4. Cálculo del vector de pesos **c** para **Y**:

Se define el vector de peso **c**, que relaciona las puntuaciones **t** con la matriz de salida **Y**:

$$\mathbf{c} = \frac{\mathbf{Y}'\mathbf{t}}{\mathbf{t}'\mathbf{t}} \quad (69)$$

Con **c**, se va a actualizar **u**.

5. Actualización de **u**:

Se actualiza **u** para la siguiente iteración usando **c**:

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{Y} \mathbf{c}}{\mathbf{c}' \mathbf{c}} \quad (70)$$

6. Criterio de convergencia:

Se verifica el criterio de convergencia:

$$\frac{\|t_{old} - t_{new}\|}{\|t_{new}\|} < \varepsilon \quad (71)$$

donde ε es un umbral pequeño (por ejemplo, $10^{-6} < \varepsilon < 10^{-8}$).

7. Deflación de las matrices \mathbf{X} y \mathbf{Y} :

Se ajustan \mathbf{X} y \mathbf{Y} para eliminar la influencia de la componente latente encontrada:

$$\mathbf{X}_{new} = \mathbf{X} - \mathbf{t}_{new} \mathbf{p}' \quad (72)$$

$$\mathbf{Y}_{new} = \mathbf{Y} - \mathbf{t}_{new} \mathbf{c}' \quad (73)$$

\mathbf{p}' son los vectores de carga.

En PLS solo se usan las LS para \mathbf{X} , donde \mathbf{p} son los vectores de carga de \mathbf{X} :

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{X}' \mathbf{t}}{\mathbf{t}' \mathbf{t}} \quad (74)$$

8. Repetición:

Se repiten los pasos 2-7 hasta que se encuentren todas las componentes latentes deseadas.

En PLSR, se encuentran las estructuras latentes para \mathbf{X} y \mathbf{Y} , y se ajusta un modelo de regresión utilizando estas componentes latentes. Esto resulta en un modelo que no solo reduce la dimensionalidad de los datos, sino que también maximiza la correlación entre las proyecciones de \mathbf{X} y \mathbf{Y} .

Capítulo 6

Arreglo Experimental

6.1 Fabricación de la LPFG

El equipo empleado para la fabricación de rejillas de periodo largo mediante el método punto a punto utilizando la técnica de arco eléctrico consistió en una fuente de luz de diodo superluminiscente (SLD) con un rango espectral de 1400-1500 nm, una empalmadora de fibra óptica, así como un actuador lineal (Zaber, TLA28 A) que tiene una resolución de 0.1 μm , un analizador de espectros óptico (OSA, modelo Ando AQ6315 A 9057 F/8) por sus siglas en inglés Optical Spectrum Analyzer, una cortadora de fibra óptica monomodo (FiTel S326) , una peladora de fibra óptica y una computadora personal para almacenar los datos.

El primer paso para grabar una LPFG consistió en preparar la fibra; aquí se determinó la longitud de la fibra que se utilizó en este proceso (80 cm), posteriormente se retiró la cubierta en una sección predeterminada (4 cm) de la fibra en la cual se grabó la rejilla. Para ello, utilizamos la peladora. Una vez que se ha retirado la cubierta es conveniente limpiar esta sección de la fibra con alcohol isopropílico, para remover los restos del recubrimiento que quedaron adheridos a la fibra debido a que la limpieza es un factor crítico que determina la calidad de la rejilla, en seguida, con ayuda de la cortadora se hicieron cortes transversales en los extremos finales de la fibra.

Una vez que se ha preparado la fibra, el siguiente paso es colocarla en la estación de grabado. Para ello se colocó el inicio de la sección de la fibra sin cubierta entre los electrodos de la empalmadora. Los dos extremos de la fibra se colocaron en sujetadores de fibra para evitar que se movieran, un extremo de la fibra se fijó al actuador que permite estirar la fibra una distancia determinada, posteriormente este mismo extremo se conectó al OSA para observar la evolución del espectro de transmisión de la rejilla durante el proceso de fabricación y de esta manera determinar la calidad de la rejilla. El otro extremo de la fibra se conectó al SLD que proporciona la corriente de entrada.

El actuador y el OSA se conectaron a la computadora, en un arreglo como el que se muestra en la Fig. 24.

Para comenzar con el proceso de grabado, se programó la empalmadora para trabajar a una potencia de arco eléctrico de 45 mW, un tiempo de exposición de 250 ms, además de una corriente de entrada de 80.5 mA, esta última dada por el SLD.

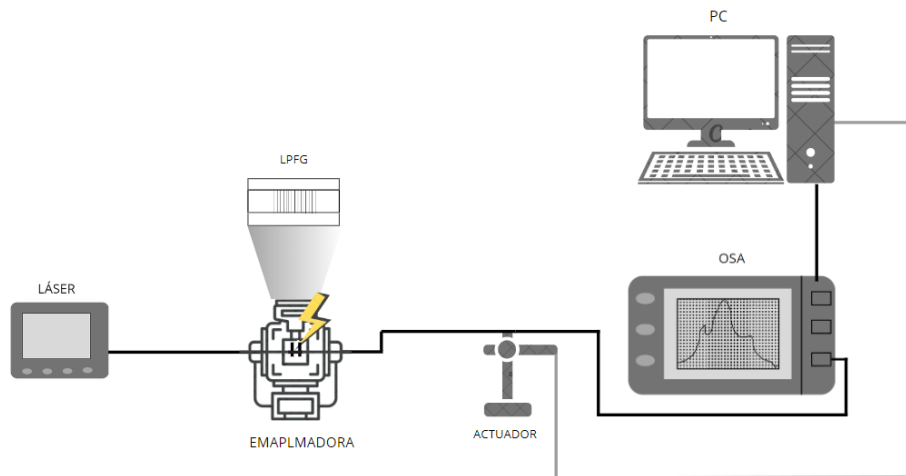


Fig. 24: Configuración del grabado de la LPPG.

Con ayuda de un tornillo micrométrico colocado en la base del actuador, se desplazó la fibra a manera de que el primer punto se grabara a una distancia de 5 mm del límite entre las zonas con y sin recubrimiento. Con el objetivo de obtener un mejor contraste en el MI se varió el periodo de la LPPG con valores de 515 y 530 nm, con 40 puntos de grabado.

6.2 Diseño y caracterización del interferómetro de Michelson

Para utilizar el MI en modo de reflexión, se realizó un corte perpendicular en la fibra óptica utilizando la cortadora de precisión. Se variaron las distancias (d) entre la parte central de la LPPG (20 puntos) y el corte final en 3, 4 y 5 cm, ver Fig. 25. Estas variaciones permiten ajustar la fase relativa entre los haces de luz, lo que influye directamente en la sensibilidad, la resolución, el espectro de interferencia, así como en las características de transmisión y reflexión del sistema.

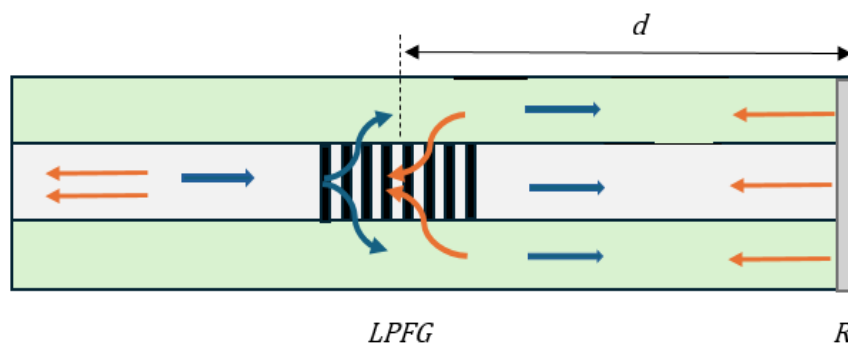


Fig. 25: Variación de la distancia d .

Se diseñaron los MI con dos diferentes películas reflejantes, en unos se realizó la fotodeposición de nanopartículas de oro en la punta de la fibra, y en otros se colocó una película reflejante hecha a base de nitrato de plata, el proceso de deposición de estas películas se detalla en las secciones 6.2.1 y 6.2.2 respectivamente. En ambos casos la punta de la fibra óptica fue previamente limpiada con solución piraña para eliminar cualquier residuo que pudiera afectar la calidad de la película.

6.2.1 Proceso de fotodeposición de nanopartículas de oro

1. Preparación del Sistema Óptico:

El experimento comenzó con la conexión de un láser de 980 nm y 36 mW de potencia a un circulador de tres puertos mediante fibra óptica (SMF-28). El segundo puerto se empalmó al MI, este se posicionó en un soporte diseñado específicamente para mantener la fibra óptica en orientación vertical, facilitando así la inmersión de su punta en la solución de nanopartículas de oro. Por último, el tercer puerto se conectó al OSA.

2. Inmersión en la Solución de Nanopartículas de Oro:

Con la fibra óptica adecuadamente posicionada, la punta de esta fue sumergida en una solución de nanopartículas de oro esféricas de 25 nm de diámetro. Se agitó la solución previamente para asegurar que las nanopartículas estuvieran homogéneamente dispersas y no se precipitaran en el fondo del recipiente, lo cual podría afectar negativamente la uniformidad de la deposición.

3. Fotodeposición:

El proceso de fotodeposición se inició aplicando el láser de 980 nm a través de la fibra óptica mientras esta permanecía sumergida en la solución de nanopartículas. La corriente del láser fue incrementada en pasos de 100 mA cada minuto, comenzando desde 100 mA hasta alcanzar un máximo de 600 mA. Este incremento gradual permitió un control preciso sobre el proceso, garantizando la adhesión efectiva de las nanopartículas de oro a la superficie de la fibra.

Una vez alcanzada la corriente de 600 mA, la fibra se mantuvo en la solución durante 5 minutos adicionales, con el objetivo de asegurar una fotodeposición uniforme de las nanopartículas en la punta de la fibra.

4. Finalización del Proceso:

Tras completar el tiempo de fotodeposición, la fibra óptica fue retirada cuidadosamente de la solución de nanopartículas. El proceso de fotodeposición se observa en la Fig. 26.

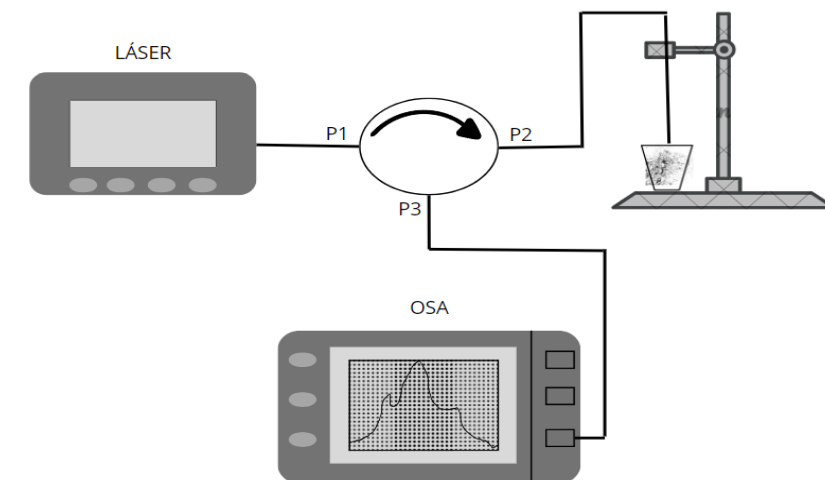


Fig. 26: Proceso de fotodeposición de nanopartículas de oro.

6.2.2 Síntesis y depósito de una película reflejante (plata metálica) por medio de la reacción de Tollens.

Se llevó a cabo la síntesis de la reacción de Tollens, esta reacción es usada como prueba para la detección de aldehídos. Los aldehídos son oxidados a grupos funcionales carbonilo ($C=O$) y los iones de diamminoplatino son reducidos a plata metálica. Comúnmente esta reacción también es conocida como la prueba del “espejo de plata” debido a que la plata metálica suele depositarse sobre una superficie de vidrio, que en nuestro caso será depositado sobre la punta de una fibra óptica (FO). Para el proceso de síntesis y depósito de plata metálica se siguió el protocolo descrito.

Preparación de la película de Plata

Para obtener la película de plata, fueron preparadas 3 disoluciones diferentes usando como disolvente agua desionizada en cada una. Los compuestos y concentraciones son:

1. Se preparó una disolución a una concentración molar de 0.1 M de Nitrato de plata ($AgNO_3$, DEQP23200000S). El compuesto $AgNO_3$ fue comprado en DEQ (Desarrollo de Especialidades Químicas). La presentación del nitrato de plata es una sal que fue extraída de su recipiente con ayuda de una espátula y luego medida utilizando una balanza analítica con la que se midió 34.81 mg de $AgNO_3$. Acorde a la concentración molar usada se calculó el volumen de agua desionizada que fue de 2.049 mL, en la que fue disuelta la sal.
2. Se preparó una disolución a una concentración molar de 0.8 M de Hidróxido de potasio (KOH, CAS-No: 1310-58-3) comprado en Sigma-Aldrich. Al igual que el compuesto anterior, 146 mg de KOH fueron pesados. Este compuesto viene en una presentación de escamas, que suelen hidratarse al contacto con la humedad del ambiente, por lo que su pesado suele ser rápido (menor a 1 min), ya que este proceso de hidratación puede provocar diferencias en el valor de su masa. El KOH

fue manipulado usando una espátula de laboratorio y medido con una balanza, para el que el valor de masa del KOH pesado se usó 3.185 mL de agua desionizada.

3. Se usó Amoniaco al 25 % (w/w), del que se emplearon 2 gotas equivalentes a 100 μ L.
4. Una disolución de Dextrosa que es glucosa suspendida en agua ($C_6H_{12}O_6$, CAS-No: 1068606) fue preparada a una concentración molar de 0.5 M, esta disolución glucosa fue adquirida con PISA. Las disoluciones comerciales suelen venir preparadas a una concentración de 5 %, 5 mg de glucosa disueltos en 100 mL de agua, por lo que la concentración mencionada fue reducida disolviendo 1 mL de la disolución glucosada en 0.9 mL de agua desionizada.

Para el depósito de la plata metálica sobre las puntas de FO, fueron mezcladas las disoluciones, comenzando con 640 μ L de $AgNO_3$ con 440 μ L de KOH. La Fig. 27 a-b muestran estos reactivos antes y después de mezclarse, respectivamente. La disolución resultante fue vertida dentro de un vaso de precipitados equipado con una tapa para evitar la evaporación y contaminación del contenido. Para asegurar una mezcla homogénea de los componentes, se utilizó un agitador vortex. Este dispositivo fue colocado debajo del vaso de precipitados, generando un movimiento circular que facilitó la completa disolución de los compuestos. Este proceso permitió obtener una solución uniforme.

Luego de mezclar por 5 minutos se agregaron las 2 gotas de amoniaco y se mezcló durante un minuto, el resultado de esta mezcla se observa en la Fig. 27 c). Por último, se agregó la dextrosa y se mezcló durante otros 5 minutos. En la Fig. 27 d) se observa el depósito de plata metálica que forma una película sobre las paredes del vial de vidrio.

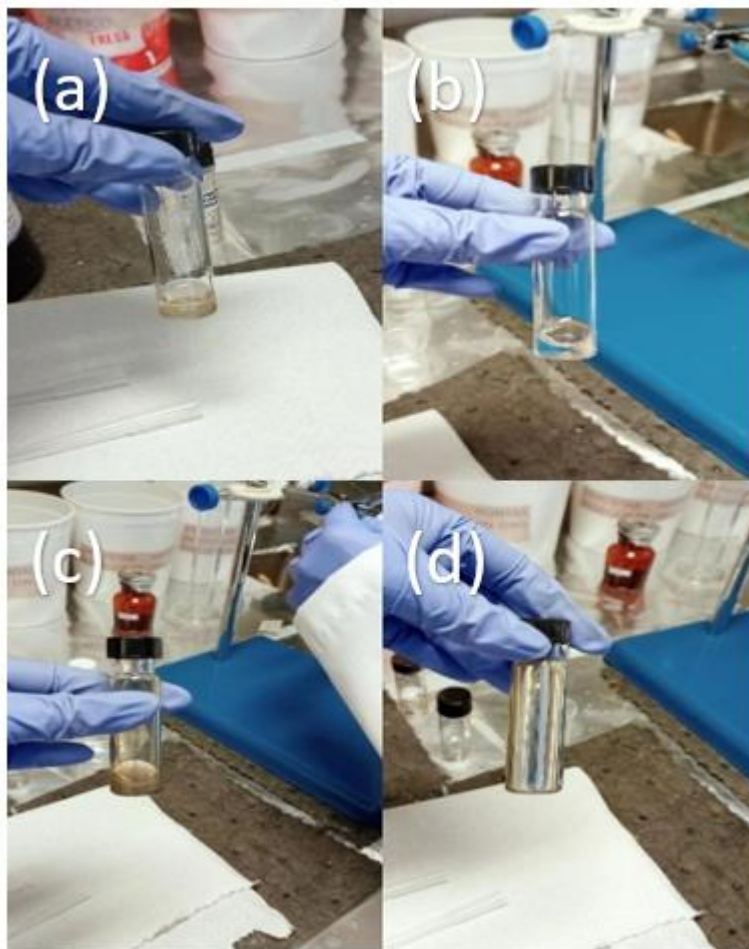


Fig. 27: Proceso de síntesis y depósito de plata metálica en forma de una película de plata, donde a) muestra las disoluciones de AgNO_3 e KOH previo a su mezcla, b) ambas disoluciones son mezcladas en el mismo contenedor observado una disolución transparente, c) agregación de $100 \mu\text{L}$ NH_3 a la mezcla de AgNO_3 y KOH , lo que produce una oxidación y d) la agregación de la dextrosa como agente estabilizador para obtener la separación de los aldehídos y la plata metálica que se deposita sobre las paredes del vial de vidrio.

Depósito de la Película en la Punta de la Fibra Óptica

Una vez preparada la película, se procedió al depósito de esta sobre la punta de la fibra óptica. El procedimiento fue el siguiente:

1. Montaje para la inmersión: Las fibras ópticas fueron colocadas en un pedazo de hule espuma, que a su vez se montó en un soporte universal de laboratorio equipado con una doble nuez y pinzas de garre. Este montaje permitió mantener las fibras en una posición estable durante el proceso de inmersión.
2. Inmersión en la solución: Con las fibras montadas, las puntas se sumergieron en la solución de nitrato de plata preparada previamente, asegurando una cobertura completa y uniforme de la superficie. Las puntas de las fibras ópticas se dejaron sumergidas en la solución por 30 minutos para permitir una adecuada adherencia de la plata metálica sobre la punta de la fibra y así obtener una película de plata.

3. Secado: Tras la inmersión, la fibra óptica se retiró de la solución y se dejó evaporar el disolvente residual dentro de una campana de extracción. Esta etapa fue hecha en condiciones ambientales.

Este procedimiento permitió el depósito de plata metálica en forma de una película sobre la punta de una fibra óptica, asegurando su aplicación efectiva en el diseño y funcionamiento del MI en fibra óptica.

6.2.3 Depósito de polidimetilsiloxano

Se utilizó una película de polidimetilsiloxano (PDMS) para la detección, ya que presenta una buena interacción con compuestos orgánicos volátiles, como la acetona. Este material no se oxida y posee un índice de refracción de 1.422 a $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$. El MI se sumergió en PDMS durante 2 días a temperatura ambiente para permitir que el PDMS se adhiriera a su superficie.

El MI se caracterizó utilizando un circulador óptico independiente de la polarización, con el puerto 1 conectado al SLD, el puerto 2 fusionado con el otro extremo del MI y el puerto 3 conectado al OSA, como se muestra en la Fig. 28a).

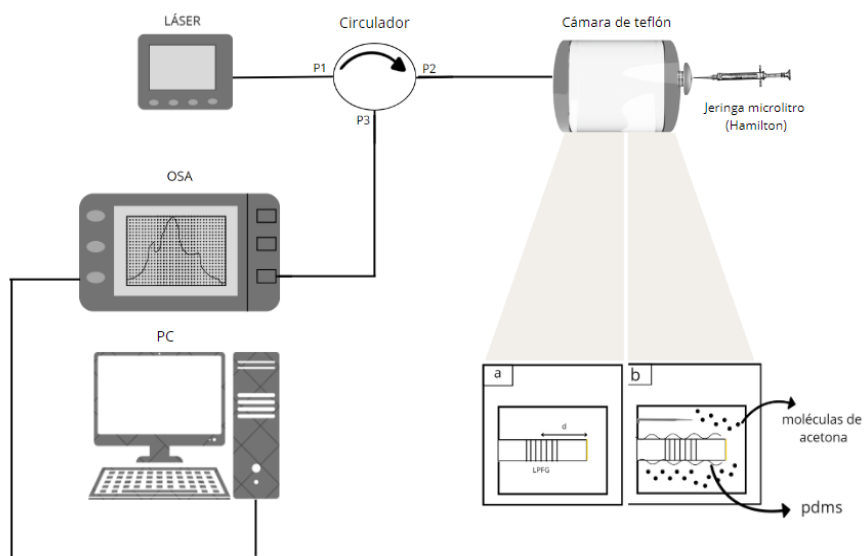


Fig. 28: Configuración de medición del espectro. a) Caracterización del MI en modo de reflexión, b) Detección de acetona.

6.3 Medición de acetona

Para la medición de acetona, el sensor se colocó dentro de una cámara de Teflón de 1 L (ver Fig. 28 b)). En primer lugar, se realizó una medición sin ninguna muestra. A continuación, se inyectó una muestra líquida de acetona en la cámara utilizando una jeringa microlitro (Hamilton) en una dosis de $0.1 \mu\text{L}$ (33.2 ppm). La muestra líquida se dejó evaporar,

mientras se medía el espectro del sensor cada minuto durante 10 minutos. Este proceso se repitió 10 veces hasta haber inyectado un total de 1 μL (332 ppm) en la cámara.

Las moléculas de acetona en forma de gas se depositan sobre la superficie del PDMS, alterando el índice de refracción y provocando variaciones espectrales que pueden ser detectadas con el OSA.

Dadas las condiciones de nuestro sistema, la constante de conversión de μl a ppm es 332, que se obtiene a partir de la ecuación de concentración:

$$C_{ppm} = \frac{22.4T_a\rho_aV_l}{273M_wV_c} \times 10^3 \quad (75)$$

donde T_a es la temperatura ambiente, ρ_a es la densidad, V_l el volumen del recipiente, M_w es la masa molar y V_c es el volumen del compuesto.

Capítulo 7

Resultados y discusiones

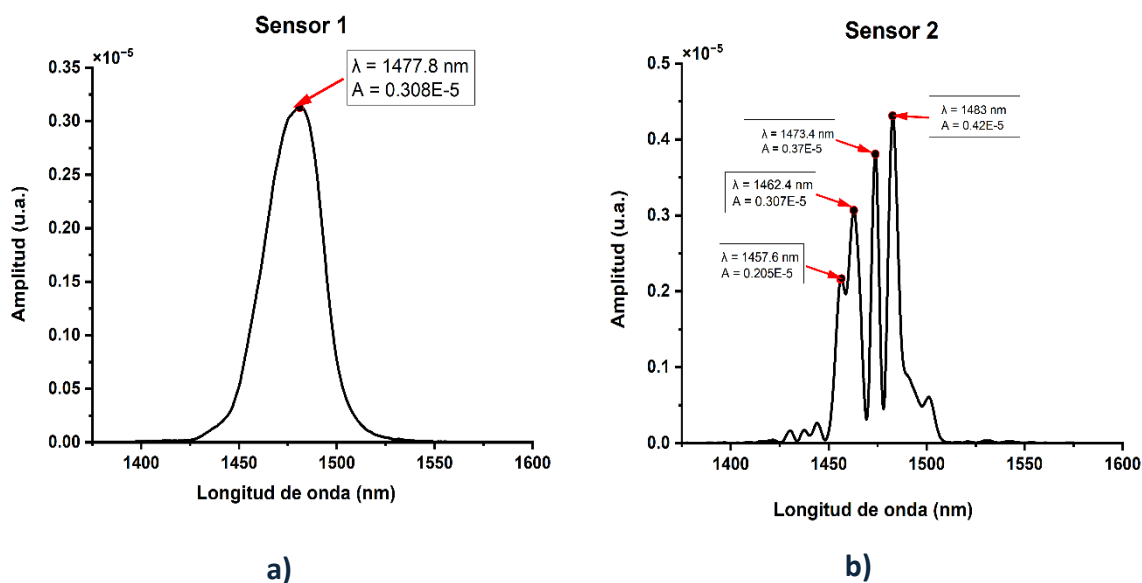
Se fabricaron 4 sensores, todos con una LPFG de 40 puntos, aplicando un arco eléctrico de 45 mW, un tiempo de exposición de 250 ms y una corriente de entrada de 80.5 mA. Se variaron las distancias de corte (d) entre la parte central de la LPFG (20 puntos) y el corte final, estableciendo distancias de 3, 4 y 5 cm, así como también las películas reflejantes y el periodo de la modulación. A continuación, se detallan estas características:

1.- Sensor 1 con nanopartículas de oro, periodo de la modulación de 515 μm y distancia de corte (d) de 5 cm.

2.- Sensor 2 con nanopartículas de oro, periodo de la modulación de 530 μm y distancia del corte de 3 cm.

3.- Sensor 3 con película reflejante de AgNO_3 , periodo de la modulación de 530 μm y distancia del corte de 4 cm.

4.- Sensor 4 con periodo de la modulación de 530 μm , distancia del corte de 5 cm y sin película reflejante.



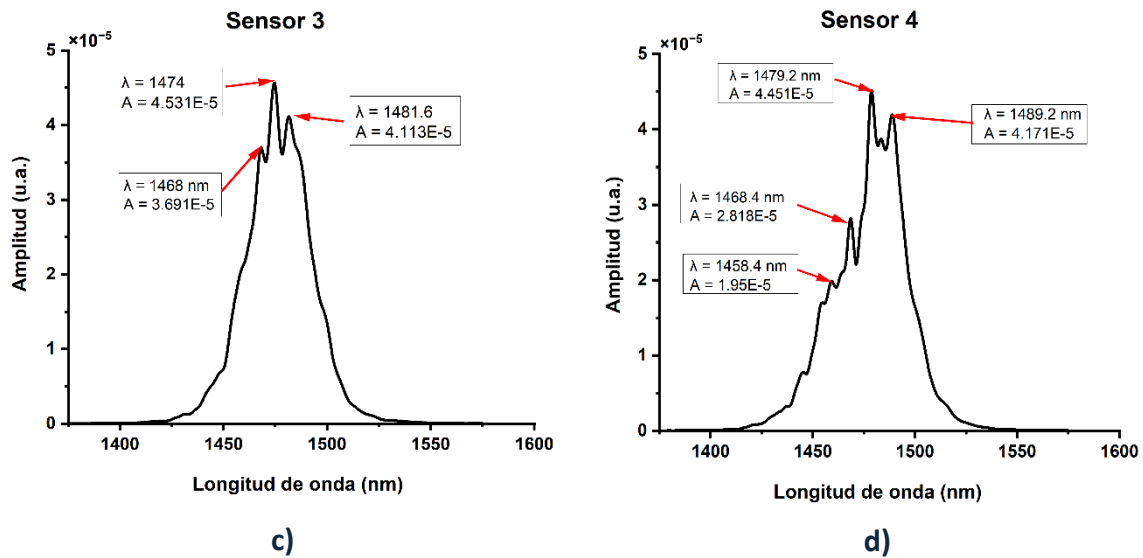


Fig. 29: Espectros de reflexión sin película reflejante, sin la película sensora (PDMS) y sin la interacción de la acetona para a) el sensor 1 con periodo de 515 μm y distancia del corte de 5 cm, b) el sensor 2 con periodo de 530 μm y distancia del corte de 3 cm, c) el sensor 3 con periodo de 530 μm y distancia del corte de 4 cm, d) el sensor 4 con periodo de 530 μm y distancia del corte de 5 cm.

Los gráficos presentados en la Fig. 29 muestran los espectros de reflexión obtenidos para los sensores 1 a 4, en ausencia de las películas reflejantes, del PDMS y sin exposición a acetona. Las configuraciones específicas de cada sensor son las siguientes:

1.- Sensor 1 (Fig. 29 a)): En este espectro no se observan múltiples picos de atenuación (de acoplamiento) debidos al acoplamiento modal, lo que podría indicar que la rejilla de periodo largo (LPFG) no se grabó correctamente en la fibra óptica. Este resultado podría deberse a una insuficiente modificación en el índice de refracción del núcleo durante el proceso de fabricación de la rejilla. Sin embargo, se decidió utilizar esta fibra en la configuración del MI para evaluar su respuesta frente a la interacción con acetona. Esto se realizó con el propósito de explorar si, a pesar de la ausencia de picos de acoplamiento evidentes en el espectro de reflexión, el sensor sería capaz de generar una señal útil bajo las condiciones posteriores.

2.- Sensores 2, 3 y 4 (Fig. 29 b-d): En contraste, estos espectros presentan múltiples picos de atenuación (o perturbaciones), los cuales son resultado del acoplamiento entre los modos núcleo-cubierta inducido por la LPFG. La cantidad y amplitud de los picos de acoplamiento son más prominentes en estas configuraciones debido a factores como la mayor efectividad en la modulación del índice de refracción y las variaciones en las distancias de corte.

Los resultados sugieren que las configuraciones geométricas y las distancias de corte influyen de manera significativa en el comportamiento espectral de los sensores. La

ausencia de picos de acoplamiento en el caso del Sensor 1 podría ser un indicativo de parámetros de fabricación menos efectivos, mientras que la presencia de picos en los otros sensores confirma un mejor acoplamiento modal en las configuraciones utilizadas.

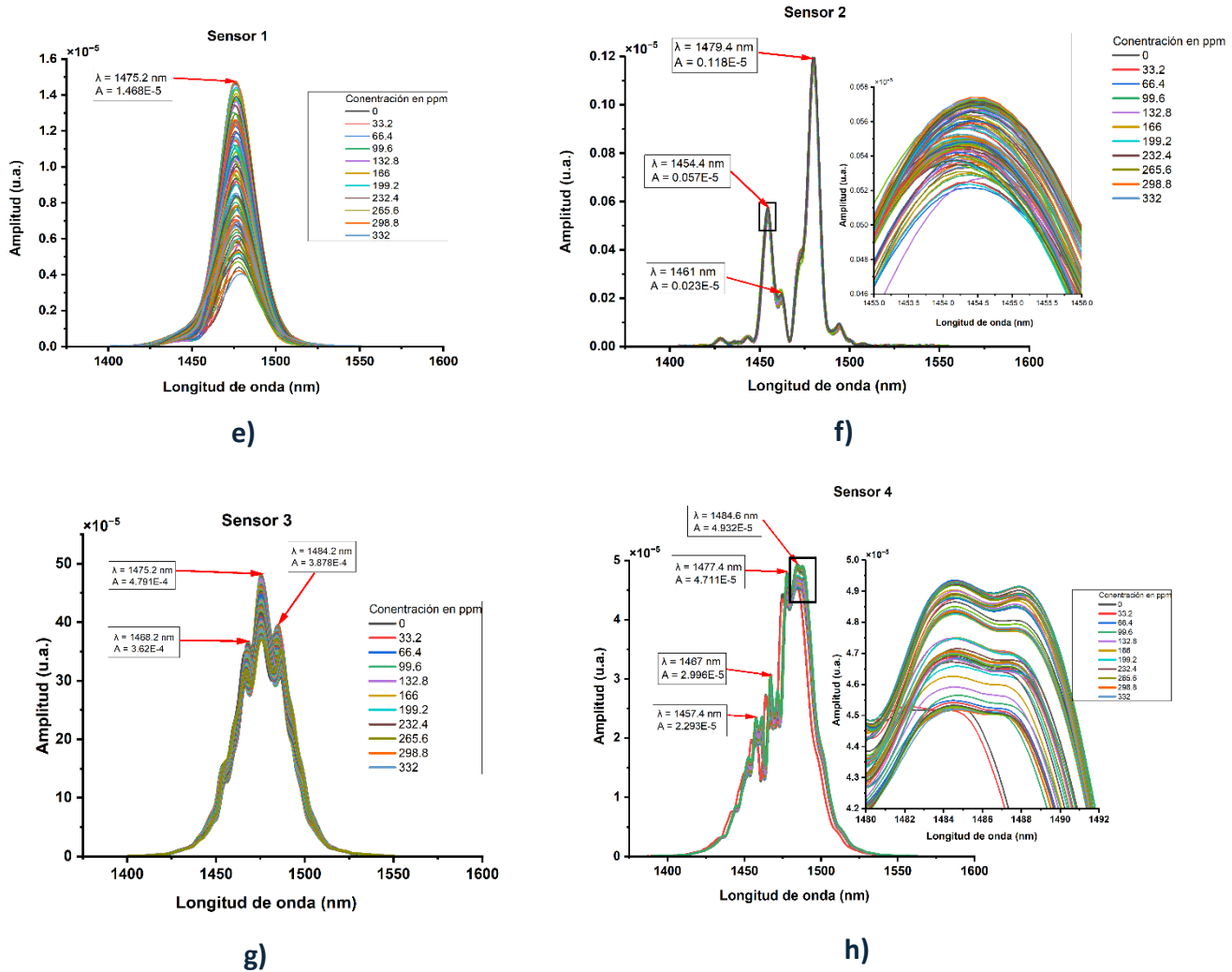


Fig. 30: Espectros de salida medidos con acetona para el sensor con a) nanopartículas de oro, periodo de 515 μm y distancia del corte de 5 cm, b) nanopartículas de oro, periodo de 530 μm y distancia del corte de 3 cm, c) película reflejante de AgNO_3 , periodo de 530 μm y distancia del corte de 4 cm, d) periodo de 530 μm , distancia del corte de 5 cm y sin película reflejante.

En la Fig. 30 se presentan los espectros de transmisión con exposición a acetona medidos del min. 1 al min. 10 para cuatro configuraciones distintas de sensores, cada una con variaciones en los parámetros de diseño, incluyendo el tipo de recubrimiento reflectante y la distancia del corte respecto a la LPFG. Estas configuraciones permiten

observar cómo afectan estos factores a la respuesta espectral frente a la exposición a concentraciones crecientes de acetona en el entorno del sensor. En la Fig. 30 b) y d) se observan múltiples picos de atenuación (perturbaciones) debido a la interferencia de los haces con diferentes longitudes de camino óptico, sin embargo, en la Fig. 30 a) que corresponde al sensor 1 no se perciben estos picos de atenuación. Se observan también picos de atenuación con variaciones de amplitud y desplazamiento de longitud de onda, debido a los cambios en el índice de refracción obtenidos cuando la película de PDMS absorbe las moléculas de gas de acetona.

1. Sensor 1 (Fig. 30 a)): Este sensor utiliza nanopartículas de oro, con un período de $515 \mu\text{m}$ y una distancia de corte de 5 cm . Aunque en el espectro de reflexión del Sensor 1 (Fig. 29 a)) no se observan picos de acoplamiento, lo que inicialmente podría interpretarse como la ausencia de una LPFG, los resultados obtenidos en el espectro de transmisión (Fig. 30 a)) confirman que la LPFG está presente. Esto se evidencia por las variaciones en la amplitud y los desplazamientos en la longitud de onda que ocurren al exponer el sensor a acetona. Estas características son indicativas de la interferencia modal generada por la LPFG, la película reflejante (nanopartículas de oro) y la interacción de las moléculas de acetona con la película sensible de PDMS. Su espectro de reflexión (Fig. 29 a)) muestra un único pico central con $\lambda = 1477.8 \text{ nm}$ con amplitud $A = 0.308 \times 10^{-5}$. Aunque inicialmente no se observan picos de acoplamiento que indiquen la presencia de una LPFG, en el espectro de transmisión (Fig. 30 a)) se confirma su existencia. Este último presenta un desplazamiento del pico central hacia $\lambda = 1475.2 \text{ nm}$ y un aumento en la amplitud a 1.46×10^{-5} . Estas diferencias se deben principalmente a la interacción del sistema completo con las moléculas de acetona. Este cambio en las condiciones ópticas resalta la funcionalidad del sensor, incluso con una grabación inicial limitada de la rejilla.

2. Sensor 2 (Fig. 30 b)): Este sensor también utiliza nanopartículas de oro, pero con un período de $530 \mu\text{m}$ y una distancia de corte de 3 cm . Su espectro de reflexión (Fig. 29 b)) muestra cuatro picos principales, el primero en $\lambda = 1457.6 \text{ nm}$ con $A = 0.205 \times 10^{-5}$, el segundo en $\lambda = 1462.4 \text{ nm}$ con $A = 0.307 \times 10^{-5}$, el tercero en $\lambda = 1473.4 \text{ nm}$ con $A = 0.37 \times 10^{-5}$ y el cuarto en $\lambda = 1483 \text{ nm}$ con $A = 0.42 \times 10^{-5}$. Al observar su espectro de transmisión (Fig. 30 b)), podemos notar que el primer pico se atenúa por completo y se observan tres picos principales desplazados hacia $\lambda = 1454.4 \text{ nm}$ con $A = 0.057 \times 10^{-5}$, $\lambda = 1461 \text{ nm}$ con $A = 0.023 \times 10^{-5}$ y $\lambda = 1479.4 \text{ nm}$ con $A = 0.118 \times 10^{-5}$. Aunque las variaciones de amplitud en este espectro no son muy evidentes, la gráfica con zoom del primer pico en el espectro de transmisión confirma que, sí se generan cambios en dicha amplitud, lo que refleja la interacción del sistema con acetona. Las diferencias de amplitud y desplazamientos en longitud de onda entre los espectros de reflexión y transmisión pueden atribuirse a la redistribución de energía entre los modos de propagación en la LPFG, causada por el PDMS y las películas reflejantes, en este caso de nanopartículas de oro, así como a las condiciones de acoplamiento modal.

3. Sensor 3 (Fig. 30 c)): En esta configuración, se emplea una película reflejante de AgNO_3 en lugar de nanopartículas de oro, con un período de $530 \mu\text{m}$ y una distancia de corte de 4 cm . Su espectro de reflexión (Fig. 29 c)) muestra tres picos principales en $\lambda = 1468 \text{ nm}$ con $A = 3.69 \times 10^{-5}$, $\lambda = 1474 \text{ nm}$ con $A = 4.53 \times 10^{-5}$ y $\lambda = 1481.6 \text{ nm}$ con $A = 4.113 \times 10^{-5}$. En el espectro de transmisión (Fig. 30 c)), se mantienen también tres picos principales, aunque desplazados en $\lambda = 1468.2 \text{ nm}$ con $A = 36.2 \times 10^{-5}$, $\lambda = 1475.2 \text{ nm}$ con $A = 47.91 \times 10^{-5}$ y $\lambda = 1484.2 \text{ nm}$ con $A = 38.78 \times 10^{-5}$. Además del desplazamiento, las amplitudes aumentan de forma significativa. Estos cambios son consecuencia de las modificaciones en el índice de refracción causadas por el PDMS y el acoplamiento modal inducido por las moléculas de acetona, que alteran la distribución de energía entre los modos de propagación. La película de PDMS interactúa con el gas de acetona, generando variaciones de amplitud y desplazamientos en los picos debido al cambio en el índice de refracción.

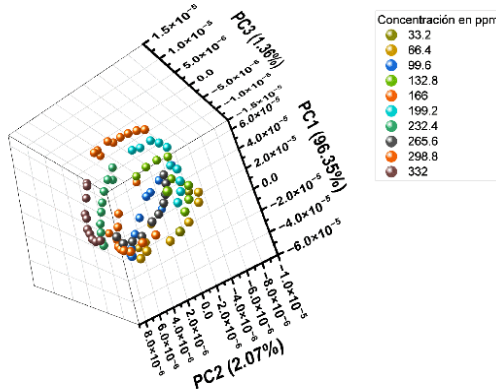
4. Sensor 4 (Fig. 30 d)): En este sensor, no se utiliza película reflectante en la punta de la fibra, tiene un período de $530 \mu\text{m}$ y una distancia de corte de 5 cm . Presenta un espectro de reflexión con cuatro picos principales (Fig. 29 d)) localizados en $\lambda = 1458.4 \text{ nm}$ con $A = 1.95 \times 10^{-5}$, $\lambda = 1468.4 \text{ nm}$ con $A = 2.81 \times 10^{-5}$, $\lambda = 1479.2 \text{ nm}$ con $A = 4.45 \times 10^{-5}$ y $\lambda = 1489.2 \text{ nm}$ con $A = 4.17 \times 10^{-5}$. En la etapa de transmisión (Fig. 30 d)), también se observan cuatro picos principales, aunque desplazados en $\lambda = 1457.4 \text{ nm}$ con $A = 2.29 \times 10^{-5}$, $\lambda = 1467 \text{ nm}$ con $A = 2.99 \times 10^{-5}$, $\lambda = 1477.4 \text{ nm}$ con $A = 4.71 \times 10^{-5}$ y $\lambda = 1484.6 \text{ nm}$ con $A = 4.93 \times 10^{-5}$. Aunque las variaciones en amplitud no son tan evidentes como en el Sensor 3, las gráficas con zoom confirman cambios significativos. Estas variaciones entre los espectros de reflexión y transmisión también se deben a la interacción modal en la LPFG, el efecto del PDMS y las películas reflejantes, que alteran los mecanismos de acoplamiento.

En resumen, los sensores 2, 3 y 4 muestran patrones de interferencia evidentes que pueden ser utilizados para detectar variaciones en la concentración de acetona, mientras que el sensor 1 presenta un espectro de transmisión menos complejo y sin picos de interferencia significativos. Este análisis demuestra cómo el diseño de la LPFG y la elección del recubrimiento influyen la sensibilidad y el comportamiento espectral de los sensores.

Utilizando estos espectros, se realizó PCA que permite utilizar el rango espectral completo para cada sensor.

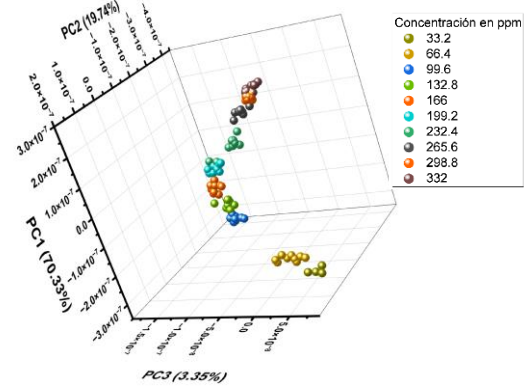
Al aplicar PCA estos fueron los resultados de la distribución de concentraciones en las primeras tres componentes principales. Realizamos una medición cada minuto durante un período de 10 minutos de cada concentración de acetona, empezando en 0 partes por millón (ppm) hasta 332 ppm en pasos de 33.2 ppm.

Sensor 1
Distribución de Concentraciones en las Primeras Tres PCs



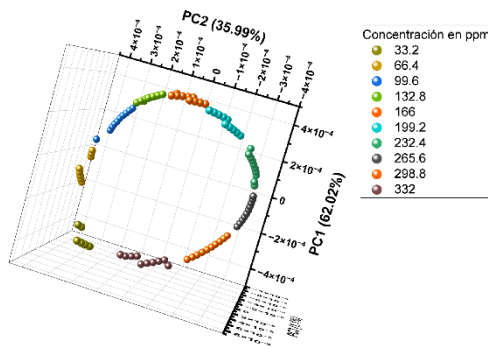
a)

Sensor 2
Distribución de Concentraciones en las Primeras Tres PCs



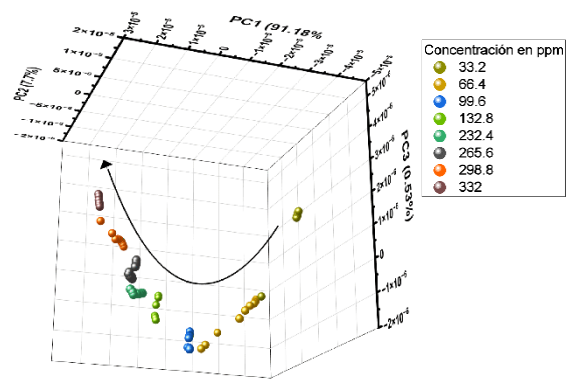
b)

Sensor 3
Distribución de Concentraciones en las Primeras Tres PCs



c)

Sensor 4
Distribución de Concentraciones en las Primeras Tres PCs



d)

Fig. 31: Análisis PCA de los espectros en las tres primeras PCs para el sensor con a) nanopartículas de oro, periodo de 515 μm y distancia del corte de 5 cm, b) nanopartículas de oro, periodo de 530 μm y distancia del corte de 3 cm, c) película reflejante de AgNO_3 , periodo de 530 μm y distancia del corte de 4 cm, d) periodo de 530 μm , distancia del corte de 5 cm y sin película reflejante.

La Fig. 31 muestra el análisis de PCA de cada espectro en las primeras tres PCs (PC1, PC2 y PC3). Se observa una agrupación de puntos de diferentes colores en un espacio tridimensional, donde cada color representa una concentración específica de acetona, así como la cantidad de información contenida en cada PC.

1. Sensor 1:

En la Fig. 31 a), se muestra la distribución de las concentraciones de acetona en las primeras tres componentes principales para el sensor 1. La separación entre los colores indica cómo el sensor distingue las distintas concentraciones, aunque hay cierta superposición en las concentraciones más cercanas. Las concentraciones bajas y altas tienden a agruparse de forma más clara en diferentes zonas del espacio tridimensional, ya que, a pesar de que el espectro de este sensor no muestra interferencia, se observa que en PCA la distribución de las concentraciones sigue una tendencia en forma de espiral, lo que indica que el sensor puede diferenciar entre bajas y altas concentraciones pasando de valores negativos a positivos respectivamente de acuerdo con el plano PC3.

2. Sensor 2:

Al observar la Fig. 31 b), vemos que los puntos se agrupan por colores en diferentes áreas del espacio tridimensional, formando una dispersión parabólica. Esto indica que el sensor asociado con esta gráfica tiene buena capacidad para distinguir entre diferentes concentraciones de acetona. Este agrupamiento es positivo, ya que significa que el sensor mantiene cierta separación entre las concentraciones, aunque no sea tan evidente como en las gráficas a y c. La tendencia en forma parabólica permite la separación entre grupos, donde las concentraciones más bajas se encuentran en el eje negativo y las concentraciones altas en el eje positivo del plano PC1, lo cual es un buen indicador de su desempeño en la detección de acetona.

3. Sensor 3:

En este caso (Fig. 31 c)), se observa una distribución circular en el espacio tridimensional de las primeras tres componentes principales. Esta configuración indica que el sensor tiene una respuesta cíclica o periódica en función de la concentración de acetona. Los puntos de diferentes colores están distribuidos a lo largo de este círculo, lo que indica que las concentraciones son distinguibles. Esta respuesta es interesante, ya que muestra una relación compleja entre las componentes principales y las concentraciones de acetona.

4. Sensor 4:

En la gráfica de la Fig. 31 d), la distribución de las concentraciones en las primeras tres PCs muestra un comportamiento curvado, los puntos siguen una trayectoria en forma de parábola. La dirección de la flecha en la gráfica indica que las concentraciones bajas se localizan en el eje negativo del plano PC1 y a medida que la concentración de acetona aumenta, los puntos se desplazan hacia la dirección del eje positivo de PC1, esto puede estar relacionado con la manera en que el sensor responde a diferentes concentraciones, ya que parece ser que su respuesta no es perfectamente proporcional, es decir que, a ciertas concentraciones, el índice de refracción del PDMS cambia de manera no lineal, afectando la señal óptica de una forma más compleja.

En resumen, en la Fig. 31 b), c) y d), que corresponden a los sensores 2,3 y 4 respectivamente muestran una mejor diferenciación de concentraciones. La Fig. 31 a)

muestra que el sensor 1 tiene limitaciones para distinguir entre diferentes concentraciones, ya que los puntos de las bajas concentraciones tienden a dispersarse en el plano formado por PC1 y PC2, lo cual limita su capacidad para identificar cambios de concentración de manera clara, esto puede deberse a las condiciones de la LPFG. En el sensor 3, aunque las concentraciones están dispuestas en forma de círculo, la separación indica una relación cíclica. En general, estas gráficas de PCA ayudan a evaluar qué sensores tienen una mejor capacidad de discriminación para diferentes concentraciones de acetona, lo cual es crucial para seleccionar el sensor adecuado según las necesidades de precisión en la detección.

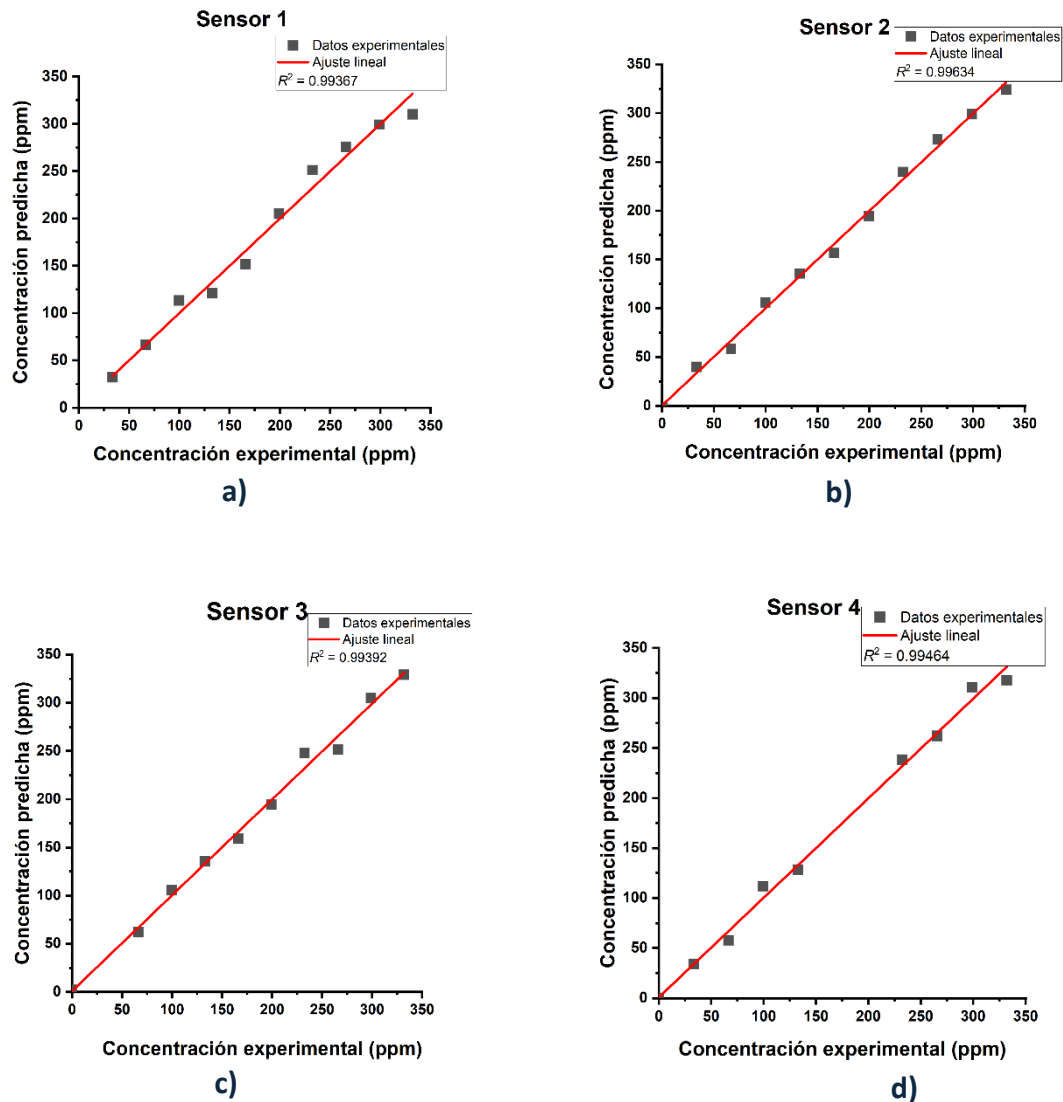


Fig. 32: PLS-R de los datos experimentales (ppm) utilizando 4 LS para el sensor con a) nanopartículas de oro, periodo de 515 μm y distancia del corte de 5 cm, b) nanopartículas de oro, periodo de 530 μm y distancia del corte de 3 cm, c) película reflejante de AgNO_3 , periodo de 530 μm y distancia del corte de 4 cm, d) periodo de 530 μm , distancia del corte de 5 cm y sin película reflejante.

Las gráficas de la Fig. 32 buscan la relación entre las concentraciones experimentales (en el eje x) y predichas (en el eje y) en ppm para los sensores 1, 2, 3 y 4, a través de un ajuste lineal. Aunque todas muestran una alineación cercana a la recta de ajuste, existen diferencias sutiles en la dispersión de los puntos, lo que revela variaciones en la precisión de cada sensor:

1. Sensor 1 (Fig. 32 a)): Este es el sensor con la mayor dispersión de puntos alrededor de la línea de ajuste lineal. Aunque la relación lineal es evidente, los puntos se desvían ligeramente más en comparación con los demás sensores. Este comportamiento sugiere que el sensor 1 tiene una menor precisión relativa y un error de predicción algo mayor, lo que podría estar relacionado con un *LOD* más alto.

2. Sensor 2 (Fig. 32 b)): Este es el sensor con el mejor desempeño. Los puntos experimentales están prácticamente sobre la línea de ajuste lineal. Esto sugiere que el sensor 2 tiene la mayor precisión, y los valores predichos son casi idénticos a los valores experimentales.

3. Sensor 3 (Fig. 32 c)): Este sensor muestra una alineación más cercana a la línea de ajuste que los sensores 1 y 4. Esto indica un mejor desempeño en términos de precisión, con una menor dispersión de los datos experimentales.

4. Sensor 4 (Fig. 32 d)): Los datos experimentales también muestran una ligera dispersión, aunque menor que en el sensor 1. Esto indica que el sensor 4 tiene una mejor evaluación entre las concentraciones predichas y experimentales, pero no tan precisa como el sensor 3 o el sensor 2.

Un sensor con un ajuste lineal más preciso y puntos cercanos a la recta es más confiable para detectar concentraciones muy bajas. Esto queda respaldado por el coeficiente de correlación, una herramienta estadística que permite cuantificar esta relación lineal, representado como R^2 , este coeficiente mide qué tan bien una variable depende linealmente de otra, oscilando entre 0 y 1, si $R^2 = 1$ tendríamos una correlación perfecta, donde todos los puntos caen exactamente sobre la línea de ajuste. Sin embargo, no podemos esperar este resultado ya que estaríamos ante un caso ideal, por lo que si $R^2 \rightarrow 1$ tenemos dos casos, cuando $R \rightarrow 1$ hay una correlación lineal positiva, esto significa que, al aumentar una variable, la otra también aumenta proporcionalmente. Cuando $R \rightarrow -1$ hay una correlación lineal negativa. Esto significa que, al aumentar una variable, la otra disminuye proporcionalmente, y todos los puntos tienden a ajustarse a una línea recta con pendiente negativa. Y finalmente, si $R^2 \rightarrow 0$ no existe una correlación lineal fuerte entre las variables. Los coeficientes de correlación para cada sensor se muestran en la siguiente tabla (ver Tabla 1).

Tabla 1: Coeficiente de correlación de cada sensor.

Número de sensor	R^2
Sensor 1	0.99367
Sensor 2	0.99634
Sensor 3	0.99392
Sensor 4	0.99464

En estas gráficas, los sensores muestran un ajuste lineal muy cercano al ideal, lo que implica un R^2 cercano a 1. Esto significa que la predicción de concentraciones es extremadamente confiable, los sensores tienen alta precisión para detectar variaciones en la concentración y la respuesta del sensor sigue una relación directamente proporcional, lo que es un resultado deseado. En conclusión, las gráficas y el alto coeficiente de correlación reflejan un diseño eficiente y una buena capacidad de los sensores para distinguir concentraciones de acetona con precisión. Esto fortalece su potencial para aplicaciones en detección de compuestos orgánicos volátiles.

Se realizó PLSR para determinar el límite de detección (LOD) de todos los sensores. El LOD indica el menor valor de concentración de acetona que el sensor puede detectar por encima del ruido del sistema y con una probabilidad de falso positivo relativamente baja; se estima utilizando el error cuadrático medio de la regresión (ECM), que mide la desviación estándar de las predicciones del modelo.

$$LOD = \sqrt{ECM} \quad (76)$$

A simple vista podemos notar que el sensor 2 tiene el menor LOD , ya que los puntos que corresponden a los datos experimentales tienden a caer sobre la recta de ajuste lineal sin tener una separación altamente notable como en los demás sensores. Los resultados obtenidos arrojan que el LOD para el sensor 2 es de 2.162 ppm, y con este resultado, dicho LOD se encuentra en el intervalo de los niveles de acetona medidos en el aliento de personas que padecen diabetes mellitus, que ronda los 1.8 ppm a 5 ppm. El LOD para cada sensor se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: LOD para cada sensor.

Número de sensor	LOD (ppm)
Sensor 1	3.586
Sensor 2	2.162
Sensor 3	3.124
Sensor 4	2.213

En la Fig. 32 se muestran las curvas obtenidas mediante PLSR para cada sensor, utilizando 4 estructuras latentes (LS) para evitar caer en sobreajuste. El ajuste lineal no es estrictamente la curva de respuesta del sensor, aunque esté relacionado. El ajuste lineal presentado aquí es una representación matemática (una línea ideal de 45°) que describe cómo deben comportarse los datos experimentales si la predicción del sensor fuera perfecta.

Una vez que se han obtenido las estructuras latentes (LS) a partir de la matriz de variables de entrada X , se pueden utilizar estas estructuras para predecir el valor de la variable de salida y . Aquí, la predicción de y se hace utilizando una combinación lineal de estas estructuras latentes.

La ecuación de predicción es:

$$y = w_1LS_1 + w_2LS_2 + w_3LS_3 + w_4LS_4 + w_0 \quad (77)$$

donde:

- w_0 es el término independiente del modelo, que representa el valor promedio de y cuando todas las estructuras latentes son cero.
- LS_1, LS_2, LS_3 y LS_4 son las primeras cuatro estructuras latentes extraídas de X en el modelo PLSR, las cuales representan la información más relevante de X en términos de su relación con y .
- w_1, w_2, w_3 y w_4 son los pesos asociados a cada estructura latente LS_i . Estos pesos indican el nivel de influencia o aportación de cada LS a la predicción de y .

En otras palabras, cada LS contribuye proporcionalmente al valor de y según el peso w_i . Estos pesos son determinados durante el proceso de regresión PLSR para que el modelo ajuste lo mejor posible las observaciones de y en función de las estructuras latentes. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Ecuación de predicción de cada sensor.

Número de sensor	Ecuación de predicción
Sensor 1	$y = 6.2 \times 10^5 LS1 + 6.5 \times 10^5 LS2 + 6.8 \times 10^5 LS3 + 7 \times 10^5 LS4 + 182.6$
Sensor 2	$y = -3.9 \times 10^6 LS1 - 8.8 \times 10^6 LS2 - 1.1 \times 10^7 LS3 - 1.5 \times 10^7 LS4 + 166$
Sensor 3	$y = -1 \times 10^3 LS1 - 1 \times 10^3 LS2 - 1 \times 10^3 LS3 - 1 \times 10^3 LS4 + 179.28$
Sensor 4	$y = -1.2 \times 10^4 LS1 - 1.1 \times 10^4 LS2 - 2.1 \times 10^4 LS3 - 2.3 \times 10^4 LS4 + 162.3111$

Capítulo 8

Conclusiones

En esta tesis se desarrolló un interferómetro de Michelson (MI) en fibra óptica estándar para la detección de acetona, logrando cumplir con todos los objetivos planteados. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad y eficiencia del sensor propuesto, sentando las bases para su aplicación en la monitorización de biomarcadores como la acetona, un indicador clave para el diagnóstico y control de enfermedades metabólicas como la diabetes mellitus.

1. Se estudiaron dos tipos de películas reflejantes: nanopartículas de oro esféricas de 25 nm y una película a base de nitrato de plata (AgNO_3). Los resultados mostraron que las nanopartículas de oro proporcionaron un mejor desempeño en términos de sensibilidad y límite de detección, alcanzando un límite mínimo de 2.162 ppm para el sensor con rejilla de período largo (RPL) de 530 nm. Este hallazgo subraya la importancia de seleccionar materiales adecuados para maximizar la sensibilidad del sensor.
2. Se logró optimizar el espectro interferométrico mediante la variación de las longitudes de camino óptico y el periodo de la RPL. Se evaluaron periodos de 515 y 530 nm, así como distancias de 3, 4 y 5 cm entre la RPL y el corte final de la fibra. Los resultados indicaron que un periodo de 530 nm combinado con una distancia de 4 cm ofreció el mejor contraste interferométrico, destacando la importancia de estos parámetros en el diseño del sensor.
3. Se implementaron técnicas de análisis multivariable, como el análisis de componentes principales (PCA) y la regresión por proyección de estructuras latentes (PLSR), para analizar la respuesta de los sensores. Estas herramientas permitieron interpretar y validar los datos experimentales, demostrando que el sensor desarrollado puede distinguir con precisión concentraciones de acetona en un rango de bajas ppm. Esto establece un marco robusto para el análisis de datos en sensores ópticos.
4. El desarrollo de este sensor mejoró el límite de detección en 3 órdenes de magnitud con respecto al LOD de uno de los trabajos previos con configuración similar, lo que representa una mejora significativa hacia la creación de sensores con menores LOD y un avance hacia la implementación de métodos ópticos no invasivos para la monitorización de biomarcadores metabólicos. Su eficiencia y sensibilidad lo posicionan como una herramienta potencialmente útil en el campo biomédico, con aplicaciones específicas en el control de la diabetes.

Referencias

- [1] T. Zanin. Febrero de 2024. Cetosis: Síntomas, qué es y efectos en el organismo. Tu salud. Recuperado de: <https://www.tuasaude.com/es/cetosis/>. Fecha de consulta: 26 de enero de 2025.
- [2] Cleveland clinic. 15 de agosto de 2022. Cetosis. Recuperado de: <https://my.clevelandclinic.org/health/articles/24003-ketosis>. Fecha de consulta: 26 de enero de 2025.
- [3] T. Martínez Ramonde. 15 de Junio de 2022. Monitorización de los cuerpos cetónicos. Sociedad Española de diabetes. Recuperado de <https://www.revistadiabetes.org/psicologia/monitorizacion-de-los-cuerpos-cetonicos-algo-ha-cambiado/>. Fecha de consulta: 26 de enero de 2025.
- [4] S. Belda Hofheinz, P. del Villar Guerra, A. Palacios Cuesta. Cetoacidosis diabética. *Anales de Pediatría Continuada*, 12, 2014, 55-61. [https://doi.org/10.1016/S1696-2818\(14\)70169-6](https://doi.org/10.1016/S1696-2818(14)70169-6).
- [5] K. Hueso Domínguez. Determinaciones cinéticas de acetona, 3-hidroxiacetato/3-hidroxiacetato y glicerol en sistemas de flujo. Universidad de Salamanca : Facultad de Ciencias Químicas, 2010. Recuperado de: https://gredos.usal.es/bitstream/10366/76462/1/DQANB_Hueso_Dominguez_KB_Determinaciones_cineticas.pdf.
- [6] R. Grob, E. Barry. *Modern practice of gas chromatography*. John Wiley & Sons. 2004. Recuperado de: <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-584270-6002403ed9.pdf>.
- [7] C. Wang, P. Sahay. Breath analysis using laser spectroscopic techniques: breath biomarkers, spectral fingerprints, and detection limits. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 9(10), 2009, 8230–8262. <https://doi.org/10.3390/s91008230>.
- [8] G. Eranna, B. C. Joshi, D. P. Runthala, R. P. Gupta. Oxide materials for development of integrated gas sensors: A comprehensive review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 29, 2004, 111-188. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:93923409>.
- [9] Y. Liu, Y. Zuo, J. Wang, Y. Liang, H. Wu, Y. Chen. A ratiometric solid AIE sensor for detection of acetone vapor. *Talanta*, 236, 2022, 122845. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122845>.
- [10] E. Udd, W. B. Spillman. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists (Second Edition)*. John Wiley & Sons. 2011. ISBN: 9780470126844. <https://doi.org/10.1002/9781118014103>.
- [11] K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt. *Optical Fiber Sensor Technology*. Chapman & Hall, 1995.

- [12] N. Martell, G. E. Sandoval-Romero, R. G. Ramírez-Chavarría. Sensor de desplazamiento nanométrico en fibra óptica con base en un interferómetro Michelson. SOMI Congress 29th edition. 2014.
- [13] M. Bass, E. Van Stryland. Manual de fibra óptica: dispositivos y sistemas para comunicaciones ópticas . McGraw-Hill, 2002.
- [14] E. Hecht, A. Zajac. Óptica (4ta ed.). Pearson Educación, 2003. ISBN: 9780133977226.
- [15] G. Keiser. Optical Fiber Communications (3ra ed.). McGraw-Hill, 1999. ISBN: 978-0072360769.
- [16] J. M. Calderón Ambriz. Sensor de temperatura basado en un interferómetro intermodal tipo Michelson con fibra óptica monomodo. Universidad de Guanajuato. Enero 2019. Recuperado de: <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/1463>.
- [17] A.K. Pathak, C. Viphavakit. A review on all-optical fiber-based VOC sensors: Heading towards the development of promising technology. Sensors and Actuators A: Physical. 338. 2022. 113455. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113455>.
- [18] L. A. García de la Rosa. Rejillas de Periodo Largo en fibra óptica: Fabricación y caracterización. Tesis de Doctorado en Ciencias (Óptica). Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. León, Guanajuato. 152 pp. 2011. Recuperado de: <http://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/637>
- [19] S. J. Ortega Zafra. Modelo de rejillas de periodo largo en fibra óptica fabricadas con diferentes tecnologías. Universidad Nacional Autónoma De México. México, D.F., Diciembre del 2011. Recuperado de: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/2593>.
- [20] K. Salas Alcántara. Interferómetro Mach Zehnder en fibra óptica utilizando rejillas de periodo largo. Tesis de Maestría en Ciencias (Óptica). Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. León, Guanajuato. 115 pp. 2010. Recuperado de: <http://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/319>.
- [21] B. H. Lee, Y. H. Kim, K. S. Park, J. Eom, M. J. Kim, B. Rho, H. Choi. Interferometric fiber optic sensors. Sensors (Basel, Switzerland). 12. 2012. 2467-2486. <https://doi.org/10.3390/s120302467>.
- [22] A. Brakel, P. Swart. Temperature-compensated optical fiber Michelson refractometer. Optical Engineering - OPT ENG. 44. 2005. <https://doi.org/10.1117/1.1850746>.
- [23] J. L. Rodríguez-Garciapiña, G. Beltrán-Pérez, J. Castillo-Mixcóatl, S. Muñoz-Aguirre. Application of the principal components analysis technique to optical fiber sensors for acetone detection. Optics & Laser Technology. 143. 2021. 107314. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107314>.

- [24] J. Meneses-Mijares, J. Castillo-Mixcóatl, S. Muñoz-Aguirre, G. Beltrán-Pérez. Application of principal component regression in Mach–Zehnder interferometer optical fiber sensors in reflection mode for acetone detection as biomarker of diabetes mellitus. *Optics & Laser Technology*. 177. 2024. 111196. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111196>.

