

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

POSGRADO EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL



DESARROLLO DE UN SENSOR DE METANO
BASADO EN INTERFEROMETRÍA MACH-ZEHNDER
CON FIBRA ÓPTICA

POR

LEONARDO JAHIR ARÉVALO BAUTISTA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL

MAYO 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

POSGRADO EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL



DESARROLLO DE UN SENSOR DE METANO
BASADO EN INTERFEROMETRÍA MACH-ZEHNDER
CON FIBRA ÓPTICA

POR

LEONARDO JAHIR ARÉVALO BAUTISTA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL

MAYO 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS
POSGRADO EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Desarrollo de un sensor de metano basado en interferometría Mach-Zehnder con fibra óptica», realizada por el alumno Leonardo Jahir Arévalo Bautista, con número de matrícula 1925403, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Física Industrial.

El Comité de Tesis:

Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar
Asesor

Dr. Daniel Toral Acosta
Revisor

Dr. Guillermo Salceda Delgado
Revisor

Dra. Eloisa Gallegos Arellano
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Álvaro Eduardo Cordero Franco
Subdirector de Estudios de Posgrado

A mi familia, especialmente a mis padres, Ana Laura Bautista Pecina y Rubén Arévalo Escobedo, por ser el pilar fundamental en mi vida y por acompañarme en cada etapa de mi camino.

A mi novia y a mis hermanos, por su amor, compañía y apoyo durante este proceso.

A mi asesor de tesis, Romeo de Jesús Selvas Aguilar, por formar parte importante de mi etapa académica y personal.

A mis compañeros del programa académico y del laboratorio, doctores y estudiantes, por haber compartido conmigo esta etapa de posgrado. A quienes siguen presentes y a quienes han tomado nuevos caminos, les dedico también este logro, por hacer de este proceso una experiencia más llevadera, enriquecedora y llena de buenos momentos.

Dedico este trabajo a todos ellos, con la satisfacción de haber alcanzado una meta importante y con la convicción de que, con constancia, y esfuerzo, los objetivos pueden convertirse en realidad.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XVI
Abreviaturas	XVII
Resumen	XVIII
Abstract	XIX
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes	3
1.2.1. Sensores de metano	4
1.2.2. La fibra óptica como sensor	7
1.2.3. Tipos de sensores en fibra óptica	10
1.2.4. Sensores de fibra óptica integrados en cámaras de gas	18
1.3. Justificación o motivación	22
1.4. Hipótesis	23
1.5. Objetivo general	24
1.6. Objetivos específicos	24
2. Marco Teórico	26

2.1. Fundamentos físicos de la fibra óptica	26
2.1.1. Estructura básica de una fibra óptica	26
2.1.2. Reflexión interna total	27
2.1.3. Apertura numérica y ángulo de aceptación	29
2.1.4. Tipos de fibra: monomodo y multimodo	29
2.1.5. Propagación modal e índice efectivo	31
2.1.6. Atenuación	32
2.1.7. Dispersión	32
2.2. Interferometría Mach-Zehnder en fibra óptica con configuración en cascada	33
2.2.1. Principio de interferencia óptica	34
2.2.2. Interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica	34
2.2.3. Interferometría en cascada	35
2.2.4. Interferómetro Mach-Zehnder en cascada con desplazamiento de núcleo	36
2.2.5. Rango espectral libre y sensibilidad	37
2.3. Espectroscopía de absorción molecular en el infrarrojo	38
2.3.1. Modos vibracionales del metano	39
2.3.2. Bandas de absorción del metano	40
2.3.3. Relación entre número de onda y longitud de onda	42
2.3.4. Transiciones vibracionales y rotacionales	42
2.3.5. Ley de Beer–Lambert	44
2.3.6. Relación con el sensor interferométrico MZI	45
3. Marco Metodológico	47
3.1. Simulación numérica del interferómetro Mach-Zehnder en COMSOL .	47

3.1.1. Modelo geométrico	47
3.1.2. Importación de la geometría en COMSOL	48
3.1.3. Definición de materiales	49
3.1.4. Modelo físico implementado	50
3.1.5. Condiciones de excitación	50
3.1.6. Condiciones de frontera	51
3.1.7. Mallado del dominio computacional	51
3.1.8. Configuración del estudio numérico	52
3.1.9. Obtención del espectro de transmisión	53
3.2. Infraestructura experimental	54
3.2.1. Fuente de radiación infrarroja (diodo láser DFB1653P	54
3.2.2. Diseño y construcción de la cavidad de metano	63
3.2.3. Elaboración del interferómetro Mach-Zehnder (MZI)	73
3.2.4. Integración del sensor	78
3.3. Procedimiento experimental	78
3.3.1. Verificación previa de hermeticidad de la cavidad	79
3.3.2. Colocación del MZI dentro de la cavidad	80
3.3.3. Conexión y encendido del láser DFB1653P	80
3.3.4. Integración óptica entre el láser, el MZI y el OSA	81
3.3.5. Medición del espectro de referencia con aire	82
3.3.6. Liberación del aire de referencia	82
3.3.7. Conexión de los tanques a la cavidad	83
3.3.8. Mediciones de los espectros con metano al 1 %, 2.2 % y 2.5 % .	84
3.3.9. Purga de la cavidad después de cada medición	84
3.3.10. Condiciones de medición	85

4. Análisis y resultados	86
4.1. Resultados de la simulación numérica del interferómetro Mach-Zehnder	86
4.1.1. Distribución del campo eléctrico	86
4.1.2. Espectro de transmisión simulado	87
4.1.3. Postprocesamiento del espectro simulado	88
4.1.4. Comparación entre simulación y experimento	89
4.2. Caracterización del interferómetro Mach-Zehnder (MZI)	90
4.2.1. Influencia de la longitud de fibra LF54-02	90
4.2.2. Influencia de la longitud del core-offset	91
4.2.3. Análisis FFT del espectro del MZI	91
4.3. Hermeticidad de la cavidad de metano	93
4.3.1. Ensayo sin fibra óptica	93
4.3.2. Ensayo con fibra óptica	94
4.4. Respuesta experimental del sensor MZI ante diferentes concentraciones de metano	95
4.4.1. Espectros de transmisión para diferentes concentraciones de metano	95
4.4.2. Cálculo de la atenuación promedio	97
4.4.3. Sensibilidad del sensor	97
4.4.4. Repetitividad de las mediciones	99
4.4.5. Parámetros finales del sensor	99
4.4.6. Conversión de la resolución experimental a ppm	101
5. Conclusiones	103
5.1. Conclusiones generales	103
5.2. Cumplimiento de los objetivos	105

5.3. Limitaciones del trabajo	106
5.4. Trabajo futuro	106

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. a) Emisiones de metano por sector (2010 y 1990-2010). La parte a) muestra la contribución de cada sector en 2010, y la parte b) las tendencias de emisión a lo largo de dos décadas [1].	2
1.2. Dispositivo de reanimación para canarios utilizado en minas de carbón durante el siglo XIX. Estos dispositivos permitían revivir a las aves expuestas a gases tóxicos como el monóxido de carbono, sirviendo como una medida de seguridad para los mineros [4].	4
1.3. Prototipo original de la lámpara de seguridad de Davy, diseñada en 1815 para prevenir explosiones en minas de carbón mediante una malla metálica que impedía la ignición de gases inflamables [6].	5
1.4. Sensor catalítico de gas usado para la detección de metano en entornos industriales. Este dispositivo representa uno de los primeros esfuerzos en mejorar la seguridad mediante la detección temprana de gases combustibles [8].	6
1.5. a) Esquema de un sensor catalítico [11]; b) esquema de un sensor infrarrojo [12]; c) esquema de un sensor de gas electro-químico típico [11]; d) esquema de un sensor semiconductor típico de gas [11].	7
1.6. Fabricación de una rejilla en fibra óptica mediante la exposición a un patrón de interferencia generado por radiación láser UV que atraviesa una máscara de fase. Este patrón induce una modulación del índice de refracción en el núcleo de la fibra [31].	11
1.7. Esquema de un interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica [31]. . .	12
1.8. Arreglo experimental usado para un interferómetro Fabry-Perot de fibra óptica [47].	13

1.9. Esquema de un sensor de fibra óptica con estructura adelgazada, basado en una fibra multimodo empalmada entre dos fibras monomodo. La región adelgazada tiene una longitud de 50 mm y un diámetro de 105/125 μm , mientras que las fibras SMF tienen un diámetro de 8.3/125 μm [52].	15
1.10. Imagen de microscopía electrónica de barrido que muestra la sección transversal de una fibra óptica de cristal fotónico. Se observa la estructura de microagujeros que rodea el núcleo y permite la guía de luz mediante banda prohibida fotónica o índice efectivo [56].	16
1.11. Diagrama esquemático de un MZI basado en desplazamiento de núcleo tras un recubrimiento externo con aluminio. El recubrimiento permite la interacción de la luz evanescente con el entorno, modificando la interferencia en la salida del sensor [80].	17
1.12. Vista lateral en sección transversal de un sensor de fibra óptica con revestimiento aplicado sobre: a) revestimiento sin grabar, b) revestimiento grabado y c) punta de fibra [82].	18
1.13. Diferentes sistemas experimentales usados para hacer mediciones de presión de gas [85].	19
1.14. Configuración experimental para mediciones de presión de gas [86].	20
1.15. Diagrama esquemático del sensor y del mecanismo de detección de gas [87].	21
2.1. Estructura típica de una fibra óptica. Se muestran sus componentes principales y sus respectivos diámetros: núcleo (<i>core</i>) de 8 μm , revestimiento (<i>cladding</i>) de 125 μm , <i>buffer</i> de 250 μm y chaqueta externa (<i>jacket</i>) de 400 μm [32].	27
2.2. Representación de la reflexión interna total en una fibra óptica. La luz se propaga en zigzag dentro del núcleo, confinada por el revestimiento debido a la diferencia de índices de refracción entre ambos medios [31].	28
2.3. Comparación entre fibra óptica multimodo y monomodo. En la fibra multimodo, múltiples modos se propagan simultáneamente, mientras que en la fibra monomodo se propaga principalmente un solo modo, permitiendo mayor alcance y menor dispersión modal [32].	30

2.4.	a) Esquema de un MZI que utiliza dos fibras; b) esquema de un interferómetro Mach-Zehnder en línea que utiliza una sola fibra [65]. . .	35
2.5.	Espectro de intensidad espectral del metano (CH_4) en función del número de onda, generado a partir de la base de datos HITRAN. Se observan las principales bandas de absorción asociadas a transiciones roto-vibracionales de la molécula.	41
2.6.	Representación esquemática del momento dipolar molecular. La separación parcial de cargas y su variación durante los movimientos vibracionales o rotacionales permiten la interacción de la molécula con la radiación infrarroja.	44
3.1.	Comparación entre la geometría real y la geometría simplificada del interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica.	48
3.2.	Importación del modelo tridimensional del interferómetro en COMSOL Multiphysics mediante archivo CAD tipo STEP.	49
3.3.	Definición de los puertos de entrada y salida utilizados en el modelo electromagnético del interferómetro.	51
3.4.	Mallado tridimensional del modelo del interferómetro Mach-Zehnder en COMSOL Multiphysics.	52
3.5.	Configuración del barrido paramétrico en longitud de onda utilizado para obtener la respuesta espectral del MZI.	53
3.6.	Diodo láser DFB1653P en encapsulado tipo butterfly de 14 pines, acoplado a fibra óptica monomodo con conector FC/APC.	56
3.7.	Configuración de los controladores del láser para obtener emisión en 1653.836 nm.	57
3.8.	Láser ensamblado en una caja protectora con salida en fibra óptica y conexiones con los controladores.	59
3.9.	Vista superior y diagrama de identificación de pines de un diodo láser tipo butterfly de 14 pines.	59
3.10.	a) Espectro de la emisión láser medido por la OSA; b) Espectro óptico de la emisión láser.	63
3.11.	Diseño 3D de la cavidad, diseñada en SolidWorks.	64

3.12. Modelo tridimensional de la base de la cavidad diseñada en SolidWorks.	65
3.13. Diseño 3D de la base de la cavidad con bases de silicona.	67
3.14. Diseño 3D de la base de la cavidad con dos Fiber holder clamps. . . .	67
3.15. Modelo tridimensional de la base de la cavidad con empaque de silicona colocado sobre la brida de sellado.	69
3.16. Modelo tridimensional de la tapa de la cavidad diseñada en aluminio.	70
3.17. Componentes integrados a la cavidad de metano para monitoreo, control y seguridad del sistema experimental. Se incluyen la llave tipo bola, termómetro digital, manómetro digital, válvula de seguridad y fiber clamps utilizados para fijar la fibra óptica dentro de la cavidad.	71
3.18. Ensamble completo de la cavidad de metano con los componentes externos integrados.	72
3.19. a) pinzas peladoras utilizadas para retirar el recubrimiento de la fibra; b) paños sin pelusa y alcohol isopropílico para la limpieza de la fibra; c) cortadora de fibra óptica para obtener extremos planos y uniformes; d) empalmadora de fibra óptica Fitel S178-A utilizada para realizar los empalmes por fusión.	74
3.20. a) Imagen del rollo de fibra óptica SMF-28e+; b) Imagen de la fibra óptica adelgazada LF54-02.	75
3.21. Esquema de la configuración empleada para el interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica. La estructura se compone de dos segmentos de fibra SMF-28e+ y una sección central de fibra adelgazada LF54-02, con desplazamiento de núcleo en las regiones de empalme.	76
3.22. a) Imagen previa antes del empalme SMF-TF; b) Imagen después del empalme SMF-TF con 30 um de core-offset.	77
3.23. Espectro de transmisión de un interferómetro Mach-Zehnder (MZI) medido en un Analizador de Espectro Óptico (OSA).	78
3.24. Esquema de la configuración empleada para el sensor de metano. . . .	79
3.25. Comparación del espectro de emisión del láser DFB1653P medido directamente y después de propagarse a través del interferómetro Mach-Zehnder.	81

3.26. Imagen de la cavidad y el gas de calibración.	83
3.27. a) Válvula empleada para controlar el suministro de gas; b) cilindros de gas de calibración utilizados durante la caracterización experimental del sensor.	85
4.1. Distribución tridimensional del campo eléctrico $ E $ en el interferómetro Mach-Zehnder obtenida mediante COMSOL Multiphysics.	87
4.2. Resultados de transmisión obtenidos en COMSOL: a) tabla de datos generada durante el barrido espectral; b) espectro de transmisión simulado del interferómetro Mach-Zehnder.	88
4.3. Espectro de transmisión del interferómetro Mach-Zehnder obtenido mediante postprocesamiento en Python a partir de los datos exportados de COMSOL.	89
4.4. Comparación entre el espectro de transmisión del interferómetro Mach-Zehnder obtenido mediante simulación numérica y el espectro medido experimentalmente.	90
4.5. Espectros ópticos para diferentes longitudes de fibra LF54-02 (TF) empalmada entre dos segmentos de fibra SMF-28.	91
4.6. Espectros ópticos para diferentes longitudes de core-offset entre las dos fibras ópticas, SMF-28 y LF54-02.	92
4.7. Caracterización espectral del interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica: a) espectro de transmisión del MZI; b) transformada rápida de Fourier (FFT) del espectro, utilizada para identificar la periodicidad dominante de las franjas.	92
4.8. Datos de la presión de la cavidad vs tiempo sin fibra óptica.	93
4.9. Datos de la presión de la cavidad vs tiempo con fibra óptica.	94
4.10. Primera, segunda, y tercera medición, respectivamente, del espectro de transmisión del sensor MZI para la referencia S/G y para concentraciones de metano de 1 %, 2.2 % y 2.5 % a 15 PSI.	96
4.11. Curvas de sensibilidades obtenidas a partir de la primera, segunda, y tercera medición experimental, respectivamente. La atenuación promedio se gráfica en función de la concentración de metano y se ajusta mediante una regresión lineal.	98

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Comparación entre sensores convencionales y sensores de fibra óptica.	10
1.2. Comparación entre estructuras MZI basadas en empalme core-offset.	14
2.1. Comparación entre interferometría convencional e interferometría en cascada.	36
3.1. Índices de refracción asignados a los dominios del modelo numérico.	49
3.2. Conexiones entre el controlador de corriente y el láser DFB1653P.	60
3.3. Conexiones entre el TED 200 C, DB9, y DFB1653P.	61
4.1. Valores de la atenuación relativa para cada medición realizada.	97
4.2. Parámetros experimentales obtenidos de las mediciones con el sensor.	101

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado mediante la beca de posgrado durante mis estudios de maestría. Este respaldo fue de gran importancia para poder dedicarme al desarrollo de este trabajo.

A mi asesor de tesis, el Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar, le agradezco profundamente por su apoyo, guía, paciencia y confianza durante la realización de este proyecto. Gracias por compartir su conocimiento, por su disposición para orientar cada etapa del trabajo y por el apoyo brindado tanto en lo académico como en lo personal.

Agradezco también a todas las personas que contribuyeron directa o indirectamente a este proyecto, ya sea mediante apoyo técnico, comentarios, sugerencias, enseñanzas o acompañamiento durante el proceso. Cada conversación, consejo y ayuda recibida aportó algo valioso a la construcción de este trabajo.

A mi familia, a mi novia, a mis compañeros y amigos, gracias por estar presentes, por motivarme y por acompañarme durante esta etapa. Su apoyo hizo que este camino fuera más llevadero, más humano y, sin duda, más significativo.

ABREVIATURAS

Palabra	Abreviatura
Metano	CH ₄
Apertura numérica	NA
Inmunidad a interferencias electromagnéticas	EMI
Radiación infrarroja	RFI
Amplificadores de fibra óptica con erbio	EDFA
Relación señal ruido	SNR
Multiplexación por longitud de onda	WDM
Radiación ultra violeta	UV
Sensores de rejilla de Bragg de fibra	FBG
Interferómetro Mach-Zehnder	MZI
Interferómetro de Fabry-Perot	FPI
Sensores de fibra óptica adelgazada	TFS
Fibra multimodo	MMF
Fibra monomodo	SMF
Fibra de cristal fotónico	PCF
Microscopía electrónica de barrido	SEM
Fibras de núcleo hueco basadas en cristal fotónico	HC-PBF
Fibras de núcleo hueco	HC
Rango espectral libre	FSR

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo experimental de un sistema de detección de metano basado en un interferómetro Mach-Zehnder (MZI) en fibra óptica. El sensor fue fabricado mediante una configuración SMF–TF–SMF, empleando fibra monomodo estándar y una sección de fibra adelgazada, con empalmes por desplazamiento de núcleo (*core-offset*).

Como parte del sistema experimental, se diseñó y construyó una cavidad de aluminio destinada a alojar el sensor de fibra óptica y permitir su interacción controlada con mezclas de gas de calibración. La cavidad fue diseñada en SolidWorks y fabricada mediante maquinado. Además, se integró una fuente láser DFB1653P con emisión cercana a 1653 nm, región de interés para la absorción molecular del metano en el infrarrojo cercano.

Se realizó también una simulación numérica del interferómetro en COMSOL Multiphysics utilizando la interfaz *Electromagnetic Waves, Beam Envelopes*. Esta simulación permitió analizar la distribución del campo eléctrico, el acoplamiento modal producido por el desplazamiento de núcleo y la respuesta espectral del MZI. La comparación entre el espectro simulado y el experimental mostró una concordancia cualitativa en la forma general del espectro.

Experimentalmente, el sensor fue evaluado dentro de la cavidad a una presión de trabajo de 15 PSI, utilizando aire como referencia y mezclas de metano con concentraciones de 1 %, 2.2 % y 2.5 %. Para evaluar la repetitividad, se realizaron tres mediciones independientes. En todas ellas se observó una disminución de la potencia transmitida al aumentar la concentración de metano.

A partir de la atenuación promedio obtenida para cada concentración, se calculó la sensibilidad del sensor mediante ajustes lineales. La sensibilidad promedio obtenida fue de 0.0536 dB/ %CH₄, con una desviación estándar de 0.02405 dB/ %CH₄. Asimismo, se estimó un error relativo de 44.86159 % y una resolución experimental de 0.30138 %CH₄. Estos resultados indican que el sensor desarrollado es capaz de detectar variaciones de concentración de metano.

ABSTRACT

This work presents the experimental development of a methane detection system based on an optical fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI). The sensor was fabricated using an SMF-TF-SMF configuration, employing standard single-mode fiber and a section of thinned fiber, with core-offset splices.

As part of the experimental system, an aluminum chamber was designed and built to house the optical fiber sensor and allow its controlled interaction with calibration gas mixtures. The chamber was designed in SolidWorks and manufactured by machining. In addition, a DFB1653P laser source with emission near 1653 nm was integrated, corresponding to a spectral region of interest for methane molecular absorption in the near-infrared.

A numerical simulation of the interferometer was also carried out in COMSOL Multiphysics using the *Electromagnetic Waves, Beam Envelopes* interface. This simulation made it possible to analyze the electric field distribution, the modal coupling produced by the core offset, and the spectral response of the MZI. The comparison between the simulated and experimental spectra showed qualitative agreement in the general shape of the spectrum.

Experimentally, the sensor was evaluated inside the chamber at a working pressure of 15 PSI, using air as a reference and methane mixtures with concentrations of 1 %, 2.2 %, and 2.5 %. To evaluate repeatability, three independent measurements were performed. In all cases, a decrease in transmitted power was observed as the methane concentration increased.

From the average attenuation obtained for each concentration, the sensor sensitivity was calculated through linear fitting. The average sensitivity obtained was 0.0536 dB/ %CH₄, with a standard deviation of 0.02405 dB/ %CH₄. Likewise, a relative error of 44.86159 % and an experimental resolution of 0.30138 %CH₄ were estimated. These results indicate that the developed sensor is capable of detecting variations in methane concentration.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El metano (CH_4) es un gas natural incoloro e inodoro que juega varios roles importantes tanto en nuestra sociedad como en el medio ambiente. Por ejemplo, el metano es el principal componente del gas natural, una fuente de energía ampliamente utilizada para la calefacción, cocina y generación eléctrica. Sin embargo, es un gas con una capacidad de atrapar calor en la atmósfera, impactando negativamente en el ambiente como uno de los principales gases de efecto invernadero.

La necesidad de detectar metano de manera efectiva surge debido a su rol en diversos sectores y su impacto ambiental significativo. La acumulación de metano, ya sea a través de procesos naturales como la descomposición anaeróbica y las emisiones geológicas, o mediante actividades humanas como la extracción de combustibles fósiles, la agricultura y la gestión de residuos, presenta múltiples riesgos y desafíos. Estos incluyen no solo peligros inmediatos de seguridad por su potencial explosivo, sino también implicaciones a largo plazo para el cambio climático.

Tal y como se logra ver en la Figura 1.1, se presentan dos gráficos detallados que desglosan las emisiones de metano por sectores y sus tendencias a lo largo del tiempo. En la Figura 1.1 a), se muestra la distribución porcentual de las emisiones de metano por sector en el año 2010, donde sectores como la agricultura, la gestión de residuos y la energía destacan como los principales contribuyentes. Este gráfico ofrece una vista instantánea de la importancia relativa de cada sector en la producción de metano a nivel global [1]. Por otro lado, la Figura 1.1 b) ilustra las tendencias de las emisiones de metano desde 1990 hasta 2010, proporcionando una perspectiva histórica de cómo han evolucionado las emisiones en cada sector. Se observa que, mientras algunos sectores muestran una tendencia estable o decreciente, otros, como

la agricultura, han mostrado aumentos, subrayando los desafíos y la necesidad de intervenciones dirigidas para la mitigación del metano.

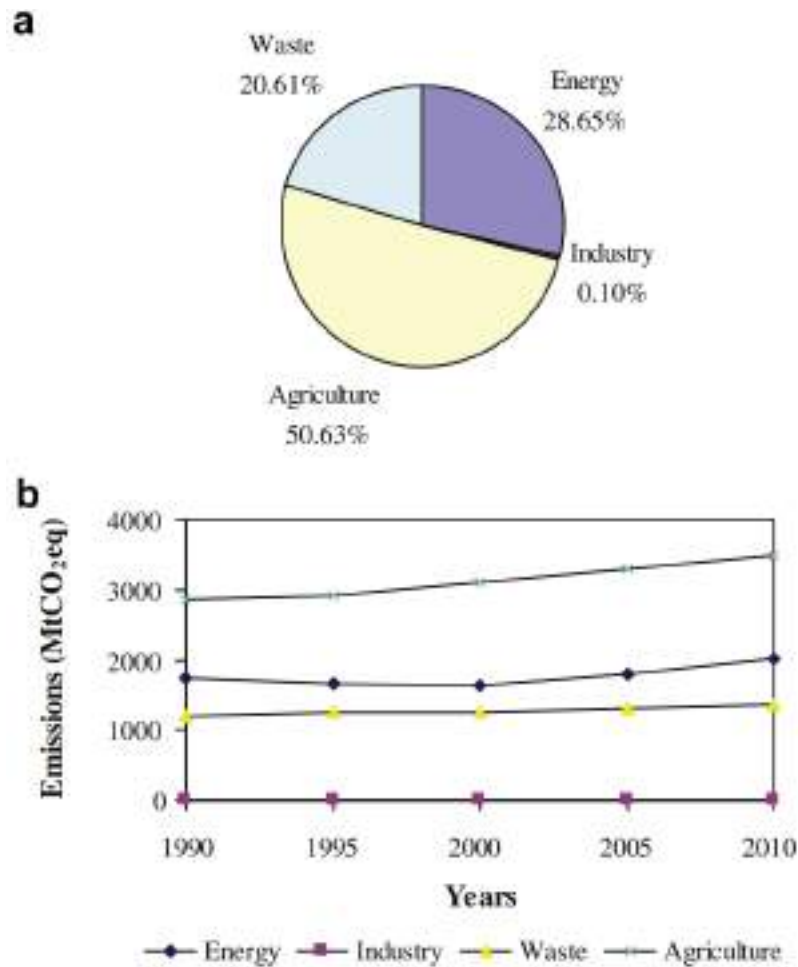


FIGURA 1.1: a) Emisiones de metano por sector (2010 y 1990-2010). La parte a) muestra la contribución de cada sector en 2010, y la parte b) las tendencias de emisión a lo largo de dos décadas [1].

Además de las regulaciones ambientales cada vez más estrictas, la necesidad de operaciones eficientes y económicas en las industrias implica que la detección y monitorización del metano no son solo una cuestión de cumplimiento, sino también una estrategia crucial para la gestión de riesgos y la sostenibilidad ambiental.

El desarrollo de tecnologías avanzadas para la detección de metano también tiene implicaciones directas en la salud pública y la seguridad laboral. Detectar fugas de metano de manera eficaz y temprana puede prevenir accidentes y mejorar las condiciones de trabajo en sectores industriales como la minería y la energía.

Este proyecto también impulsa el avance tecnológico en el campo de los sensores

ópticos, abriendo la puerta a futuras aplicaciones en otros campos que requieren la detección de gases a bajas concentraciones. La tecnología desarrollada podría adaptarse para detectar otros gases de efecto invernadero o contaminantes, ampliando su aplicabilidad y contribuyendo a esfuerzos más amplios de monitoreo y control ambiental.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sensor de fibra óptica basado en un interferómetro Mach-Zehnder (MZI) para la detección eficiente y precisa de metano. Este sensor incorpora empalmes con core-offset utilizando una fibra óptica adelgazada en cascada para aumentar la sensibilidad y mejorar la capacidad de detección de concentraciones de metano.

De igual manera, se diseñó y fabricó una cavidad especializada que contendrá el gas durante las pruebas, asegurando que el sensor pueda operar bajo condiciones controladas. La fuente de luz infrarroja seleccionada corresponderá a una de las bandas de absorción específicas del metano, optimizando la respuesta del sensor a la presencia del gas. Este estudio busca no solo superar las limitaciones de los sensores de metano existentes en términos de sensibilidad y especificidad, sino también reducir la complejidad operativa asociados con la detección de este gas, ofreciendo una herramienta más confiable y económica, con aplicaciones potenciales en la seguridad industrial, monitoreo ambiental y la investigación científica.

1.2 ANTECEDENTES

El descubrimiento del metano se remonta al siglo XVIII, cuando Alessandro Volta, en 1776, observó un gas inflamable emanando de los pantanos del lago Maggiore en Italia. A partir de estas observaciones, el metano fue aislado y caracterizado como compuesto químico independiente por científicos como Sir Humphry Davy en el siglo XIX, quien lo nombró formalmente como “methane”, derivado del griego “methy” (vino) y el sufijo “ane”, indicando un alcano saturado [2].

A temperatura y presión ambiente, el metano es un gas incoloro, inodoro (aunque en aplicaciones domésticas se le añade mercaptano para su detección), y altamente inflamable. Posee una densidad menor que la del aire y una estructura molecular tetraédrica con un ángulo de enlace de aproximadamente 109.5° . Su fórmula empírica, CH_4 , lo convierte en el alcano más simple, formado por un átomo de carbono central enlazado covalentemente a cuatro átomos de hidrógeno. Desde el punto de vista físico, el metano tiene un punto de ebullición de -161.5°C y una solubilidad moderada en agua.

1.2.1 SENSORES DE METANO

La necesidad de detectar metano ha estado estrechamente ligada a la seguridad humana y a la gestión de riesgos industriales, especialmente en entornos como la minería, el transporte de hidrocarburos y los sistemas de saneamiento. La presencia de este gas, tanto por su inflamabilidad como por sus propiedades asfixiantes en concentraciones elevadas, impulsó el desarrollo de diversos métodos de detección, adaptados a las limitaciones tecnológicas de cada época. Desde soluciones empíricas basadas en observaciones animales hasta sensores ópticos de alta precisión, la evolución de las tecnologías de detección refleja una creciente comprensión de las propiedades fisicoquímicas del metano, así como la demanda de técnicas más sensibles, seguras y confiables. A continuación, se presenta un recorrido histórico por los principales avances en la detección del metano, organizados por períodos clave que marcan hitos tecnológicos significativos.

Durante el siglo XIX, los mineros enfrentaban el peligro constante de gases tóxicos como el metano y el monóxido de carbono en las minas subterráneas. Como método rudimentario de detección, se utilizaban canarios enjaulados debido a su alta sensibilidad a estos gases, véase Figura 1.2. La rápida reacción de los canarios ante concentraciones peligrosas proporcionaba una advertencia temprana a los mineros, permitiéndoles evacuar antes de que los niveles de gas se volvieran letales. Este método se mantuvo en uso hasta el siglo XX, incluso durante la Guerra del Golfo y después del ataque con gas sarín en Japón en 1995 [3].



FIGURA 1.2: Dispositivo de reanimación para canarios utilizado en minas de carbón durante el siglo XIX. Estos dispositivos permitían revivir a las aves expuestas a gases tóxicos como el monóxido de carbono, sirviendo como una medida de seguridad para los mineros [4].

En 1815, el químico británico Sir Humphry Davy desarrolló la lámpara de

seguridad que lleva su nombre, Figura 1.3, diseñada para prevenir explosiones en minas de carbón causadas por la ignición de metano (conocido como "firedamp"). La lámpara consistía en una llama encerrada dentro de una malla metálica fina, que permitía la entrada de aire pero impedía que la llama encendiera el gas metano presente en el ambiente. Este diseño innovador proporcionó una fuente de luz segura para los mineros y se convirtió en un estándar en la industria minera [5].



FIGURA 1.3: Prototipo original de la lámpara de seguridad de Davy, diseñada en 1815 para prevenir explosiones en minas de carbón mediante una malla metálica que impedía la ignición de gases inflamables [6].

A principios del siglo XX, se introdujeron los sensores catalíticos para la detección de gases combustibles como el metano, Figura 1.4. Estos sensores funcionan mediante la oxidación catalítica del gas en una superficie calentada, lo que provoca un aumento de temperatura que se traduce en una señal eléctrica proporcional a la concentración del gas. Este método permitió una detección más precisa y continua de gases inflamables en entornos industriales [7].

Entre las décadas de 1960 y 1980, se desarrollaron sensores electroquímicos y de semiconductores para la detección de metano.

- Sensores electroquímicos:

Estos sensores detectan gases mediante reacciones redox que generan una corriente eléctrica proporcional a la concentración del gas. Son conocidos por su alta sensibilidad y selectividad, y se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales y de seguridad [9].



FIGURA 1.4: Sensor catalítico de gase usado para la detección de metano en entornos industriales. Este dispositivo representa uno de los primeros esfuerzos en mejorar la seguridad mediante la detección temprana de gases combustibles [8].

- Sensores de semiconductores:

Utilizan materiales semiconductores, como óxidos metálicos, cuya conductividad eléctrica cambia en presencia de gases como el metano. Estos sensores son económicos y adecuados para aplicaciones portátiles, aunque pueden verse afectados por factores ambientales como la humedad y la temperatura [10].

Los desafíos que enfrentan las tecnologías actuales para la detección de metano pueden limitar su efectividad en ciertas aplicaciones. Los sensores catalíticos, Figura 1.5 a), aunque robustos y ampliamente utilizados, requieren calibración frecuente y son vulnerables al envenenamiento por otros gases, lo que reduce su vida útil e incrementa los costos de mantenimiento. Por otro lado, los sensores infrarrojos, Figura 1.5 b), ofrecen alta selectividad y estabilidad, pero su elevado costo inicial limita su implementación a gran escala. Los sensores electroquímicos, Figura 1.5 c), si bien asequibles y sensibles, suelen presentar problemas de deriva y baja selectividad en entornos con mezclas complejas de gases. Aunque los semiconductores son económicos, Figura 1.5 d), su rendimiento puede verse afectado por fluctuaciones ambientales y su sensibilidad limitada dificulta la detección de bajas concentraciones de metano.

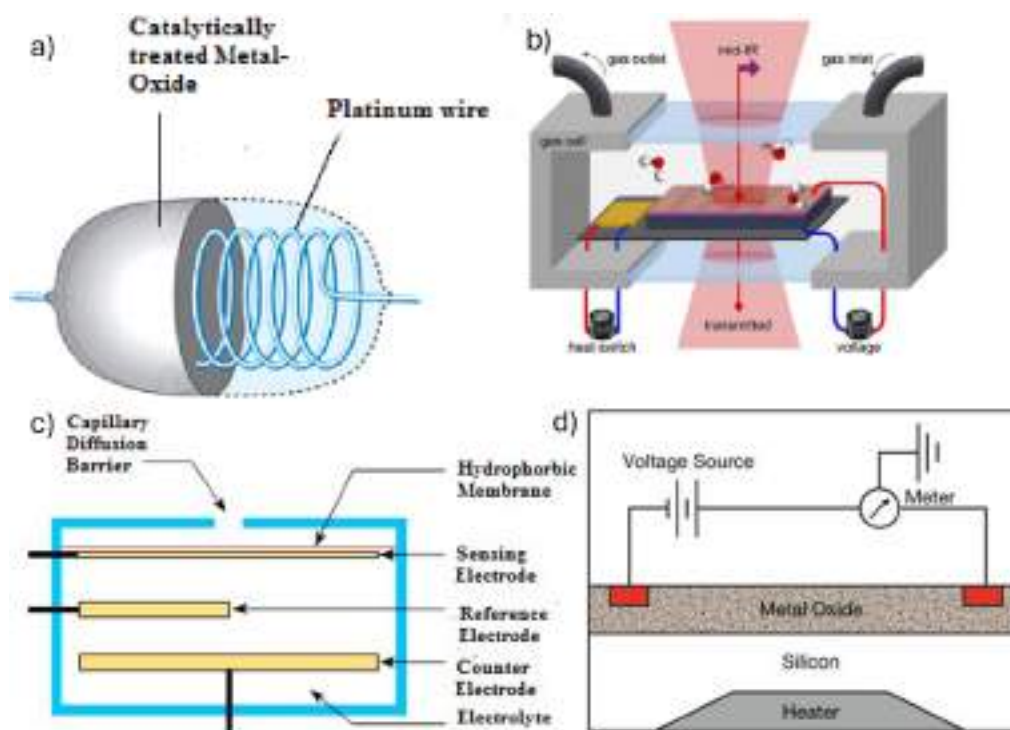


FIGURA 1.5: a) Esquema de un sensor catalítico [11]; b) esquema de un sensor infrarrojo [12]; c) esquema de un sensor de gas electro-químico típico [11]; d) esquema de un sensor semiconductor típico de gas [11].

1.2.2 LA FIBRA ÓPTICA COMO SENSOR

A partir de la década de 1990, la fibra óptica comenzó a desempeñar un papel crucial en la detección de gases, y en particular del metano. La fibra óptica se distingue por su capacidad para transmitir luz a lo largo de largas distancias sin apenas pérdida de señal, lo que la convierte en una herramienta ideal para la detección remota y distribuida de gases. Uno de los primeros avances en este campo fue el desarrollo de sensores interferométricos de fibra óptica, que utilizan el principio de interferencia de la luz para detectar cambios en las propiedades ópticas inducidos por la presencia de metano [13].

1.2.2.1 BREVE HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

En 1870, el físico irlandés John Tyndall realizó un experimento que demostró cómo la luz podía ser guiada a través de un chorro de agua en movimiento, observando que la luz seguía la trayectoria curva del agua sin escapar de ella. Este fenómeno se debe a la reflexión interna total, donde la luz se refleja completamente

dentro de un medio más denso cuando incide con un ángulo mayor al ángulo crítico. Aunque Tyndall no comprendía completamente la física detrás de este fenómeno en su momento, su demostración sentó las bases para el desarrollo de las fibras ópticas modernas [27].

Por su parte, en 1880, Alexander Graham Bell, junto con su asistente Charles Sumner Tainter, inventó el fotófono, un dispositivo que permitía transmitir sonido mediante un haz de luz. Este aparato utilizaba un espejo vibrante que modulaba la luz solar reflejada, la cual era captada por una célula de selenio en el receptor, convirtiendo las variaciones de luz en señales eléctricas audibles. Bell consideraba al fotófono como su invención más significativa, incluso por encima del teléfono, ya que fue un precursor de las comunicaciones ópticas modernas [28].

Los experimentos de Tyndall y Bell fueron fundamentales para el desarrollo de la tecnología de guías de luz. Tyndall proporcionó la comprensión física necesaria para guiar la luz a través de medios curvos, mientras que Bell aplicó este conocimiento para transmitir información utilizando luz modulada. Estos avances sentaron las bases para las comunicaciones por fibra óptica, que se convirtieron en una realidad práctica en el siglo XX.

Narinder Singh Kapany es reconocido como el padre de la fibra óptica debido a sus investigaciones pioneras en la transmisión de imágenes a través de haces de fibras ópticas. En 1953, junto con Harold Hopkins en el Imperial College de Londres, logró transmitir imágenes de alta calidad mediante haces de fibras de vidrio, superando las limitaciones anteriores en la calidad de imagen. Kapany acuñó el término 'fibra óptica' en un artículo de 1960 en *Scientific American* y escribió el primer libro sobre este nuevo campo, consolidando su papel como figura central en el desarrollo de esta tecnología [28].

En 1966, Charles K. Kao y George A. Hockham publicaron un artículo fundamental titulado 'Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies' en el que propusieron que las fibras ópticas podrían ser utilizadas para comunicaciones si se reducían las pérdidas de señal a menos de 20 dB/km. Identificaron que las altas pérdidas en las fibras existentes se debían a impurezas en el vidrio, no a limitaciones fundamentales de la tecnología. Esta visión abrió el camino para el desarrollo de fibras ópticas de alta pureza y bajo nivel de atenuación, estableciendo las bases para las comunicaciones ópticas modernas [29].

Las contribuciones de Kapany, Kao y Hockham fueron fundamentales para la evolución de las telecomunicaciones. Kapany sentó las bases experimentales y conceptuales de la fibra óptica, mientras que Kao y Hockham proporcionaron el marco teórico y práctico para su aplicación en comunicaciones de larga distancia. Estos

avances permitieron el desarrollo de redes de comunicación más rápidas y eficientes, transformando la forma en que el mundo se conecta y comparte información.

1.2.2.2 VENTAJAS DE LA FIBRA ÓPTICA COMO SENSOR

El uso de la fibra óptica como sensor ofrece diversas ventajas frente a los sensores convencionales. Por ello, a continuación se presentan algunas de las principales ventajas de la fibra óptica como plataforma de sensado:

1. Inmunidad a interferencias electromagnéticas:

Una de las principales ventajas de los sensores de fibra óptica es su inmunidad a las interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia. A diferencia de los sensores eléctricos convencionales, las fibras ópticas no conducen electricidad, lo que las hace insensibles a campos electromagnéticos externos. Esta característica es especialmente valiosa en entornos industriales o médicos donde las interferencias pueden afectar la precisión de las mediciones [36].

2. No conductividad eléctrica:

La fibra óptica es un material dieléctrico, lo que significa que no conduce electricidad. Esta propiedad permite su uso en entornos donde la presencia de electricidad representa un riesgo, como en áreas con atmósferas explosivas o en aplicaciones médicas sensibles. Además, elimina la posibilidad de cortocircuitos o chispas, aumentando la seguridad del sistema [37].

3. Tamaño reducido y peso ligero:

Las fibras ópticas son extremadamente delgadas y ligeras, lo que facilita su integración en estructuras complejas o espacios reducidos. Esta característica es particularmente útil en aplicaciones aeroespaciales, biomédicas y de monitoreo estructural, donde el espacio y el peso son limitados [38].

4. Capacidad de multiplexación:

Los sensores de fibra óptica permiten la multiplexación, es decir, la capacidad de integrar múltiples sensores a lo largo de una sola fibra. Esto reduce la cantidad de cableado necesario y permite la monitorización simultánea de múltiples parámetros en diferentes ubicaciones, optimizando los recursos y simplificando la instalación [39].

5. Resistencia a ambientes extremos:

Las fibras ópticas pueden operar en condiciones extremas de temperatura, presión y ambientes corrosivos. Esto las hace ideales para aplicaciones en indus-

trias como la petroquímica, la aeroespacial y la generación de energía, donde otros tipos de sensores podrían fallar [40].

6. Seguridad intrínseca:

Debido a que las fibras ópticas no transmiten electricidad y no generan chispas, son intrínsecamente seguras para su uso en entornos peligrosos, como plantas químicas o refinerías, donde la presencia de gases inflamables requiere equipos que minimicen el riesgo de ignición [41].

7. Alta sensibilidad y precisión:

Los sensores de fibra óptica ofrecen una alta sensibilidad y precisión en la detección de cambios físicos como temperatura, presión o deformaciones. Esto se debe a que las propiedades ópticas de la fibra pueden ser afectadas por pequeñas variaciones en el entorno, permitiendo una detección precisa y en tiempo real [38].

Véase la Tabla 1.1, en donde se hace una comparación entre sensores electrónicos convencionales y sensores de fibra óptica, abordando características como alimentación de corriente eléctrica, mantenimiento, vida útil, etc.

TABLA 1.1: Comparación entre sensores convencionales y sensores de fibra óptica.

Característica	Sensor eléctrico convencional	Sensor de fibra óptica
Requiere alimentación eléctrica	Sí	No (en el extremo sensor)
Afectado por corrosión	Sí	No (vidrio es inerte)
Mantenimiento frecuente	Sí	No o mínimo
Vida útil típica	5–10 años	> 20 años
Requiere recalibración regular	Sí	Rara vez

1.2.3 TIPOS DE SENSORES EN FIBRA ÓPTICA

De manera general, los sensores de fibra óptica pueden clasificarse en sensores intrínsecos y sensores extrínsecos. En los sensores intrínsecos, la propia fibra actúa como elemento sensible, de modo que la magnitud física o química modifica directamente las propiedades de la luz guiada. En los sensores extrínsecos, por otro lado, la fibra funciona principalmente como medio de transporte de la señal óptica hacia

un elemento sensor externo. Dentro de los sensores intrínsecos se encuentran configuraciones ampliamente utilizadas, como las rejillas de Bragg, los interferómetros de fibra óptica y las fibras modificadas o recubiertas.

1.2.3.1 SENSORES DE REJILLA DE BRAGG EN FIBRA

Las rejillas de Bragg en fibra, conocidas como FBG por sus siglas en inglés, son estructuras periódicas inscritas en el núcleo de una fibra óptica que reflejan una longitud de onda específica de la luz incidente [43, 44]. Cuando la fibra experimenta cambios de temperatura o deformación, la longitud de onda reflejada se desplaza, permitiendo la medición precisa de dichos parámetros, como se muestra en la Figura 1.6.

Entre sus principales características se encuentran su alta sensibilidad, buena resolución, capacidad de multiplexación y compatibilidad con ambientes hostiles. Además, debido a su estabilidad y bajo mantenimiento, las FBG se emplean ampliamente en monitoreo estructural, aplicaciones aeroespaciales y sistemas biomédicos.

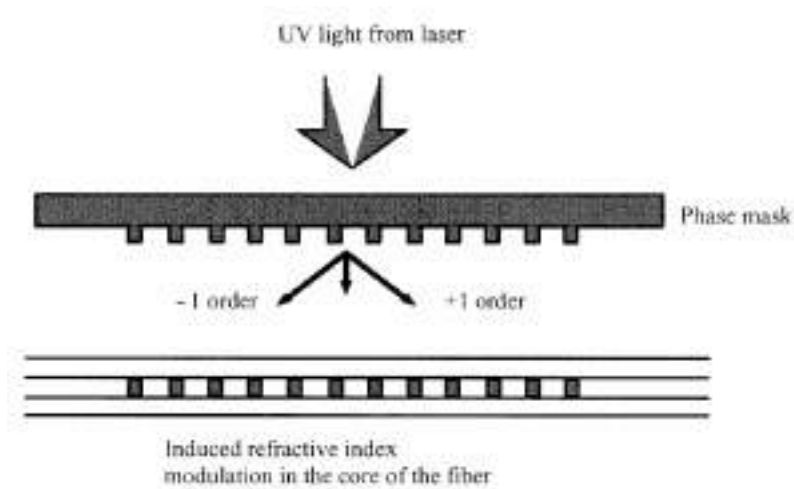


FIGURA 1.6: Fabricación de una rejilla en fibra óptica mediante la exposición a un patrón de interferencia generado por radiación láser UV que atraviesa una máscara de fase. Este patrón induce una modulación del índice de refracción en el núcleo de la fibra [31].

1.2.3.2 SENSORES INTERFEROMÉTRICOS DE FIBRA ÓPTICA

Los sensores interferométricos se basan en la medición de cambios en la fase de la luz que se propaga por la fibra. Dichos cambios pueden ser producidos por variaciones de temperatura, presión, deformación, curvatura o índice de refracción. Dentro de esta categoría destacan principalmente los interferómetros de Mach-Zehnder y Fabry-Perot.

El interferómetro de Mach-Zehnder (MZI) divide la luz en dos trayectorias ópticas que posteriormente se recombinan para producir interferencia. En sensores de fibra óptica, esta configuración puede implementarse mediante divisores ópticos o mediante estructuras en línea dentro de una misma fibra. Cualquier cambio en el índice de refracción o en la longitud óptica de una de las trayectorias modifica el patrón de interferencia, permitiendo la detección de cambios físicos o químicos en el entorno [45, 46]. Un esquema de esta configuración se presenta en la Figura 1.7.

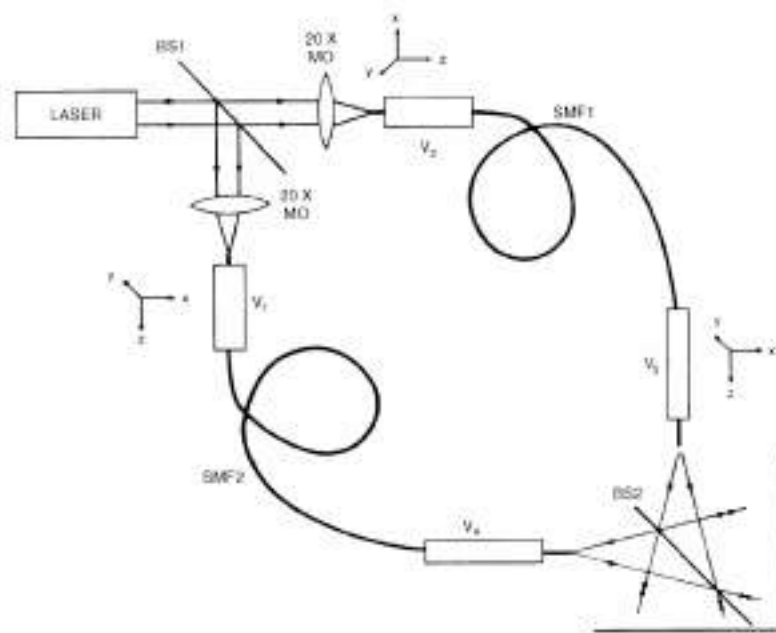


FIGURA 1.7: Esquema de un interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica [31].

El interferómetro de Fabry-Perot (FPI), por su parte, consiste en una cavidad óptica formada por dos superficies reflectantes paralelas, entre las cuales la luz se refleja múltiples veces. La interferencia resultante depende de la longitud de la cavidad y del índice de refracción del medio dentro de ella. Por esta razón, los cambios en temperatura, presión o deformación modifican el patrón de interferencia y permiten realizar mediciones de alta resolución [47-50]. La Figura 1.8 muestra un arreglo experimental de este tipo de sensor.

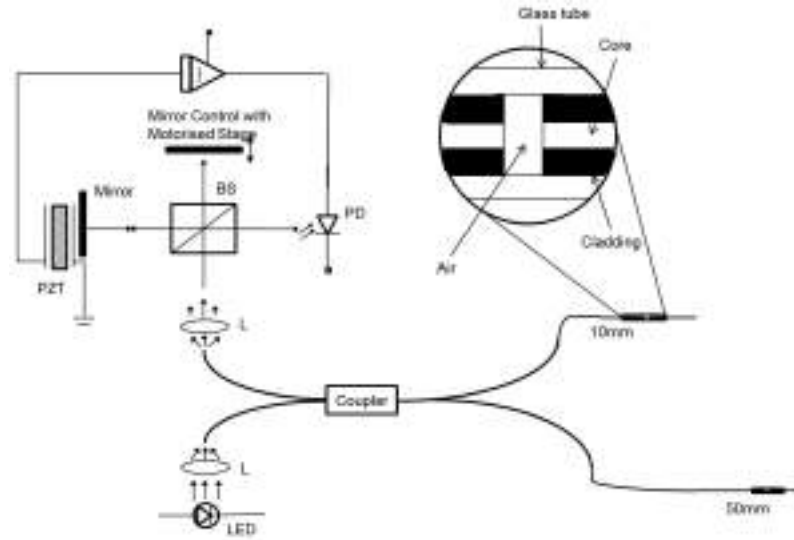


FIGURA 1.8: Arreglo experimental usado para un interferómetro Fabry-Perot de fibra óptica [47].

Tanto los MZI como los FPI ofrecen ventajas importantes en términos de sensibilidad y adaptabilidad. La elección entre una configuración u otra depende del parámetro a medir, el rango de operación, la resolución requerida y las condiciones ambientales del sistema. En particular, los MZI en fibra óptica han recibido gran atención debido a que pueden fabricarse mediante estructuras compactas en línea, lo que facilita su integración en sistemas de sensado.

1.2.3.3 CONFIGURACIONES MZI REPORTADAS EN FIBRA ÓPTICA

En la literatura se han reportado múltiples configuraciones estructurales para la implementación de MZI en fibra óptica, cada una con distintos niveles de sensibilidad según la variable física de interés. Estas estructuras generalmente se obtienen mediante técnicas de empalme entre distintos tipos de fibra, lo que permite controlar y adaptar el comportamiento óptico del sistema interferométrico.

Entre las configuraciones más utilizadas se encuentran la unión de fibra monomodo con fibra multimodo (SMF-MMF-SMF) [88], la configuración inversa MMF-SMF-MMF [74], así como variantes que incorporan fibras especializadas como fibra de cristal fotónico (SMF-PCF-SMF) [56] o fibra de núcleo delgado (SMF-TCF-SMF) [47]. También se han reportado esquemas que integran elementos como rejillas de Bragg (SMF-FBG-MMF-SMF) [45] o fibras de núcleo múltiple, como en la disposición SMF-MMF-SCF-MMF-SMF [77]. Incluso se han propuesto configuraciones híbridas que combinan distintas técnicas con el fin de mejorar la sensibilidad

ante parámetros específicos como temperatura, curvatura o índice de refracción [48].

Arevalo-Bautista et al. [89] presentan un análisis comparativo entre diferentes configuraciones MZI aplicadas a la medición de temperatura y curvatura, destacando la influencia de factores como el tipo de fibra, el uso de técnicas de desplazamiento de núcleo y el adelgazamiento de secciones intermedias. La Tabla 1.2 resume las configuraciones evaluadas y las sensibilidades obtenidas.

TABLA 1.2: Comparación entre estructuras MZI basadas en empalme core-offset.

Estructura del interferómetro	Core-offset	Sens. a curvatura	Sens. a temperatura	Referencia
Empalme desplazado con capilar de cuarzo entre SMFs	10 μm	No	32 pm/ $^{\circ}\text{C}$	[68]
SMF-SMF-MMF-SMF	8 μm	164 pm/m $^{-1}$	52 pm/ $^{\circ}\text{C}$	[45]
SMF-MMF-SCF-MMF-SMF	No	31.54 nm/m $^{-1}$	55.81 pm/ $^{\circ}\text{C}$	[77]
SMF-MMF-TF-SMF	No	No	0.0615 nm/ $^{\circ}\text{C}$	[90]
SMF-SMF-SMF con recubrimiento de aluminio	20 μm y 30 μm	No	120 pm/ $^{\circ}\text{C}$	[80]
Lateral-offset y up-taper	6.5 μm	11.987 nm/m $^{-1}$ y 8.697 nm/m $^{-1}$	No	[91]
SMF-MMF-SMF-MMF-SMF	No	No	0.088 nm/ $^{\circ}\text{C}$	[74]
SMF-SMF-SMF	30 μm	No	25.26 pm/ $^{\circ}\text{C}$	[92]
SMF-TF-SMF	30 μm	0.49 nm/m $^{-1}$	10 pm/ $^{\circ}\text{C}$ y 90 pm/ $^{\circ}\text{C}$	[89]
SMF-TF-SMF	30 μm	No	No	Éste trabajo

Como se observa en la Tabla 1.2, la estructura del interferómetro Mach-Zehnder influye de manera significativa en su desempeño como sensor. La técnica de *core-offset* introduce discontinuidades en la guía de onda que favorecen el acoplamiento entre modos del núcleo y del revestimiento, incrementando la sensibilidad ante perturbaciones que modifican la fase relativa entre los modos propagados. Las configuraciones basadas únicamente en fibra monomodo tienden a producir señales más estables y menos dispersas; por el contrario, el uso de fibra multimodo permite excitar múltiples trayectorias de propagación, lo que puede incrementar la sensibilidad, aunque también introduce una respuesta espectral más compleja.

Asimismo, el uso de fibras adelgazadas o modificadas puede aumentar la interacción de la luz con el entorno, favoreciendo la detección de cambios en índice de refracción, temperatura, curvatura o presencia de gases. Sin embargo, aumentar el número de segmentos, empalmes o regiones de acoplamiento también incrementa la complejidad del análisis de señal. Por esta razón, el diseño de un MZI en cascada debe equilibrar sensibilidad, estabilidad, facilidad de fabricación y claridad en la interpretación del espectro.

En el caso de la detección de metano, una configuración MZI en fibra óptica con regiones interferométricas en cascada resulta de interés debido a que las variaciones en el entorno pueden modificar el índice efectivo de los modos propagados y, por

consiguiente, desplazar el patrón de interferencia. Esta propiedad permite utilizar la respuesta espectral del sensor como una herramienta para identificar cambios asociados a la presencia o concentración del gas.

1.2.3.4 SENSORES BASADOS EN FIBRAS ÓPTICAS MODIFICADAS

Otra familia importante de sensores intrínsecos está formada por fibras cuya geometría o estructura interna ha sido modificada para aumentar la interacción de la luz con el medio externo. Estas modificaciones pueden consistir en reducir o aumentar el diámetro de la fibra, incorporar fibras microestructuradas o utilizar fibras con núcleo hueco. En general, el propósito de estas configuraciones es favorecer la interacción entre el campo óptico guiado y el entorno que rodea a la fibra.

Los sensores de fibra óptica adelgazada se fabrican reduciendo gradualmente el diámetro de la fibra, lo que incrementa el campo evanescente y mejora la interacción con el entorno circundante. Debido a ello, son útiles para detectar cambios en el índice de refracción, concentración de gases o líquidos, y otras propiedades químicas o biológicas [51]. Un ejemplo de este tipo de estructura se muestra en la Figura 1.9.

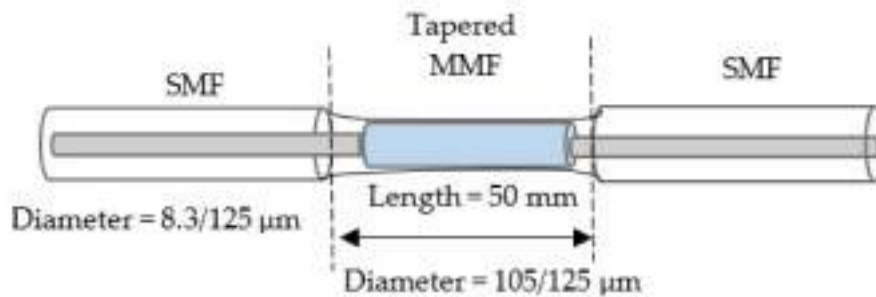


FIGURA 1.9: Esquema de un sensor de fibra óptica con estructura adelgazada, basado en una fibra multimodo empalmada entre dos fibras monomodo. La región adelgazada tiene una longitud de 50 mm y un diámetro de 105/125 μm , mientras que las fibras SMF tienen un diámetro de 8.3/125 μm [52].

Aunque son menos comunes, los sensores de fibra óptica engrosada se utilizan en aplicaciones donde se requiere mayor robustez mecánica o una interacción particular con el entorno. El engrosamiento puede modificar ciertas propiedades ópticas y mecánicas de la fibra, adaptándola a necesidades específicas de detección [53].

Por otra parte, las fibras de cristal fotónico, también conocidas como PCF, surgieron como una innovación en la guía de luz mediante estructuras periódicas de microagujeros en el revestimiento de la fibra [54-56]. Estas estructuras permiten

controlar las propiedades ópticas de manera más precisa que en fibras convencionales, como se observa en la Figura 1.10. Las PCF pueden guiar la luz por contraste de índice efectivo o por banda prohibida fotónica. En sensado, son relevantes porque sus microagujeros pueden permitir la interacción directa con gases o líquidos, lo que facilita la detección de cambios en índice de refracción, temperatura, presión o composición química [57, 59].

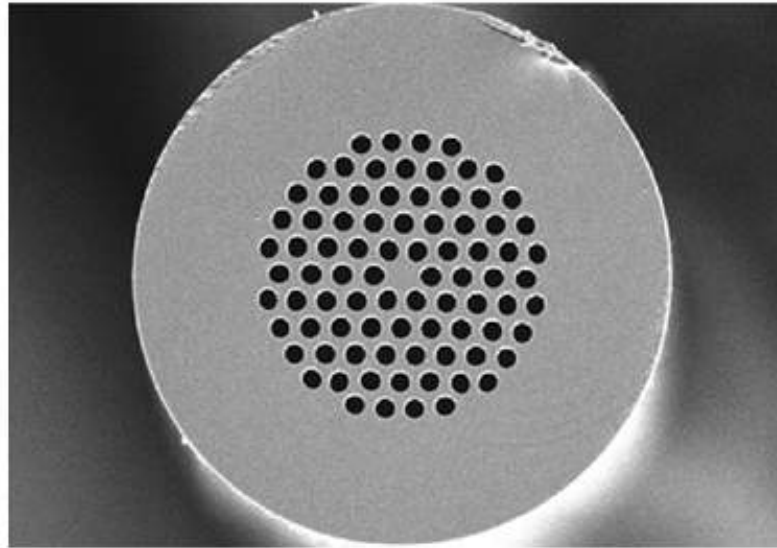


FIGURA 1.10: Imagen de microscopía electrónica de barrido que muestra la sección transversal de una fibra óptica de cristal fotónico. Se observa la estructura de microagujeros que rodea el núcleo y permite la guía de luz mediante banda prohibida fotónica o índice efectivo [56].

Las fibras de núcleo hueco basadas en cristales fotónicos, o HC-PBF, representan una evolución de las PCF. En ellas, la luz se guía principalmente a través de un núcleo de aire, lo que reduce la interacción con el material sólido de la fibra y disminuye efectos como absorción, dispersión y no linealidades [54, 60]. Debido a que el núcleo hueco puede llenarse con gases o líquidos, estas fibras son especialmente atractivas para aplicaciones de sensado químico, monitoreo ambiental y detección de gases, ya que permiten una interacción directa entre la luz guiada y la sustancia analizada [61].

1.2.3.5 SENSORES INTERFEROMÉTRICOS CON RECUBRIMIENTOS FUNCIONALES

Además de modificar la geometría o estructura de la fibra, otra estrategia para aumentar la sensibilidad de los sensores interferométricos consiste en aplicar

recubrimientos funcionales sobre la región sensible. Estos recubrimientos pueden ser películas delgadas o nanopartículas capaces de interactuar con el campo evanescente de la luz guiada [79, 81].

El uso de películas delgadas permite modificar el índice de refracción efectivo de los modos ópticos propagados. Cuando la película interactúa con el entorno, por ejemplo, ante cambios de temperatura, humedad, gases o vapores, se altera la fase relativa entre los modos y, por tanto, el patrón de interferencia observado. La sensibilidad del interferómetro depende del material utilizado, el espesor de la película, su uniformidad y su respuesta al parámetro de interés. Entre las técnicas de deposición más comunes se encuentran el *sputtering* y el método sol-gel.

El *sputtering* es un proceso físico de deposición en el que átomos de un material sólido son expulsados por el bombardeo de iones energéticos y posteriormente depositados sobre la superficie de la fibra. Esta técnica permite obtener películas con buen control de espesor, alta uniformidad y buena adherencia. Un ejemplo de fibra recubierta se muestra en la Figura 1.11.

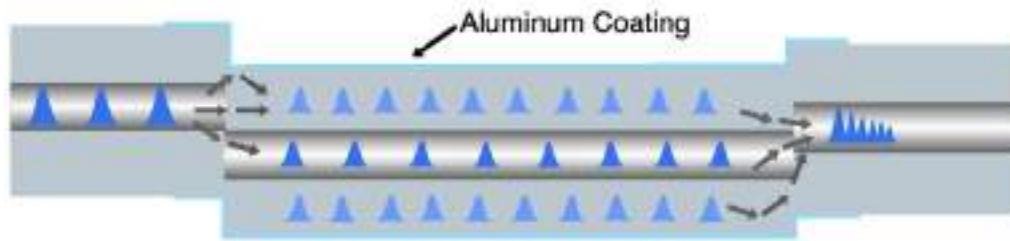


FIGURA 1.11: Diagrama esquemático de un MZI basado en desplazamiento de núcleo tras un recubrimiento externo con aluminio. El recubrimiento permite la interacción de la luz evanescente con el entorno, modificando la interferencia en la salida del sensor [80].

La técnica sol-gel, por otro lado, es un proceso químico húmedo en el que una solución coloidal se transforma en una película vítrea o cerámica delgada sobre la superficie de la fibra. Puede aplicarse mediante inmersión controlada, goteo local o atomización. Esta técnica es atractiva para sensores de gases y humedad debido a que permite obtener películas porosas, de bajo costo y con posibilidad de incorporar materiales funcionales.

El uso de nanopartículas como recubrimiento en interferómetros de fibra óptica permite incrementar la interacción del campo evanescente con el medio circundante. Las nanopartículas pueden modificar localmente el índice de refracción y la absorción, afectando la fase y amplitud de los modos propagados. Como resultado, el patrón de interferencia puede correlacionarse con cambios físicos o químicos del

entorno, como la presencia de gases, temperatura, humedad o campos magnéticos.

Entre las técnicas utilizadas para depositar nanopartículas se encuentran el autoensamblado capa por capa, el *dip-coating* y el *sputtering*. En el contexto de la detección de metano, el desarrollo de nanomateriales aplicados a fibras ópticas representa una línea prometedora para mejorar la sensibilidad y selectividad de los sensores. La Figura 1.12 muestra distintas configuraciones de recubrimiento sobre una fibra óptica.

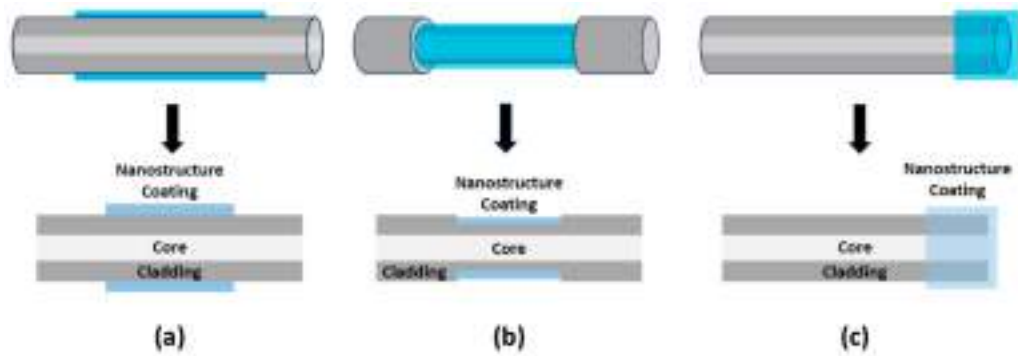


FIGURA 1.12: Vista lateral en sección transversal de un sensor de fibra óptica con revestimiento aplicado sobre: a) revestimiento sin grabar, b) revestimiento grabado y c) punta de fibra [82].

En conjunto, el uso de sensores intrínsecos, estructuras interferométricas en cascada, fibras modificadas y recubrimientos funcionales ha impulsado el desarrollo de sistemas de fibra óptica cada vez más sensibles y selectivos.

1.2.4 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA INTEGRADOS EN CÁMARAS DE GAS

El uso de cámaras o contenedores de gas en sistemas de fibra óptica ha sido una estrategia recurrente para evaluar el desempeño de sensores bajo condiciones controladas. Estos montajes permiten regular variables como presión, composición del gas, flujo y temperatura, además de reducir perturbaciones externas que podrían afectar la estabilidad de la medición. En particular, las cámaras selladas permiten estudiar la respuesta óptica del sensor ante cambios inducidos en el medio, garantizando que la señal medida esté asociada principalmente con la variable de interés.

En la literatura se han reportado diferentes configuraciones experimentales en las que sensores de fibra óptica son integrados dentro de cámaras de gas. Sin embargo, una parte importante de estos trabajos se ha enfocado en la medición de

presión de gas o en la detección basada en materiales sensibles, más que en la cuantificación directa de la concentración de un gas específico mediante una estructura interferométrica de fibra óptica. A continuación, se describen algunos ejemplos representativos.

Yin Liu y su equipo implementaron un sensor dentro de una cámara de presión especialmente diseñada, como se muestra en la Figura 1.13. En este trabajo se utilizó un interferómetro Mach-Zehnder *in-line* modificado, fabricado a partir de una fibra óptica monomodo con deformaciones torcidas que actúan como divisores y combinadores de haz. Para incrementar la respuesta del sensor ante variaciones de presión de gas, se generó un espacio de aire dentro de la cubierta de la fibra mediante un láser de femtosegundo, lo cual permitió modificar la fase de la luz transmitida. La cámara de gas fue sellada cuidadosamente con pegamento AB, asegurando un entorno aislado y evitando fugas que pudieran afectar la precisión de las mediciones. Este montaje resalta la importancia de un diseño experimental controlado y de un sellado adecuado cuando se trabaja con sensores ópticos en ambientes gaseosos [85].

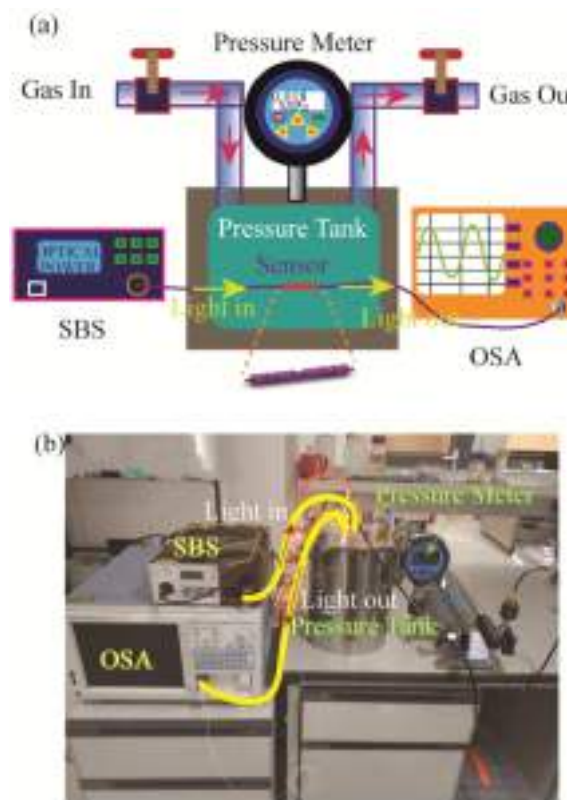


FIGURA 1.13: Diferentes sistemas experimentales usados para hacer mediciones de presión de gas [85].

De manera similar, Zhengyong Li y colaboradores desarrollaron un sensor de presión de gas altamente sensible basado en un interferómetro Mach-Zehnder *in-*

line fabricado con fibra de doble núcleo, como se observa en la Figura 1.14. En esta configuración, el sensor se montó dentro de una cámara de gas diseñada para proporcionar condiciones de medición controladas. El sistema incorporó un generador de presión comercial y un medidor digital de alta precisión para ajustar y monitorear la presión interna. La fibra óptica fue sellada dentro de la cámara mediante un adhesivo resistente, permitiendo que uno de sus extremos se extendiera hacia el exterior para realizar mediciones en tiempo real sin comprometer el aislamiento del sistema. Este arreglo permitió operar en un intervalo de presión de 0 a 2 MPa, con alta sensibilidad y baja sensibilidad cruzada a la temperatura [86].

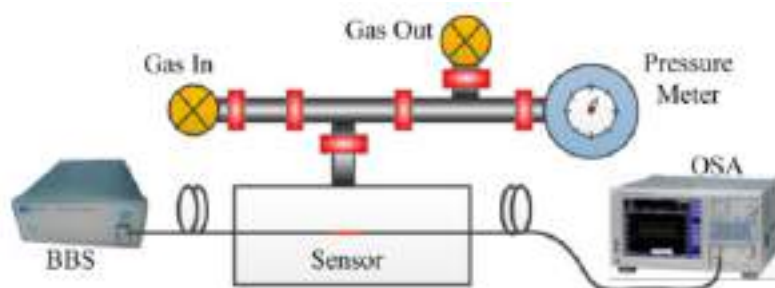


FIGURA 1.14: Configuración experimental para mediciones de presión de gas [86].

Por otra parte, Ignacio Vitoria y colaboradores estudiaron sensores de fibra óptica para detección de gases basados en resonancia de modo de pérdida, conocida como LMR por sus siglas en inglés (*Lossy Mode Resonance*). En este caso, el sensor se fabricó utilizando una fibra óptica recubierta con óxidos metálicos empleados tradicionalmente como materiales sensibles a gases, como se muestra en la Figura 1.15. La cámara de gas utilizada en los experimentos permitió mantener un entorno controlado y aislado, favoreciendo la interacción entre el gas y el recubrimiento del sensor. Este tipo de configuración evidencia la utilidad de las cámaras de gas para evaluar sensores ópticos basados en materiales funcionales, donde la respuesta depende de la interacción química o físico-química entre el analito y la superficie sensible [87].

Estos antecedentes muestran que las cámaras de gas son elementos fundamentales para caracterizar sensores de fibra óptica bajo condiciones controladas. En los trabajos descritos, su función principal es proporcionar un ambiente sellado que permita evaluar la respuesta del sensor ante cambios de presión o ante la presencia de gases que interactúan con recubrimientos funcionales. No obstante, en el contexto de la detección de metano, aún resulta relevante explorar configuraciones en las que la propia estructura interferométrica de fibra óptica sea utilizada para relacionar los cambios espectrales con variaciones en la concentración del gas.

De forma más cercana al enfoque de este trabajo, Yang et al. desarrollaron un sensor de metano basado en un interferómetro Mach-Zehnder inducido por interferen-

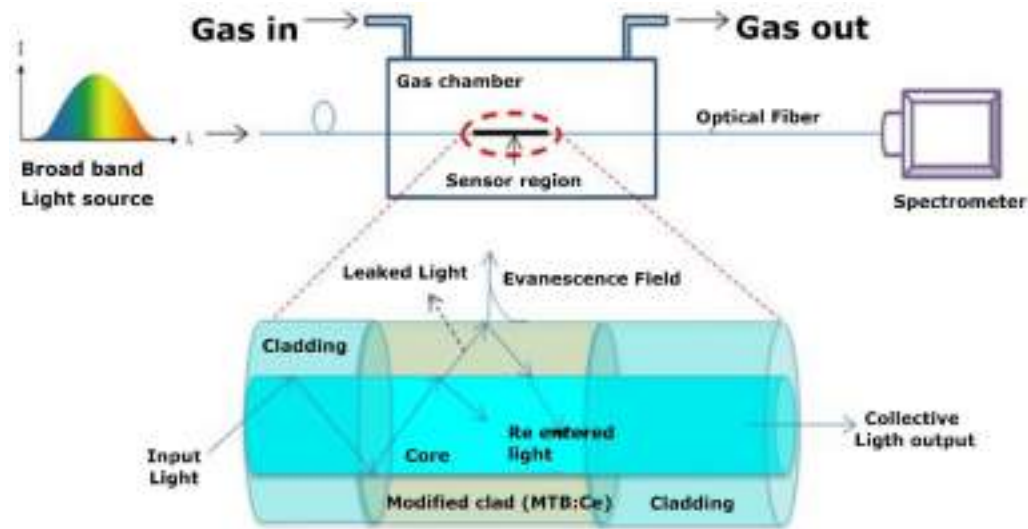


FIGURA 1.15: Diagrama esquemático del sensor y del mecanismo de detección de gas [87].

cia multimodal. En dicha configuración, el sensor se fabricó mediante una estructura de fibra óptica compuesta por secciones SMF–MMF–MS–SMF–MMF–SMF, donde la sección sensible corresponde a una fibra monomodo adelgazada recubierta con una película ZIF-8/PDMS. La función de este recubrimiento es proporcionar selectividad hacia el metano, ya que la adsorción del gas modifica el índice de refracción efectivo de la película y, por consecuencia, altera los modos de revestimiento que participan en la interferencia. De esta manera, los cambios en la concentración de CH_4 se manifiestan como desplazamientos en los valles del espectro interferométrico [93].

El sistema experimental reportado por Yang et al. también emplea una cámara de gas para colocar el sensor en contacto directo con mezclas controladas de metano. En su montaje, la concentración del gas se regula mediante un sistema de mezcla de CH_4 y N_2 , utilizando controladores de flujo másico, y la respuesta espectral se registra mediante un analizador de espectro óptico. Los autores evaluaron el sensor en un intervalo de 0 a 4% de metano y obtuvieron una sensibilidad máxima de 2.364 nm/ %, con un límite de detección aproximado de 338 ppm. Este trabajo resulta relevante como antecedente directo, ya que combina una estructura interferométrica tipo Mach-Zehnder, una cámara de gas y mediciones espectrales para la detección de metano.

A diferencia de dicho enfoque, en el presente trabajo no se empleó un recubrimiento selectivo como ZIF-8/PDMS, sino que se analizó la respuesta de un interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica colocado dentro de una cavidad de aluminio diseñada específicamente para contener el gas. Por ello, mientras que Yang

et al. reportan la detección de metano a partir del desplazamiento espectral de los valles de interferencia, en este trabajo la respuesta experimental se evaluó principalmente mediante la atenuación de la potencia transmitida al variar la concentración de CH_4 . Esta comparación permite ubicar el presente desarrollo dentro de las configuraciones interferométricas de fibra óptica para detección de metano, destacando tanto su similitud experimental como las diferencias en el mecanismo de sensado y en la arquitectura del sistema.

En este sentido, a diferencia de los sistemas enfocados principalmente en presión de gas, el objetivo de este trabajo es analizar la respuesta espectral del sensor ante distintas concentraciones de metano, aprovechando la sensibilidad de la interferencia modal a cambios en el entorno óptico. De esta manera, la cavidad no solo cumple una función de contención y seguridad, sino que también permite establecer un ambiente controlado para estudiar la relación entre la concentración del gas y la respuesta del sensor.

1.3 JUSTIFICACIÓN O MOTIVACIÓN

El desarrollo de un detector de metano utilizando fibra óptica con la técnica de core-offset y una configuración de interferómetro Mach-Zehnder en cascada responde a la creciente necesidad de tecnologías avanzadas para la detección de gases de efecto invernadero en la lucha contra el cambio climático. El metano es uno de los gases con mayor impacto en el calentamiento global, debido a su alto potencial de captura de calor en la atmósfera. Las emisiones de metano provienen de diversas fuentes industriales, agrícolas y naturales, lo que hace crucial contar con métodos de detección precisos, seguros y sensibles para prevenir fugas y mitigar su impacto ambiental. En este contexto, la detección efectiva de metano es esencial no solo para cumplir con las regularidades ambientales, sino también para mejorar la seguridad y eficiencia operativa en industrias como las del gas natural, la agricultura y la gestión de residuos.

El uso de fibra óptica para la detección de metano ofrece ventajas significativas sobre los métodos tradicionales, como su alta sensibilidad, inmunidad a las interferencias electromagnéticas y capacidad para operar en entornos adversos. La técnica de core-offset en una configuración de Mach-Zehnder en cascada permite aumentar la interacción de la luz con el gas, mejorando la sensibilidad del sistema para detectar concentraciones bajas de metano. La elección de un diodo láser de 1653 nm, que coincide con una de las bandas de absorción del metano, optimiza aún más la capacidad del sistema para medir la concentración del gas con precisión.

La implementación exitosa de este sensor no solo avanzará en la detección científica y tecnológica del metano, sino que también podría influir significativamente en las políticas medioambientales y de seguridad. Al proporcionar una herramienta más efectiva y precisa para monitorizar las emisiones de metano, este proyecto tiene el potencial de informar y guiar la regulación ambiental y las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero. Esto es crucial para los esfuerzos globales de reducción de emisiones y para el cumplimiento de los compromisos internacionales sobre el cambio climático.

Además, la metodología y los resultados obtenidos podrían servir como referencia para futuras investigaciones en la detección de otros gases nocivos, estableciendo un precedente para el desarrollo de tecnologías más avanzadas y adaptativas. Este enfoque no solo aborda los problemas ambientales críticos, sino que también respalda la innovación en seguridad industrial, proporcionando soluciones que pueden ser adaptadas para una variedad de aplicaciones industriales y ambientales.

Un componente clave de este trabajo será el desarrollo de un contenedor personalizado de metano adaptado para el uso con interferómetros de fibra óptica. Este contenedor estará diseñado para facilitar la introducción y extracción de los interferométricos, asegurando siempre la integridad del sistema y evitando fugas de gas. La capacidad de controlar con precisión el entorno del gas y realizar mediciones repetidas con distintos arreglos de fibra y configuraciones de core-offset proporcionará información valiosa sobre el rendimiento del sensor y permitirá optimizar la técnica.

Este proyecto de tesis no solo busca contribuir al avance de la tecnología de detección de metano mediante sistemas ópticos, sino también ofrecer soluciones prácticas para abordar problemas ambientales críticos. La implementación de un sistema de detección preciso y adaptable tiene un impacto directo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y en la mejora de la seguridad en aplicaciones industriales, posicionando a la fibra óptica como una tecnología clave para enfrentar los desafíos actuales en la detección de metano.

1.4 HIPÓTESIS

Se plantea que un sistema de detección basado en un interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica, fabricado mediante la técnica de desplazamiento de núcleo e integrado dentro de una cavidad de gas, puede presentar cambios medibles al ser expuesto a diferentes concentraciones de metano.

Asimismo, se considera que el uso de una fuente láser con emisión cercana a

1653 nm, región asociada a la absorción del metano en el infrarrojo cercano, permitirá evaluar la interacción entre el gas y la señal óptica transmitida. Bajo estas condiciones, se espera que el incremento en la concentración de CH_4 produzca una variación en la intensidad transmitida por el sistema, permitiendo estimar parámetros como la sensibilidad, repetitividad y resolución experimental del sensor.

1.5 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del proyecto es desarrollar un sensor avanzado de fibra óptica, basado en un interferómetro Mach-Zehnder con core-offset en cascada y un diodo láser de 1653 nm, integrado en una cavidad de metano diseñada en SolidWorks. Esta cavidad incluirá componentes para controlar presión, temperatura y evacuación del gas, y contará con soportes internos para estabilizar la fibra. El sensor buscará detectar y cuantificar metano, evaluando su desempeño bajo distintas condiciones ambientales y frente a otros gases, con el propósito de validar su especificidad y robustez para aplicaciones industriales y ambientales.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una cavidad con componentes que se ajusten y sellen eficazmente, utilizando herramientas de modelado CAD en SolidWorks para garantizar precisión dimensional y funcionalidad del sellado.
- Incorporar un manómetro, un termómetro y una válvula de escape para permitir un control preciso de la presión, temperatura y liberación de gas, preservando así las condiciones experimentales.
- Integrar soportes de fibra destinados a minimizar el movimiento y las vibraciones, con el fin de obtener mediciones estables y reducir errores en las lecturas.
- Realizar el core-offset y las condiciones operativas del interferómetro para elevar la sensibilidad y precisión del sistema, mediante ajustes experimentales controlados.
- Calibrar el diodo láser a 1653 nm para coincidir con la absorción del metano, verificando que esta configuración mejora la eficiencia de detección.
- Examinar el comportamiento del sensor ante diferentes concentraciones de metano.

-
- Validar el funcionamiento del sensor bajo parámetros de temperatura y presión, asegurando la confiabilidad de sus lecturas en condiciones variables.
 - Establecer métodos cuantitativos para determinar las concentraciones de metano.
 - Analizar los resultados experimentales obtenidos para evaluar el desempeño del sensor, detectar posibles fallos y proponer mejoras técnicas.
 - Realizar una simulación de la estructura interferométrica propuesta.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es una guía de onda dieléctrica diseñada para confinar y transportar luz a través de un núcleo de mayor índice de refracción rodeado por un revestimiento de menor índice. Su funcionamiento se basa en principios de óptica geométrica y óptica ondulatoria, los cuales permiten describir tanto el confinamiento de la luz mediante reflexión interna total como la propagación modal dentro de la guía. Estos fundamentos son esenciales para comprender el uso de la fibra óptica no solo en comunicaciones, sino también como plataforma de sensado, ya que pequeñas perturbaciones externas pueden modificar las propiedades de la luz guiada.

2.1.1 ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA FIBRA ÓPTICA

Una fibra óptica está compuesta principalmente por tres regiones: núcleo, revestimiento y recubrimiento externo, Figura 2.1. El núcleo, también llamado *core*, es la región central por donde se propaga la mayor parte de la luz. Generalmente, está fabricado de sílice dopada, de manera que su índice de refracción sea ligeramente mayor que el del revestimiento. El revestimiento, o *cladding*, rodea al núcleo y permite el confinamiento óptico debido a la diferencia de índices de refracción entre ambas regiones. Finalmente, el recubrimiento externo o *jacket* proporciona protección mecánica y ambiental, aunque no participa directamente en el guiado de la luz [31].

En una fibra de índice escalonado, el índice de refracción cambia abruptamente entre el núcleo y el revestimiento. Esta condición puede expresarse como:

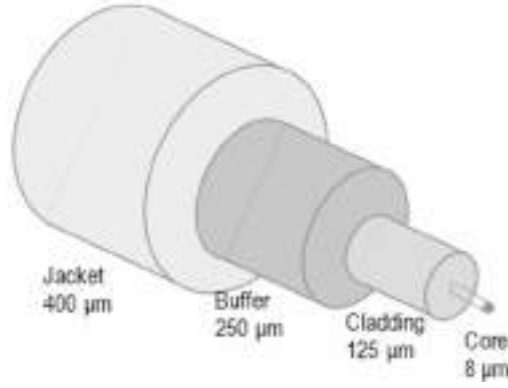


FIGURA 2.1: Estructura típica de una fibra óptica. Se muestran sus componentes principales y sus respectivos diámetros: núcleo (*core*) de 8 μm , revestimiento (*cladding*) de 125 μm , *buffer* de 250 μm y chaqueta externa (*jacket*) de 400 μm [32].

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & r < a \\ n_2, & r \geq a \end{cases} \quad (2.1)$$

donde n_1 es el índice de refracción del núcleo, n_2 es el índice de refracción del revestimiento y a es el radio del núcleo. Para que exista guiado óptico, debe cumplirse que:

$$n_1 > n_2 \quad (2.2)$$

Esta diferencia de índices permite que la luz permanezca confinada dentro del núcleo bajo ciertas condiciones angulares.

2.1.2 REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

La propagación de la luz dentro de una fibra óptica puede explicarse inicialmente mediante el principio de reflexión interna total, Figura 2.2. Este fenómeno ocurre cuando un rayo de luz se propaga desde un medio con mayor índice de refracción hacia otro con menor índice de refracción y el ángulo de incidencia es mayor que un ángulo crítico. En una fibra óptica, el núcleo posee un índice de refracción n_1 mayor que el del revestimiento n_2 , por lo que la luz puede reflejarse repetidamente en la interfaz núcleo-revestimiento y avanzar a lo largo de la fibra sin escapar al exterior [30].

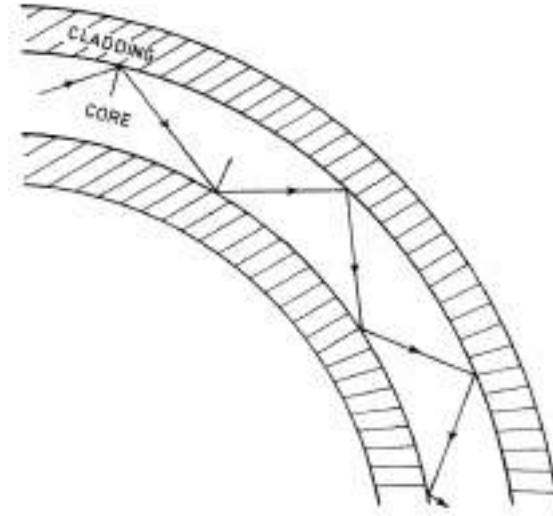


FIGURA 2.2: Representación de la reflexión interna total en una fibra óptica. La luz se propaga en zigzag dentro del núcleo, confinada por el revestimiento debido a la diferencia de índices de refracción entre ambos medios [31].

A partir de la ley de Snell,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$

el ángulo crítico θ_c se obtiene cuando el ángulo refractado es $\theta_2 = 90^\circ$. Por lo tanto:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

y el ángulo crítico queda definido como:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.5)$$

Para que ocurra reflexión interna total, el ángulo de incidencia en la interfaz núcleo-revestimiento debe ser mayor que θ_c . Esta condición es la base del confinamiento de la luz en fibras ópticas de índice escalonado.

2.1.3 APERTURA NUMÉRICA Y ÁNGULO DE ACEPTACIÓN

La apertura numérica, comúnmente representada como NA por sus siglas en inglés (*Numerical Aperture*), define la capacidad de una fibra óptica para aceptar luz desde una fuente externa. Está relacionada con el ángulo máximo de entrada para el cual un rayo puede acoplarse al núcleo y seguir propagándose por reflexión interna total.

Para una fibra rodeada por aire, la apertura numérica se expresa como:

$$\text{NA} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.6)$$

donde n_1 es el índice de refracción del núcleo y n_2 el índice de refracción del revestimiento. De manera general, si el medio externo tiene índice n_0 , entonces:

$$n_0 \sin \theta_a = \text{NA} \quad (2.7)$$

donde θ_a es el ángulo máximo de aceptación. Para el caso usual de acoplamiento desde aire, donde $n_0 \approx 1$, se tiene:

$$\theta_a = \sin^{-1}(\text{NA}) \quad (2.8)$$

Una mayor apertura numérica facilita el acoplamiento de luz hacia la fibra; sin embargo, en fibras multimodo también puede favorecer la propagación de un mayor número de modos, incrementando la dispersión modal [35].

2.1.4 TIPOS DE FIBRA: MONOMODO Y MULTIMODO

Las fibras ópticas pueden clasificarse según el número de modos que pueden propagarse en su interior. Un modo puede entenderse como una distribución estable del campo electromagnético que se propaga a lo largo de la fibra. Bajo esta clasificación, véase la Figura 2.3, existen dos tipos principales de fibra: monomodo y multimodo.

Las fibras monomodo poseen un núcleo pequeño, típicamente de 8 a 10 μm de diámetro, lo que permite la propagación de un solo modo fundamental. Debido a esto, presentan baja dispersión modal y son adecuadas para transmisión a largas

distancias y aplicaciones donde se requiere alta estabilidad de la señal. Por otro lado, las fibras multimodo tienen núcleos de mayor diámetro, comúnmente de 50 o 62.5 μm , permitiendo la propagación de múltiples modos. Esto facilita el acoplamiento de luz, pero produce dispersión modal debido a que los distintos modos recorren trayectorias ópticas diferentes [33].

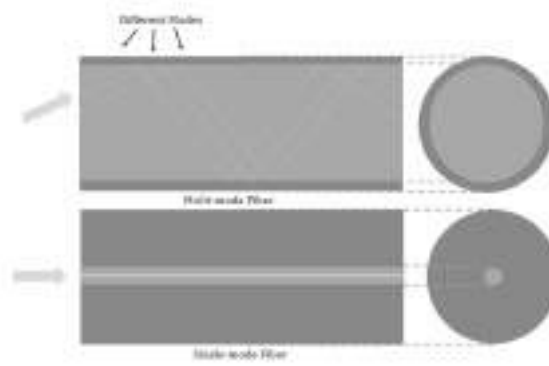


FIGURA 2.3: Comparación entre fibra óptica multimodo y monomodo. En la fibra multimodo, múltiples modos se propagan simultáneamente, mientras que en la fibra monomodo se propaga principalmente un solo modo, permitiendo mayor alcance y menor dispersión modal [32].

La condición modal de una fibra puede analizarse mediante la frecuencia normalizada o parámetro V , definido como:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{NA} \quad (2.9)$$

donde a es el radio del núcleo, λ es la longitud de onda de operación y NA es la apertura numérica de la fibra. Para una fibra de índice escalonado, la condición aproximada para operación monomodo es:

$$V < 2.405 \quad (2.10)$$

Cuando V es mayor que este valor, la fibra puede soportar más de un modo de propagación, comportándose como una fibra multimodo. Esta relación muestra que el comportamiento modal depende del radio del núcleo, de la longitud de onda y del contraste de índice entre núcleo y revestimiento.

2.1.5 PROPAGACIÓN MODAL E ÍNDICE EFECTIVO

Desde el punto de vista ondulatorio, la luz guiada en una fibra óptica se describe mediante modos de propagación. Cada modo posee una constante de propagación β , relacionada con el índice efectivo n_{eff} mediante:

$$\beta = k_0 n_{\text{eff}} \quad (2.11)$$

donde k_0 es el número de onda en el vacío:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.12)$$

El índice efectivo representa el índice de refracción que experimenta un modo al propagarse dentro de la fibra. Para modos guiados, su valor se encuentra entre los índices del núcleo y del revestimiento:

$$n_2 < n_{\text{eff}} < n_1 \quad (2.13)$$

Este concepto es importante en sensores de fibra óptica, especialmente en configuraciones interferométricas, ya que cambios externos en temperatura, deformación, presión o índice de refracción del medio pueden modificar el índice efectivo de los modos propagados. Como consecuencia, se producen variaciones en la fase óptica, en el acoplamiento modal o en el patrón espectral medido.

La fase acumulada por un modo al propagarse una distancia L puede escribirse como:

$$\phi = \beta L = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L \quad (2.14)$$

Por lo tanto, una variación en el índice efectivo o en la longitud física de la fibra genera un cambio de fase:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta(n_{\text{eff}} L) \quad (2.15)$$

Esta relación es fundamental para comprender el funcionamiento de sensores interferométricos de fibra óptica, como los interferómetros Mach-Zehnder, Fabry-Pérot y estructuras basadas en interferencia modal.

2.1.6 ATENUACIÓN

La atenuación representa la disminución de la potencia óptica conforme la luz se propaga a lo largo de la fibra. Este fenómeno puede ser causado por absorción del material, dispersión Rayleigh, curvaturas, empalmes, conectores o imperfecciones estructurales. La potencia óptica transmitida después de recorrer una longitud L puede expresarse como:

$$P(L) = P_0 e^{-\alpha L} \quad (2.16)$$

donde P_0 es la potencia inicial, $P(L)$ es la potencia después de recorrer la longitud L y α es el coeficiente de atenuación. En ingeniería óptica, la atenuación suele expresarse en decibels mediante:

$$A_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right) \quad (2.17)$$

y, si se desea expresar por unidad de longitud:

$$\alpha_{\text{dB}} = \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right) \quad (2.18)$$

donde P_{in} es la potencia de entrada, P_{out} la potencia de salida y L la longitud de la fibra. En sensores de fibra óptica, las pérdidas no solo afectan la intensidad de la señal detectada, sino también la relación señal-ruido y la estabilidad de la medición.

2.1.7 DISPERSIÓN

La dispersión es el fenómeno por el cual diferentes componentes de una señal óptica se propagan a diferentes velocidades, provocando el ensanchamiento temporal de los pulsos. Aunque este efecto es especialmente relevante en comunicaciones ópticas, también es importante en sensores, ya que puede modificar la respuesta espectral y temporal del sistema [34].

Los tipos principales de dispersión en fibras ópticas son:

1. Dispersión modal:

Ocurre en fibras multimodo debido a que los diferentes modos recorren trayectorias ópticas distintas y llegan al detector en tiempos diferentes.

2. Dispersión cromática:

Se debe a que el índice de refracción del material depende de la longitud de onda, por lo que distintas componentes espectrales viajan con velocidades diferentes.

3. Dispersión por guía de onda:

Surge de la dependencia de la propagación modal con la geometría de la fibra y la distribución del campo entre núcleo y revestimiento.

4. Dispersión por modo de polarización:

Aparece cuando dos estados de polarización se propagan con velocidades ligeramente diferentes debido a birrefringencia o asimetrías en la fibra.

La dispersión cromática suele expresarse mediante el parámetro D :

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau}{d\lambda} \quad (2.19)$$

donde τ es el retardo temporal de grupo, λ la longitud de onda y L la longitud de propagación. En términos prácticos, este parámetro indica cuánto se ensancha temporalmente una señal por unidad de longitud y por unidad de ancho espectral.

2.2 INTERFEROMETRÍA MACH-ZEHNDER EN FIBRA ÓPTICA CON CONFIGURACIÓN EN CASCADA

La interferometría en fibra óptica constituye una de las estrategias más utilizadas para el desarrollo de sensores de alta sensibilidad, debido a que permite convertir pequeñas perturbaciones físicas o químicas en cambios medibles de fase, intensidad o longitud de onda. Dentro de estas configuraciones, el interferómetro Mach-Zehnder (MZI, por sus siglas en inglés) destaca por su capacidad para generar interferencia entre dos trayectorias ópticas con diferente fase acumulada. En sistemas de fibra óptica, estas trayectorias pueden corresponder a brazos físicos separados o, en configuraciones en línea, a diferentes modos de propagación excitados dentro de una misma fibra.

En el contexto de sensores ópticos, el MZI resulta especialmente atractivo porque variables como temperatura, deformación, curvatura, presión o índice de refracción externo pueden modificar el índice efectivo de los modos propagados o la

longitud óptica del sistema. Como consecuencia, se produce un desplazamiento en el patrón de interferencia, el cual puede ser utilizado para cuantificar la variable de interés. Cuando esta configuración se implementa en cascada, es decir, mediante varias regiones interferométricas conectadas secuencialmente en una sola fibra, se incrementa la interacción de la luz con la estructura sensora y se amplían las posibilidades de detección.

2.2.1 PRINCIPIO DE INTERFERENCIA ÓPTICA

La interferometría se basa en el principio de superposición de ondas. Cuando dos haces de luz coherente se recombinan, la intensidad resultante depende de la diferencia de fase entre ellos. Para dos ondas con intensidades I_1 e I_2 , la intensidad total puede expresarse como:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (2.20)$$

donde $\Delta\phi$ representa la diferencia de fase entre las ondas que interfieren. Si la diferencia de fase es un múltiplo par de π , ocurre interferencia constructiva; mientras que, si corresponde a un múltiplo impar de π , se produce interferencia destructiva. Esta dependencia de la intensidad con la fase es la base del funcionamiento de los sensores interferométricos.

La fase óptica acumulada por una onda al propagarse en un medio de longitud L e índice de refracción efectivo n_{eff} está dada por:

$$\phi = \frac{2\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda} \quad (2.21)$$

donde λ es la longitud de onda en el vacío. A partir de esta expresión, puede observarse que cualquier variación en n_{eff} , en L o en λ modifica la fase acumulada por la onda. Por esta razón, los interferómetros de fibra óptica son altamente sensibles a perturbaciones externas que alteran la longitud óptica del sistema.

2.2.2 INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER EN FIBRA ÓPTICA

En un interferómetro Mach-Zehnder convencional, la luz se divide en dos trayectorias: un brazo de referencia y un brazo de sensado. Posteriormente, ambos haces

se recombinan, generando un patrón de interferencia que depende de la diferencia de fase acumulada entre las dos trayectorias. En fibra óptica, esta configuración puede implementarse mediante acopladores, divisores de haz o estructuras en línea que excitan diferentes modos dentro de la misma fibra.

La diferencia de fase entre dos trayectorias ópticas puede expresarse como:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \quad (2.22)$$

donde Δn_{eff} es la diferencia entre los índices efectivos de las trayectorias o modos que interfieren, y L es la longitud de la región interferométrica. En sensores MZI de fibra óptica, una perturbación externa puede modificar Δn_{eff} o L , provocando un corrimiento espectral en los máximos o mínimos de interferencia.

Existen dos enfoques generales para implementar un MZI en fibra óptica, Figura 2.4. En el primero, se utilizan dos brazos físicamente separados: uno de referencia y otro expuesto a la perturbación. En el segundo, conocido como interferómetro en línea, la interferencia ocurre dentro de una sola fibra mediante el acoplamiento entre el modo del núcleo y modos del revestimiento. Esta última configuración es particularmente útil para sensores compactos, robustos y de fácil integración.

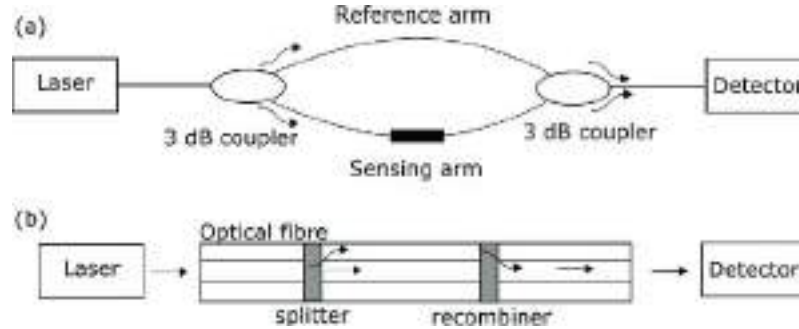


FIGURA 2.4: a) Esquema de un MZI que utiliza dos fibras; b) esquema de un interferómetro Mach-Zehnder en línea que utiliza una sola fibra [65].

2.2.3 INTERFEROMETRÍA EN CASCADA

La interferometría en cascada consiste en implementar múltiples estructuras interferométricas conectadas secuencialmente a lo largo de una misma fibra óptica. En esta configuración, la señal óptica interactúa con distintas regiones sensibles, generando una respuesta espectral que puede analizarse para obtener información de uno o varios puntos de medición [66, 67].

En comparación con una configuración interferométrica convencional, la interferometría en cascada puede ofrecer mayor versatilidad y capacidad de monitoreo distribuido o multiparamétrico, Tabla 2.1. Esto resulta útil en aplicaciones donde se requiere seguimiento continuo de variables físicas o químicas a lo largo de estructuras extensas, tuberías, redes eléctricas o sistemas de monitoreo ambiental.

TABLA 2.1: Comparación entre interferometría convencional e interferometría en cascada.

Característica	Interferometría convencional	Interferometría en cascada
Configuración	Un único interferómetro en la fibra.	Múltiples interferómetros conectados secuencialmente.
Puntos de medición	Limitado a una región específica.	Puede distribuirse a lo largo de la fibra.
Complejidad	Menor, debido a su configuración sencilla.	Mayor, debido a la gestión de múltiples regiones interferométricas.
Aplicaciones	Medición puntual de variables físicas.	Monitoreo distribuido o multiparamétrico.

La principal ventaja de una configuración en cascada es que permite aumentar el número de regiones donde la luz puede acoplarse, desacoplarse o interactuar con el medio externo. Esto puede incrementar la sensibilidad del sistema; sin embargo, también puede volver más complejo el análisis del espectro, debido a la superposición de respuestas interferométricas provenientes de distintas secciones.

2.2.4 INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER EN CASCADA CON DESPLAZAMIENTO DE NÚCLEO

Una forma común de fabricar interferómetros Mach-Zehnder en línea es mediante empalmes por fusión con desplazamiento lateral del núcleo, técnica conocida como *core-offset*. En esta configuración, dos fibras monomodo se empalman con una desalineación intencional entre sus núcleos. Esta discontinuidad permite que parte de la luz que viaja en el modo fundamental del núcleo se acople hacia modos del reves-

timiento. Posteriormente, en otro empalme desplazado, los modos del revestimiento pueden acoplarse nuevamente al modo del núcleo, generando interferencia.

En un segmento interferométrico, la diferencia de fase entre el modo del núcleo y un modo del revestimiento puede modelarse como:

$$\Delta\phi_i = \frac{2\pi(n_{co} - n_{cl})L_i}{\lambda} \quad (2.23)$$

donde n_{co} es el índice efectivo del modo del núcleo, n_{cl} es el índice efectivo del modo del revestimiento, L_i es la longitud del segmento interferométrico y λ es la longitud de onda de operación.

Para un sistema con N secciones interferométricas en cascada, la intensidad total puede representarse de forma general como la superposición de las contribuciones de cada sección:

$$I_{total} = \left| \sum_{i=1}^N A_i e^{j\Delta\phi_i} \right|^2 \quad (2.24)$$

donde A_i representa la amplitud relativa asociada a cada sección interferométrica. Esta expresión muestra que la respuesta final del sensor depende tanto de las fases acumuladas como de las amplitudes relativas de los modos que interfieren.

2.2.5 RANGO ESPECTRAL LIBRE Y SENSIBILIDAD

Uno de los parámetros más importantes en un interferómetro de fibra óptica es el rango espectral libre, o FSR por sus siglas en inglés (*Free Spectral Range*). El FSR describe la separación espectral entre máximos o mínimos consecutivos del patrón de interferencia. Para un MZI en fibra óptica, puede aproximarse como:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff} L} \quad (2.25)$$

donde Δn_{eff} es la diferencia de índice efectivo entre los modos que interfieren y L es la longitud del segmento interferométrico. En algunos casos, dependiendo de la definición empleada para la condición de fase, esta relación puede escribirse con un factor 2 en el denominador:

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{2\Delta n_{\text{eff}}L} \quad (2.26)$$

De acuerdo con estas expresiones, un aumento en la longitud interferométrica L produce una disminución del FSR, lo que significa que los picos o valles del espectro aparecen más cercanos entre sí. Por el contrario, una reducción en L incrementa la separación espectral. Este comportamiento es importante en el diseño del sensor, ya que permite ajustar la resolución espectral y evitar solapamientos excesivos entre las franjas de interferencia.

La sensibilidad espectral de un interferómetro puede definirse como el desplazamiento de una longitud de onda característica ante una variable externa X , por ejemplo temperatura, curvatura, presión o índice de refracción. De forma general, puede escribirse como:

$$S = \frac{d\lambda}{dX} \quad (2.27)$$

Si la perturbación modifica la diferencia de índice efectivo entre los modos, la sensibilidad puede relacionarse con:

$$\frac{d\lambda}{dX} = \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{d(\Delta n_{\text{eff}})}{dX} \quad (2.28)$$

Esta relación muestra que la sensibilidad depende de qué tanto cambia la diferencia de índice efectivo ante la variable de interés. Por ello, técnicas como el desplazamiento de núcleo, el adelgazamiento de fibra, el uso de fibras especiales o la aplicación de recubrimientos funcionales pueden incrementar la respuesta del sensor al favorecer una mayor interacción entre los modos guiados y el entorno.

2.3 ESPECTROSCOPÍA DE ABSORCIÓN MOLECULAR EN EL INFRARROJO

La espectroscopía de absorción molecular en el infrarrojo es una técnica utilizada para identificar y cuantificar especies químicas a partir de la interacción entre la radiación electromagnética y los niveles de energía internos de las moléculas. Cuando una molécula es irradiada con luz cuya energía coincide con la diferencia entre dos estados moleculares permitidos, puede ocurrir una transición energética y, como

consecuencia, parte de la radiación incidente es absorbida. Esta absorción se manifiesta como una disminución de la intensidad transmitida en longitudes de onda específicas, las cuales dependen de la estructura molecular de la especie analizada.

En gases como el metano (CH_4), las transiciones más relevantes en el infrarrojo están asociadas principalmente a movimientos vibracionales de los enlaces C–H, acompañados por estructura rotacional. Por esta razón, el espectro de absorción del metano no está formado por una única línea aislada, sino por un conjunto de líneas roto-vibracionales agrupadas en bandas. Estas bandas permiten reconocer regiones espectrales donde el metano absorbe con mayor intensidad y, por lo tanto, donde resulta conveniente seleccionar una fuente óptica para su detección.

En el presente trabajo, la espectroscopía de absorción molecular constituye la base física que justifica el uso de un láser en la región cercana a 1653 nm. Esta longitud de onda se encuentra dentro de una banda de absorción del metano en el infrarrojo cercano, lo cual permite que la radiación emitida por el láser interactúe con el gas dentro de la cavidad experimental. Al mismo tiempo, el interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica actúa como elemento transductor, ya que su espectro de transmisión puede modificarse ante cambios en el medio circundante, pérdidas ópticas o variaciones en las condiciones de propagación de los modos que interfieren.

2.3.1 MODOS VIBRACIONALES DEL METANO

El metano es una molécula tetraédrica de alta simetría perteneciente al grupo puntual T_d . Su estructura molecular está formada por un átomo de carbono central enlazado a cuatro átomos de hidrógeno. Debido a esta geometría, la molécula presenta modos vibracionales característicos asociados a movimientos colectivos de estiramiento y flexión de los enlaces C–H.

Los cuatro modos vibracionales fundamentales del metano son:

- ν_1 : estiramiento simétrico, asociado al modo A_1 , localizado aproximadamente en 2917 cm^{-1} .
- ν_2 : flexión simétrica, asociada al modo E , localizada aproximadamente en 1534 cm^{-1} .
- ν_3 : estiramiento asimétrico, asociado al modo F_2 , localizado aproximadamente en 3019 cm^{-1} .

- ν_4 : flexión asimétrica, asociada al modo F_2 , localizada aproximadamente en 1306 cm^{-1} .

No todos los modos vibracionales presentan la misma actividad espectroscópica. En particular, los modos ν_3 y ν_4 son activos en el infrarrojo, por lo que contribuyen de forma importante a la absorción del metano. El modo ν_3 , correspondiente al estiramiento asimétrico C-H, genera una banda intensa en el infrarrojo medio alrededor de $3.3\text{ }\mu\text{m}$. Aunque esta región presenta absorción fuerte, requiere fuentes y detectores ópticos más especializados.

Por otro lado, el primer sobretono del modo ν_3 , denotado como $2\nu_3$, aparece en la región del infrarrojo cercano, alrededor de $1.65\text{ }\mu\text{m}$, equivalente a aproximadamente 6000 cm^{-1} . Aunque esta banda es menos intensa que la banda fundamental en $3.3\text{ }\mu\text{m}$, resulta muy atractiva para sensores basados en fibra óptica debido a la disponibilidad de láseres DFB, componentes de telecomunicaciones y detectores compatibles con esta ventana espectral.

2.3.2 BANDAS DE ABSORCIÓN DEL METANO

El espectro de absorción del metano puede representarse en función del número de onda $\tilde{\nu}$, expresado en cm^{-1} . Esta variable es ampliamente utilizada en espectroscopía molecular debido a que es directamente proporcional a la energía de la radiación. En una gráfica de intensidad espectral contra número de onda, las regiones donde se agrupan líneas de mayor intensidad corresponden a bandas de absorción características del gas.

La Figura 2.5 muestra el espectro de intensidad espectral del metano obtenido a partir de datos de HITRAN. En ella se observan varias bandas de absorción asociadas a transiciones roto-vibracionales. Cada punto o línea representa una transición específica, con una posición espectral e intensidad determinada. Las regiones con mayor densidad de líneas indican zonas donde el metano puede absorber radiación de manera más significativa.

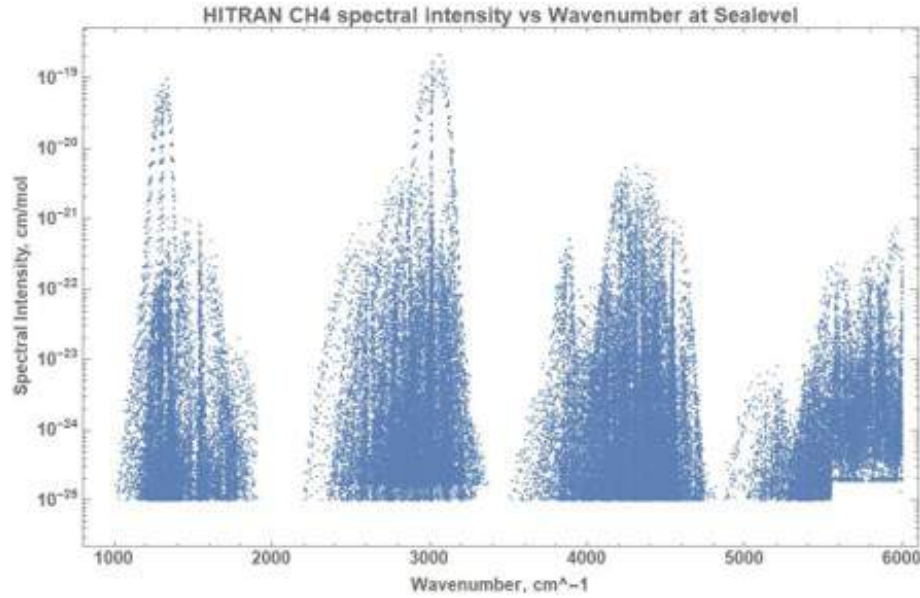


FIGURA 2.5: Espectro de intensidad espectral del metano (CH_4) en función del número de onda, generado a partir de la base de datos HITRAN. Se observan las principales bandas de absorción asociadas a transiciones roto-vibracionales de la molécula.

Las principales bandas consideradas para el metano en el intervalo mostrado son:

1. Banda a:
De 1188.919 a 1397.038 cm^{-1} , equivalente aproximadamente a $7.158\text{--}8.411 \mu\text{m}$.
2. Banda b:
De 2428.953 a 3183.699 cm^{-1} , equivalente aproximadamente a $3.141\text{--}4.117 \mu\text{m}$.
3. Banda c:
De 4103.405 a 4627.487 cm^{-1} , equivalente aproximadamente a $2.161\text{--}2.437 \mu\text{m}$.
4. Banda d:
De 5882.352 a 6250.258 cm^{-1} , equivalente aproximadamente a $1.625\text{--}1.712 \mu\text{m}$.

La banda d es la más relevante para este trabajo, ya que contiene líneas de absorción del metano en la región del infrarrojo cercano. Esta zona coincide con la longitud de onda de operación del láser DFB1653P, cuya emisión se encuentra alrededor de 1653.7 nm . Por esta razón, el uso de esta fuente óptica permite trabajar dentro de una región espectral donde el metano presenta absorción molecular.

2.3.3 RELACIÓN ENTRE NÚMERO DE ONDA Y LONGITUD DE ONDA

En espectroscopía es común expresar la posición de una transición mediante el número de onda $\tilde{\nu}$, definido como el inverso de la longitud de onda:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}, \quad (2.29)$$

donde $\tilde{\nu}$ se expresa en cm^{-1} cuando λ se expresa en centímetros. Para convertir de número de onda a longitud de onda en nanómetros se utiliza:

$$\lambda [\text{nm}] = \frac{10^7}{\tilde{\nu} [\text{cm}^{-1}]}. \quad (2.30)$$

De forma inversa, para una longitud de onda expresada en nanómetros:

$$\tilde{\nu} [\text{cm}^{-1}] = \frac{10^7}{\lambda [\text{nm}]}. \quad (2.31)$$

Por ejemplo, para una longitud de onda de operación cercana a 1653.7 nm se obtiene:

$$\tilde{\nu} \approx \frac{10^7}{1653.7} \approx 6047 \text{ cm}^{-1}. \quad (2.32)$$

Este valor se encuentra dentro de la banda d del metano, lo cual confirma que la fuente láser utilizada opera en una región espectral adecuada para la detección de este gas.

2.3.4 TRANSICIONES VIBRACIONALES Y ROTACIONALES

La absorción infrarroja del metano se explica mediante transiciones entre niveles de energía molecular. De manera aproximada, la energía vibracional de una molécula puede escribirse como:

$$E_v = \sum_i \left(v_i + \frac{1}{2} \right) h\nu_i, \quad (2.33)$$

donde v_i es el número cuántico vibracional del modo i , ν_i es la frecuencia fundamental de dicho modo y h es la constante de Planck.

Además del movimiento vibracional, las moléculas gaseosas presentan niveles rotacionales. Bajo el modelo de rotor rígido, la energía rotacional se expresa como:

$$E_J = BJ(J + 1), \quad (2.34)$$

donde J es el número cuántico rotacional y B es la constante rotacional. Esta constante puede escribirse como:

$$B = \frac{h}{8\pi^2 Ic}, \quad (2.35)$$

donde I es el momento de inercia molecular y c es la velocidad de la luz.

La energía total de un nivel roto-vibracional puede aproximarse como la suma de la contribución vibracional y rotacional:

$$E_{v,J} = E_v + E_J. \quad (2.36)$$

Las transiciones permitidas dependen de reglas de selección. Para transiciones vibracionales fundamentales suele considerarse $\Delta v = \pm 1$, mientras que para transiciones rotacionales asociadas se tienen cambios en el número cuántico rotacional, típicamente $\Delta J = \pm 1$. Estas transiciones dan lugar a las ramas P y R del espectro roto-vibracional. En moléculas reales, además de las transiciones fundamentales, también pueden observarse sobretonos y bandas de combinación, como ocurre en la región cercana a $1.65 \mu\text{m}$ del metano.

Un aspecto importante para que una molécula absorba radiación infrarroja es que la vibración produzca un cambio en su momento dipolar. Como se ilustra en la Figura 2.6, el momento dipolar puede entenderse como una separación parcial de cargas dentro de la molécula, representada por una región con carga parcial positiva y otra con carga parcial negativa. Cuando la molécula vibra o rota, la distribución de carga puede modificarse; si dicha modificación genera un cambio temporal en el momento dipolar, la molécula puede interactuar con el campo electromagnético de la radiación infrarroja y absorber energía.

En este sentido, las transiciones infrarrojas no dependen únicamente de la energía disponible entre niveles vibracionales o rotacionales, sino también de que el

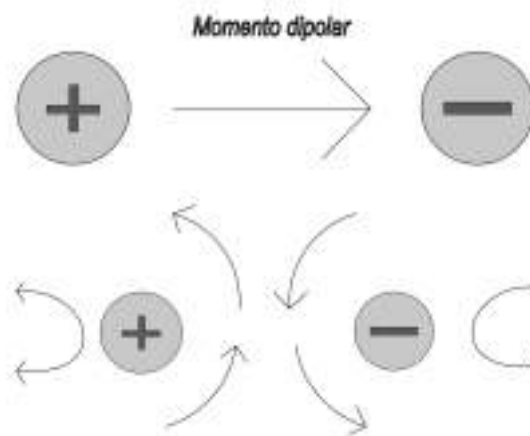


FIGURA 2.6: Representación esquemática del momento dipolar molecular. La separación parcial de cargas y su variación durante los movimientos vibracionales o rotacionales permiten la interacción de la molécula con la radiación infrarroja.

movimiento molecular sea activo en el infrarrojo. Es decir, debe existir una variación del momento dipolar durante la vibración. Esta condición permite explicar por qué ciertas transiciones moleculares presentan absorción intensa, mientras que otras pueden ser débiles o incluso no observarse en el espectro infrarrojo.

2.3.5 LEY DE BEER–LAMBERT

La disminución de intensidad óptica producida por la absorción molecular puede describirse mediante la ley de Beer–Lambert. En forma logarítmica, la absorbancia se define como:

$$A = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon c L, \quad (2.37)$$

donde A es la absorbancia, I_0 es la intensidad incidente, I es la intensidad transmitida, ε es el coeficiente de absorción molar, c es la concentración del gas y L es la longitud del trayecto óptico.

Esta ecuación indica que la absorbancia aumenta cuando incrementa la concentración del gas o cuando la luz recorre una mayor distancia dentro del medio absorbente. En otras palabras, si hay más moléculas de metano presentes en el trayecto óptico, existe una mayor probabilidad de que la radiación sea absorbida. De la misma manera, si la longitud de interacción es mayor, la luz tiene más oportunidad

de interactuar con las moléculas del gas antes de llegar al detector.

También puede expresarse en forma exponencial:

$$I(\tilde{\nu}) = I_0 \exp[-\alpha(\tilde{\nu})L], \quad (2.38)$$

donde $\alpha(\tilde{\nu})$ es el coeficiente de absorción espectral en función del número de onda. Esta forma permite describir directamente cómo cambia la intensidad transmitida. Cuando $\alpha(\tilde{\nu})L$ aumenta, el término exponencial disminuye y, por lo tanto, la intensidad transmitida I es menor. Esto significa que la señal detectada se reduce cuando el gas absorbe más energía óptica.

El coeficiente $\alpha(\tilde{\nu})$ depende de la región espectral utilizada. Si la fuente óptica opera en una longitud de onda donde el metano presenta una absorción significativa, el valor de $\alpha(\tilde{\nu})$ será mayor y la disminución de intensidad será más evidente. En cambio, si la fuente se encuentra fuera de una banda de absorción del metano, el valor de $\alpha(\tilde{\nu})$ será pequeño y la reducción de intensidad puede ser difícil de observar.

En el contexto de este trabajo, esta ley permite entender por qué resulta importante utilizar una fuente óptica cuya longitud de onda coincida con una banda de absorción del metano. Si el láser opera en una región donde $\alpha(\tilde{\nu})$ es distinto de cero, la presencia de metano puede producir una reducción en la intensidad transmitida o una modificación en la respuesta espectral registrada.

2.3.6 RELACIÓN CON EL SENSOR INTERFEROMÉTRICO MZI

El sistema desarrollado no se basa únicamente en la absorción directa de la luz por el metano, sino en la combinación de una fuente óptica ubicada en una región de absorción molecular y una estructura interferométrica sensible a cambios ópticos. El interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica genera un patrón de transmisión que depende de la diferencia de fase entre los modos que se propagan dentro de la estructura.

En un MZI de fibra óptica, parte de la luz puede propagarse por el núcleo, mientras que otra parte puede acoplarse a modos del revestimiento o modos sensibles al entorno. Al recombinarse, estos modos interfieren entre sí, generando máximos y mínimos en el espectro de transmisión. La condición de interferencia depende de la diferencia de fase acumulada:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} L, \quad (2.39)$$

donde Δn_{eff} es la diferencia entre los índices efectivos de los modos que interfieren y L es la longitud efectiva de interacción.

Cuando el sensor se coloca dentro de una cavidad con metano, el gas puede influir en la respuesta óptica del sistema. Esta influencia puede estar asociada a absorción molecular en la región de operación del láser, a cambios en las pérdidas ópticas o a modificaciones del índice efectivo de los modos sensibles al medio circundante. Como resultado, el espectro de transmisión del MZI puede presentar cambios en intensidad, desplazamientos espectrales o variaciones en la forma de las franjas interferométricas.

Por lo tanto, la función del MZI es traducir la interacción óptica entre la radiación y el gas en una señal espectral medible. La selección de un láser alrededor de 1653 nm permite trabajar en una región donde el metano presenta absorción, mientras que la cavidad proporciona un entorno controlado para exponer el sensor a concentraciones conocidas de gas.

De manera esquemática, el principio de detección puede entenderse como:

$$\text{CH}_4 + \lambda = 1653 \text{ nm} \rightarrow \text{interacción óptica} \rightarrow \text{atenuación en el espectro}$$

Esta relación permite vincular el marco teórico de espectroscopía molecular con los resultados experimentales obtenidos mediante el sensor interferométrico.

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

3.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER EN COMSOL

Como parte del desarrollo metodológico del sensor, se realizó una simulación numérica del interferómetro Mach-Zehnder (MZI) de fibra óptica utilizando COMSOL Multiphysics. El objetivo de esta simulación fue analizar la propagación del campo electromagnético dentro de la estructura interferométrica y obtener una aproximación numérica de su respuesta espectral. Esta etapa permitió estudiar el efecto del desplazamiento de núcleo (*core-offset*) sobre el acoplamiento modal y la formación de franjas de interferencia.

3.1.1 MODELO GEOMÉTRICO

Con el fin de reducir el costo computacional de la simulación, no se modeló el interferómetro con las dimensiones completas del dispositivo experimental. En la Figura 3.1 se muestra la comparación entre la geometría real del MZI y la geometría simplificada utilizada en COMSOL. La versión experimental del sensor tiene una longitud física mayor; sin embargo, simular toda esa longitud en tres dimensiones requeriría una cantidad muy elevada de elementos de malla, debido a que la longitud de onda óptica se encuentra en el orden de micrómetros. Por esta razón, se utilizó una geometría reducida, conservando únicamente las regiones necesarias para representar el fenómeno de propagación e interferencia modal.

La simplificación consistió en mantener la estructura esencial del interferómetro: el núcleo, el revestimiento, la región de fibra adelgazada y las zonas donde se

introduce el desplazamiento de núcleo (*core-offset*). Aunque las dimensiones longitudinales fueron reducidas respecto al sensor fabricado, las dimensiones transversales principales de la fibra, como el diámetro del núcleo y del revestimiento, se conservaron de acuerdo con los valores utilizados en el modelo. De esta forma, la simulación no buscó reproducir exactamente la longitud total del sensor experimental, sino representar de manera aproximada el mecanismo físico responsable de la interferencia: el acoplamiento de luz entre el modo fundamental y modos de revestimiento debido al desplazamiento de núcleo.

Por lo tanto, las medidas mostradas en la Figura 3.1 corresponden a una geometría escalada en longitud para fines numéricos. Esta reducción permitió obtener una simulación viable en COMSOL, disminuyendo el número de elementos de malla y el tiempo de cálculo, sin eliminar las regiones físicas relevantes para analizar la redistribución del campo eléctrico y la formación del patrón interferométrico.

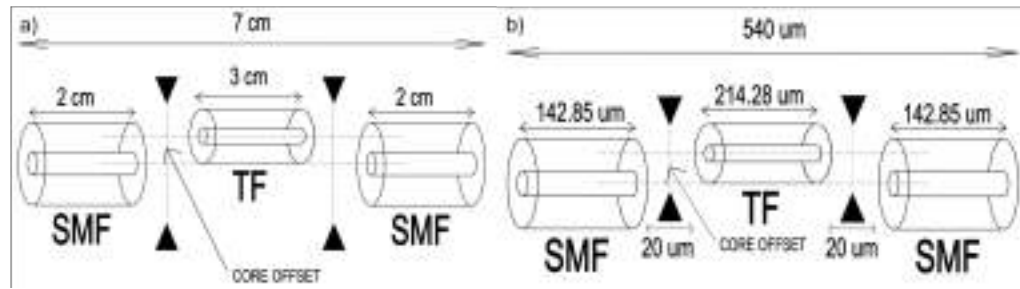


FIGURA 3.1: Comparación entre la geometría real y la geometría simplificada del interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica.

3.1.2 IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRÍA EN COMSOL

Una vez generado el modelo en SolidWorks, la geometría fue exportada en formato STEP e importada en COMSOL Multiphysics, Figura 3.2. Después de la importación, se verificó la continuidad de los dominios, la correcta definición de las unidades y la ausencia de errores geométricos que pudieran afectar el mallado o la solución numérica.

Esta verificación fue necesaria para asegurar que las interfaces entre núcleo, revestimiento y regiones externas estuvieran correctamente definidas. Una geometría mal importada puede generar discontinuidades, dominios abiertos o superficies no válidas, lo cual afecta directamente la estabilidad de la simulación.

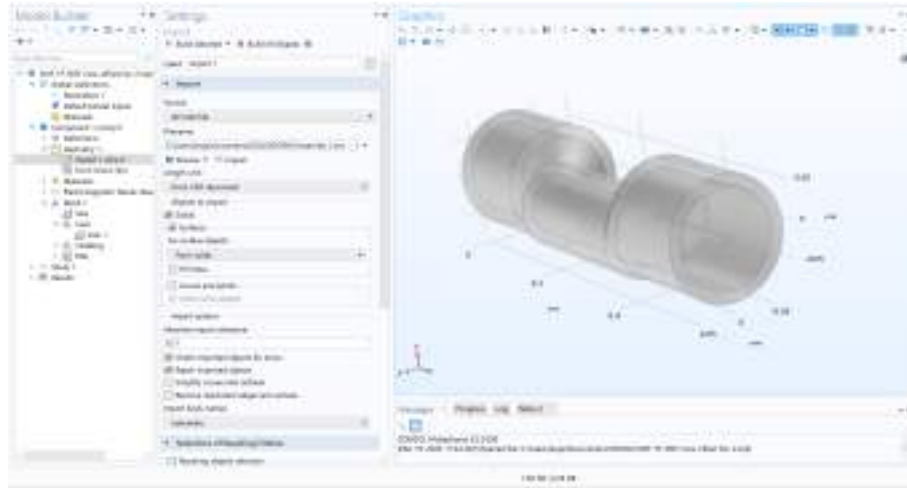


FIGURA 3.2: Importación del modelo tridimensional del interferómetro en COMSOL Multiphysics mediante archivo CAD tipo STEP.

3.1.3 DEFINICIÓN DE MATERIALES

A cada dominio del modelo se le asignaron propiedades ópticas de acuerdo con la región correspondiente de la fibra. Los parámetros principales considerados fueron los índices de refracción del núcleo y del revestimiento. La región PML fue definida con el mismo índice del revestimiento, con el objetivo de absorber los campos radiativos que alcanzan los límites del dominio computacional.

Región	Índice de refracción
Núcleo (n_{core})	1.450
Revestimiento (n_{clad})	1.444
PML	1.444

TABLA 3.1: Índices de refracción asignados a los dominios del modelo numérico.

La diferencia entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento permite modelar el confinamiento del modo óptico dentro de la fibra. Además, esta asignación es necesaria para describir el acoplamiento modal producido en la región de desplazamiento de núcleo.

3.1.4 MODELO FÍSICO IMPLEMENTADO

La propagación de la luz fue modelada mediante la interfaz *Electromagnetic Waves, Beam Envelopes* (ewbe) de COMSOL Multiphysics. Esta formulación permite resolver la propagación electromagnética separando la variación rápida de la fase óptica de la envolvente espacial del campo eléctrico. Esto resulta conveniente para estructuras de fibra óptica, donde la longitud física del dispositivo puede ser mucho mayor que la longitud de onda.

La ecuación base empleada por la interfaz puede escribirse como:

$$(\nabla - i\mathbf{k}_1) \times [(\nabla - i\mathbf{k}_1) \times \mathbf{E}_1] - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E}_1 = 0, \quad (3.1)$$

donde $\mathbf{E}_1$ representa la envolvente del campo eléctrico, $\mathbf{k}_1$ es el vector de onda de referencia, $k_0 = 2\pi/\lambda$ es el número de onda en el vacío y ε_r es la permitividad relativa del medio.

La relación entre el campo total y su envolvente se expresa como:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r})e^{-i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}}. \quad (3.2)$$

Esta aproximación reduce el costo computacional, ya que no es necesario resolver directamente todas las oscilaciones rápidas del campo óptico. En el caso del MZI, esta formulación permite analizar la propagación guiada, el acoplamiento entre modos y la evolución de la señal transmitida.

3.1.5 CONDICIONES DE EXCITACIÓN

Para excitar y medir la respuesta del interferómetro se definieron dos puertos ópticos, Figura 3.3.

- Puerto 1: puerto de entrada utilizado para excitar el modo óptico fundamental.
- Puerto 2: puerto de salida utilizado para calcular la transmisión del sistema.

A partir de estos puertos se obtuvo el parámetro de transmisión S_{21} , el cual relaciona la señal transmitida con la señal incidente. Este parámetro fue utilizado posteriormente para obtener el espectro de transmisión del MZI.

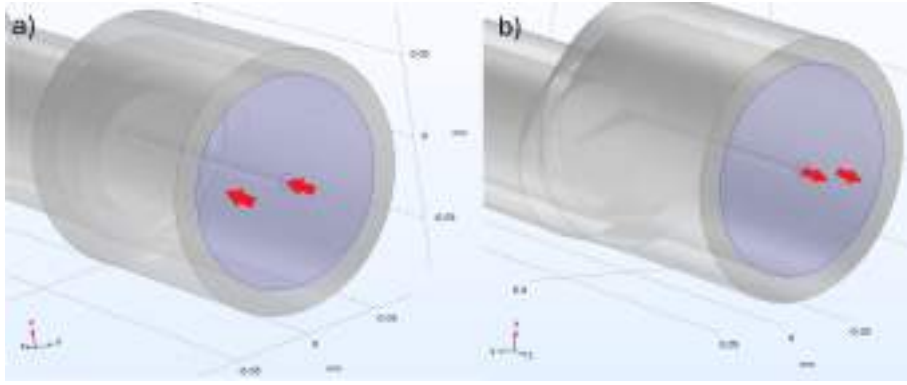


FIGURA 3.3: Definición de los puertos de entrada y salida utilizados en el modelo electromagnético del interferómetro.

3.1.6 CONDICIONES DE FRONTERA

Para evitar reflexiones artificiales en los límites del dominio computacional, se implementaron condiciones de frontera tipo *Perfectly Matched Layer* (PML). Estas regiones absorbentes permiten simular un dominio abierto, de modo que los campos radiativos o modos no guiados puedan salir del sistema sin reflejarse hacia la región de interés.

El uso de PML es importante en el modelo del MZI debido a que, en la región de *core-offset*, parte de la energía óptica puede acoplarse hacia modos del revestimiento o modos radiativos. Si estos campos alcanzaran los límites del dominio y se reflejaran, podrían introducir interferencias numéricas no físicas y modificar artificialmente el espectro calculado.

Por lo tanto, las regiones PML permiten mejorar la estabilidad y la confiabilidad del modelo, especialmente en una estructura interferométrica sensible a variaciones de fase y amplitud.

3.1.7 MALLADO DEL DOMINIO COMPUTACIONAL

El dominio tridimensional fue discretizado mediante elementos finitos tetraédricos, Figura 3.4. Se aplicó un refinamiento local en las regiones donde se espera una mayor variación del campo electromagnético, principalmente en el núcleo, en las interfaces núcleo-revestimiento y en las zonas de desplazamiento de núcleo.

El tamaño máximo de los elementos se seleccionó considerando el criterio de resolución espacial para ondas electromagnéticas:

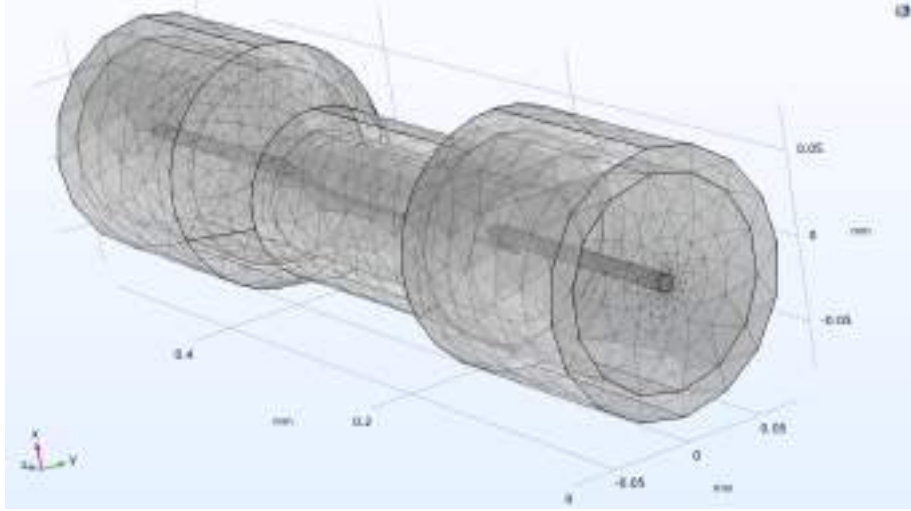


FIGURA 3.4: Mallado tridimensional del modelo del interferómetro Mach-Zehnder en COMSOL Multiphysics.

$$h < \frac{\lambda_0}{5n}, \quad (3.3)$$

donde h es el tamaño del elemento de malla, λ_0 es la longitud de onda en el vacío y n es el índice de refracción del medio. Este criterio permite resolver adecuadamente la longitud de onda efectiva dentro del material, dada por $\lambda = \lambda_0/n$.

Una malla suficientemente fina es necesaria para calcular correctamente la fase y la amplitud del campo óptico. Si el tamaño del elemento es demasiado grande, pueden aparecer errores en la constante de propagación, en la distribución del campo y en el espectro de transmisión.

3.1.8 CONFIGURACIÓN DEL ESTUDIO NUMÉRICO

El estudio se configuró en el dominio de la frecuencia, utilizando un barrido paramétrico de longitud de onda, Figura 3.5. El intervalo considerado fue de:

$$1.50 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.60 \mu\text{m}. \quad (3.4)$$

Este rango fue seleccionado con el fin de analizar la respuesta espectral del MZI alrededor de la región de interés experimental. El barrido permitió calcular la transmisión del sistema para diferentes longitudes de onda y obtener el espectro

interferométrico correspondiente.

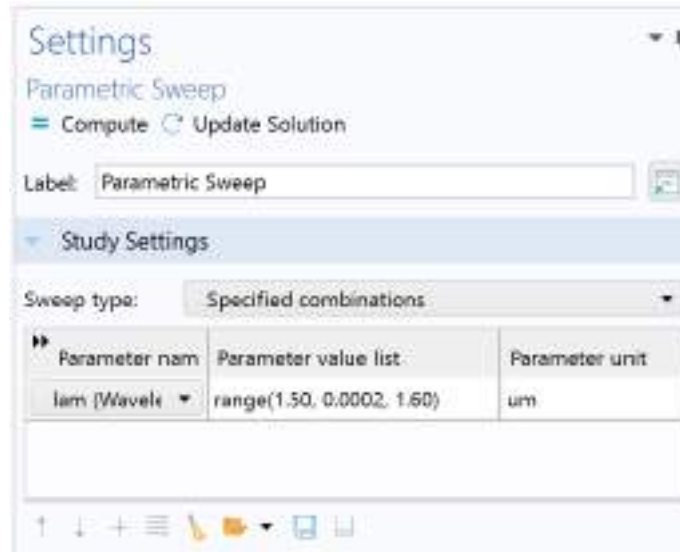


FIGURA 3.5: Configuración del barrido paramétrico en longitud de onda utilizado para obtener la respuesta espectral del MZI.

3.1.9 OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE TRANSMISIÓN

El espectro de transmisión se obtuvo a partir del parámetro S_{21} calculado entre el puerto de entrada y el puerto de salida. La transmisión en decibeles fue calculada mediante:

$$T_{dB} = 20 \log_{10} (|S_{21}|). \quad (3.5)$$

Esta expresión permite representar la magnitud de la señal transmitida en escala logarítmica, facilitando la identificación de máximos y mínimos de transmisión asociados al patrón interferométrico.

Los datos generados por COMSOL fueron exportados para su análisis posterior. Esta información se utilizó en el Capítulo 4 para interpretar la distribución del campo eléctrico, el espectro de transmisión simulado y su comparación con los resultados experimentales.

3.2 INFRAESTRUCTURA EXPERIMENTAL

El sistema está conformado por una fuente de radiación infrarroja basada en el diodo láser DFB1653P, una cavidad de gas diseñada para alojar el sensor, el interferómetro MZI fabricado en fibra óptica y el arreglo de integración necesario para realizar las mediciones.

La finalidad de esta infraestructura fue generar un entorno controlado donde el sensor pudiera interactuar con distintas concentraciones de metano, manteniendo condiciones adecuadas de operación, seguridad y estabilidad experimental. Por ello, en las siguientes subsecciones se describen los componentes principales del sistema, desde la fuente óptica y la cavidad de metano hasta la elaboración del MZI y su integración dentro del montaje experimental.

3.2.1 FUENTE DE RADIACIÓN INFRARROJA (DIODO LÁSER DFB1653P)

3.2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL LÁSER DFB1653P

El láser montado es el DFB1653P de Thorlabs, un diodo láser de retroalimentación distribuida, conocido como DFB (Distributed Feedback). Este tipo de láser se caracteriza por emitir en una sola frecuencia dominante, por lo que resulta adecuado para aplicaciones donde se requiere una fuente óptica estable y de bajo ruido. En particular, el DFB1653P está diseñado para aplicaciones de espectroscopía en el infrarrojo cercano, especialmente para detección de metano, debido a que su longitud de onda de emisión se encuentra alrededor de 1653.7 nm.

El láser se encuentra integrado en un encapsulado tipo butterfly de 14 pines, el cual incluye no solo el diodo láser, sino también otros elementos necesarios para su operación estable. Entre estos elementos se encuentran un aislador óptico integrado, un enfriador termoeléctrico (TEC), un termistor para monitoreo de temperatura y un fotodiodo monitor para seguimiento de la potencia óptica emitida. Además, el dispositivo cuenta con una fibra óptica PM1550 de mantenimiento de polarización y conector FC/APC, lo cual facilita su integración en sistemas ópticos basados en fibra.

De acuerdo con las especificaciones del fabricante, la longitud de onda central del láser se encuentra típicamente en 1653.7 nm, con un rango especificado de 1652.7

nm a 1654.7 nm. La potencia óptica de salida continua es de al menos 10 mW, mientras que la corriente máxima de operación indicada es de 100 mA. Asimismo, el láser presenta una corriente umbral típica de aproximadamente 9 mA, a partir de la cual inicia la emisión láser.

Una característica importante del DFB1653P es su capacidad de sintonización fina mediante corriente y temperatura. El fabricante reporta una sintonización aproximada de 0.01 nm/mA al variar la corriente de inyección, y de 0.1 nm/°C al modificar la temperatura del chip. Esta propiedad es relevante para aplicaciones de sensado de gases, ya que permite ajustar ligeramente la longitud de onda de emisión para acercarla a una línea de absorción del metano.

Para su operación térmica, el láser incorpora un TEC y un termistor interno. El termistor tiene una resistencia nominal de 10 k Ω a 25 °C, lo cual permite emplearlo como referencia para el controlador de temperatura. El TEC presenta una corriente típica de operación de 0.06 A y un voltaje típico de 0.20 V, con valores máximos especificados de 2.0 A y 4.0 V, respectivamente.

También es importante considerar los límites absolutos de operación. El datasheet indica un voltaje inverso máximo del diodo láser de 2 V, una corriente máxima absoluta del TEC de 2.6 A, un voltaje máximo absoluto del TEC de 4.7 V y un voltaje inverso máximo del fotodiodo de 5 V. Además, el rango de temperatura de operación del chip se especifica entre 15 °C y 35 °C, mientras que la temperatura de la carcasa puede operar entre -5 °C y 75 °C.

En cuanto a la fibra óptica integrada, el dispositivo utiliza fibra PM1550, con diámetro de núcleo de 9 μ m, apertura numérica de 0.13, diámetro de campo modal de 10.5 ± 0.5 μ m a 1550 nm, longitud de fibra de 1.0 ± 0.1 m y conector FC/APC. Estas características permiten acoplar la emisión del láser de manera directa al sistema óptico utilizado en el sensor.

En resumen, el DFB1653P es una fuente láser compacta, monomodo y térmicamente estabilizable, adecuada para aplicaciones de espectroscopía en el infrarrojo cercano. Sus características de longitud de onda, potencia óptica, sintonización fina y compatibilidad con fibra óptica lo convierten en un componente apropiado para el sistema de detección de metano desarrollado en este trabajo.

3.2.1.2 COMPONENTES UTILIZADOS

Para el armado y puesta en operación del láser DFB1653P se utilizaron distintos componentes eléctricos, electrónicos, mecánicos y de protección. Estos elementos

permitieron integrar el diodo láser dentro de una carcasa funcional, establecer la comunicación eléctrica con sus controladores externos y proporcionar ventilación activa para mejorar la estabilidad térmica del sistema.

1. Diodo láser DFB1653P

El componente principal del sistema es el diodo láser DFB1653P, encapsulado en formato butterfly de 14 pines. Este dispositivo integra el diodo láser, un TEC, un termistor y un fotodiodo monitor, por lo que requiere conexiones independientes para el control térmico y el control de corriente, Figura 3.6.



FIGURA 3.6: Diodo láser DFB1653P en encapsulado tipo butterfly de 14 pines, acoplado a fibra óptica monomodo con conector FC/APC.

2. Controlador de temperatura TED 200 C y corriente LDC 240 C

Se utilizó el controlador de temperatura TED 200 C Temperature Controller, Figura 3.2, para regular el enfriador termoelectrónico integrado en el láser. Este controlador permite leer la resistencia del termistor y ajustar la corriente entregada al TEC para mantener estable la temperatura del dispositivo. En este montaje, el controlador fue configurado para trabajar con el termistor interno del láser, utilizando el rango correspondiente a TH 20 k Ω .

Para alimentar el diodo láser se empleó el controlador LDC 240 C Laser Diode Controller 4A, Figura 3.7. Este equipo permite suministrar corriente de forma controlada y segura al láser, evitando variaciones bruscas que puedan dañar el dispositivo. Durante la puesta en marcha, el controlador fue operado en modo de corriente constante para incrementar gradualmente la corriente de inyección.



FIGURA 3.7: Configuración de los controladores del láser para obtener emisión en 1653.836 nm.

3. Conectores DB9

Se emplearon dos conectores DB9 como interfaz entre el módulo del láser y los controladores externos. Uno de los conectores fue destinado al sistema de control térmico, conectando las líneas del TEC y del termistor hacia el controlador TED 200 C. El segundo conector fue utilizado para las líneas correspondientes al diodo láser y al fotodiodo monitor hacia el controlador LDC 240 C.

El uso de conectores DB9 permitió organizar las conexiones, facilitar el montaje y desmontaje del sistema, y reducir el riesgo de errores durante la operación experimental.

4. Cableado y conexiones

Se utilizaron cables individuales para unir los pines del encapsulado butterfly del láser con los conectores DB9. Cada línea fue soldada de acuerdo con la función correspondiente: TEC, termistor, ánodo/cátodo del láser y fotodiodo monitor. Posteriormente, las uniones fueron aisladas para evitar cortocircuitos y falsos contactos.

Este paso fue crítico, ya que una conexión incorrecta en los pines del láser puede provocar fallas en el control térmico, ausencia de lectura del sensor o daño permanente del diodo láser.

5. Sistema de ventilación

Se integró un ventilador de 12 V dentro de la carcasa con el objetivo de favorecer la disipación térmica durante la operación del láser y sus componentes

electrónicos. Este ventilador permite mantener una circulación de aire dentro del encapsulado, reduciendo la acumulación de calor y contribuyendo a la estabilidad del sistema.

Para alimentar el ventilador se implementó un circuito auxiliar compuesto por:

- un convertidor de AC a DC,
- un fusible de protección,
- un enchufe hembra de alimentación,
- cableado interno para distribución de energía.

El convertidor AC/DC permite obtener la tensión continua requerida por el ventilador a partir de una entrada de corriente alterna. El fusible se incorporó como medida de protección ante posibles sobrecorrientes, mientras que el enchufe hembra permite conectar el sistema de alimentación de forma práctica y segura.

6. Carcasa impresa en 3D

Todos los componentes fueron integrados dentro de una carcasa impresa en 3D, diseñada para alojar el láser, los conectores DB9, el ventilador, el circuito de alimentación y el cableado interno. Esta carcasa cumple varias funciones:

- proporciona soporte mecánico al láser,
- protege las conexiones eléctricas,
- permite fijar los conectores externos,
- facilita la ventilación interna,
- mantiene el montaje ordenado y reproducible.

La carcasa también permite separar físicamente las conexiones de control térmico y de corriente, reduciendo el riesgo de confusión durante el uso del sistema.

En conjunto, todos estos componentes permitieron construir un módulo láser funcional, protegido y compatible con los controladores externos necesarios para su operación térmica y eléctrica, Figura 3.8.

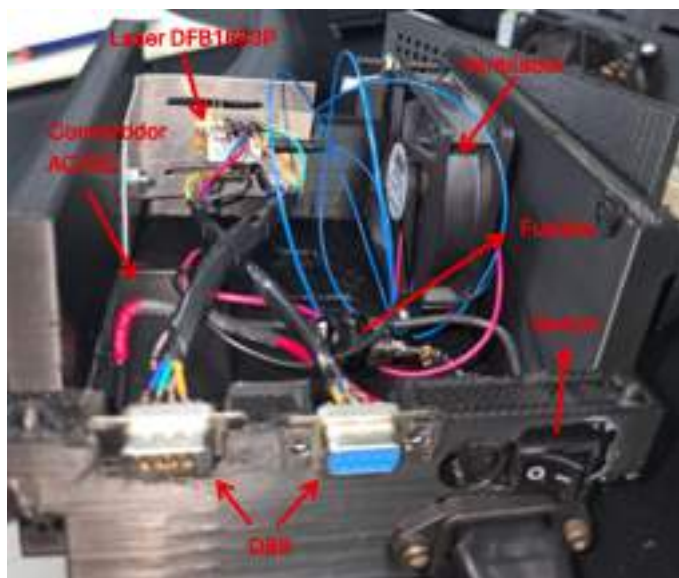


FIGURA 3.8: Láser ensamblado en una caja protectora con salida en fibra óptica y conexiones con los controladores.

3.2.1.3 CONEXIONES A LA FUENTE LÁSER

Para realizar el armado eléctrico del sistema, fue necesario identificar la función de los pines del diodo láser DFB1653P y relacionarlos con las salidas correspondientes de los controladores externos.

1. Conexión al diodo láser DFB1653P

El láser DFB1653P se encuentra en un encapsulado tipo butterfly de 14 pines de acuerdo con el diagrama del fabricante, Figura 3.9.

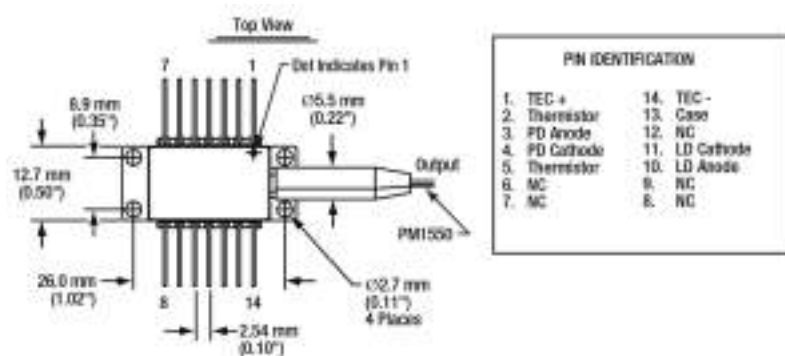


FIGURA 3.9: Vista superior y diagrama de identificación de pines de un diodo láser tipo butterfly de 14 pines.

De esta manera, y para una correcta operación del láser se realizó un puente entre el pin 1 y el pin 5 del conector DB9 del driver. Asimismo, el láser se configuró en modo CG (Cathode Grounded), lo cual se logró conectando el cátodo del diodo láser con el pin de case/terra del encapsulado. En la práctica, esto implicó puentear el pin 11 del láser (cátodo) con el pin 13 del láser (case), estableciendo una referencia común entre el cátodo y la carcasa del dispositivo. Esta configuración permitió compatibilizar el encapsulado del láser con el modo de operación seleccionado en el controlador LDC 240 C.

2. Conexión al controlador de corriente

Para alimentar el diodo láser, se utilizó el controlador LDC 240 C. A partir del diagrama de pines del controlador y del diagrama del láser, se realizaron las siguientes conexiones, Tabla 3.2:

Pin controlador	Función	Pin láser	Función láser
8	LD Anode	10	LD Anode
7	LD Cathode	11	LD Cathode
3	LD Ground	13	Case/Ground
4	PD Anode	3	PD Anode
2	PD Cathode	4	PD Cathode

TABLA 3.2: Conexiones entre el controlador de corriente y el láser DFB1653P.

Estas conexiones permiten que el controlador de corriente suministre corriente al diodo láser de manera controlada. Además, la conexión del fotodiodo monitor permite disponer de una señal asociada a la potencia óptica emitida por el láser.

3. Conexión al controlador de temperatura

Para el control térmico se utilizó el controlador TED 200 C. Este controlador emplea una salida tipo DB15; sin embargo, en el montaje se implementó una interfaz mediante conector DB9. Por esta razón, fue necesario realizar pruebas de continuidad entre el cable DB15 y el conector DB9 para identificar la correspondencia real de cada pin, Tabla 3.3.

En el caso del termistor, los pines 2 y 5 del láser corresponden al sensor de temperatura interno. Debido a que el termistor es un elemento resistivo, no presenta una polaridad estricta; sin embargo, se mantuvo la asignación mostrada para conservar orden y trazabilidad en el cableado.

Pin DB15 del TED 200 C	Pin DB9 correspondiente	Función	Pin del láser DFB1653P
13	5	TEC (-)	14
3	3	Termistor (-)	5
4	2	Termistor (+)	2
6	4	TEC (+)	1

TABLA 3.3: Conexiones entre el TED 200 C, DB9, y DFB1653P.

3.2.1.4 PROCEDIMIENTO DE ENCENDIDO

La puesta en marcha del sistema se realizó de manera gradual, siguiendo una secuencia orientada a proteger el diodo láser y garantizar condiciones estables de operación.

En primer lugar, se verificó visualmente que todas las conexiones internas estuvieran correctamente soldadas y aisladas. Posteriormente, se realizaron pruebas de continuidad en los conectores DB9 para confirmar que cada línea estuviera conectada al pin correspondiente del diodo láser. También se verificó que no existieran cortocircuitos entre líneas independientes.

Después de esta revisión, se conectó el controlador de temperatura TED 200 C al conector DB9 correspondiente. El controlador fue configurado en el modo de termistor TH 20 k Ω , adecuado para el termistor interno del DFB1653P. El valor de referencia se ajustó aproximadamente a:

$$T_{set} = 10 \text{ k}\Omega$$

lo cual corresponde a una temperatura cercana a 25 °C. Posteriormente, se ajustó el límite de corriente del TEC a:

$$I_{lim} = 0.2 \text{ A}$$

Antes de activar el TEC, se verificó que el indicador NO SENSOR estuviera apagado, confirmando que el controlador reconocía correctamente el termistor. Al activar el TEC, se observó que no apareciera la alarma OPEN, lo que indicó que el circuito del TEC estaba correctamente cerrado. Finalmente, se esperó a que la lectura T_{act} se estabilizara cerca del valor de referencia.

Una vez estabilizada la temperatura, se conectó el controlador de corriente LDC 240 C al segundo conector DB9. El controlador fue configurado en modo de corriente constante, iniciando con corriente de salida en:

$$I = 0 \text{ mA}$$

El límite de corriente se estableció en:

$$I_{lim} = 25 \text{ mA}$$

valor inferior al máximo de operación del láser. Posteriormente, se activó la salida del controlador y se incrementó la corriente lentamente, observando el comportamiento del sistema y evitando cambios bruscos.

3.2.1.5 VERIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE EMISIÓN

Después de completar la conexión y puesta en marcha del sistema, se realizó la verificación del espectro de emisión del diodo láser DFB1653P. Para ello, la salida óptica del láser fue conectada a un analizador de espectro óptico, con el objetivo de comprobar que el láser emitiera en la región esperada y con un comportamiento espectral adecuado.

La medición permitió observar un pico dominante de emisión alrededor de:

$$\lambda \approx 1653.8 \text{ nm}$$

Este valor se encuentra en concordancia con la longitud de onda nominal del DFB1653P, la cual está alrededor de 1653 nm. La presencia de un pico estrecho y bien definido confirmó el comportamiento monomodo característico de un láser DFB, así como el correcto funcionamiento del sistema de alimentación y control térmico.

La verificación espectral fue importante por varias razones. En primer lugar, permitió confirmar que el diodo láser estaba operando correctamente después del proceso de soldadura, montaje y conexión. En segundo lugar, permitió comprobar que la longitud de onda de emisión se encontraba dentro de la región de interés para aplicaciones de detección de metano. Finalmente, permitió validar que el sistema térmico y eléctrico proporcionaba condiciones suficientemente estables para obtener una emisión óptica definida.

El espectro obtenido, Figura 3.10, también sirve como referencia inicial para futuras mediciones, ya que permite conocer la longitud de onda central de operación del láser bajo las condiciones de corriente y temperatura seleccionadas. Esta

información es fundamental para posteriores experimentos de sensado, donde la estabilidad y ubicación espectral del láser influyen directamente en la interacción con las líneas de absorción del metano.

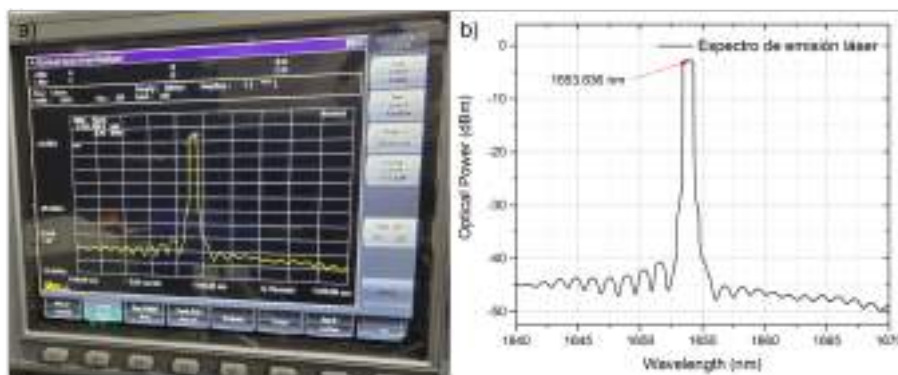


FIGURA 3.10: a) Espectro de la emisión láser medido por la OSA; b) Espectro óptico de la emisión láser.

En conclusión, la medición del espectro confirmó que el láser DFB1653P fue correctamente ensamblado y puesto en operación, mostrando una emisión estable en la región del infrarrojo cercano adecuada para el sistema de detección óptica desarrollado.

3.2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CAVIDAD DE METANO

3.2.2.1 OBJETIVO DE LA CAVIDAD

La cavidad de metano fue diseñada con el objetivo de generar un entorno cerrado y controlado donde el interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica pueda interactuar directamente con el gas de calibración. Su función principal es permitir la introducción de diferentes concentraciones de metano y mantenerlas confinadas durante la medición, de manera que sea posible analizar la respuesta espectral del sensor bajo condiciones experimentales definidas.

Además, la cavidad busca proporcionar estabilidad mecánica al sistema óptico, evitando que la fibra se desplace durante las pruebas. Esto es importante debido a que el interferómetro es sensible a perturbaciones externas, vibraciones y curvaturas no controladas, las cuales pueden modificar su espectro de transmisión.

De forma general, la cavidad cumple tres propósitos principales: alojar el sensor de fibra óptica, permitir la interacción controlada entre el MZI y el gas, y brindar

condiciones seguras y repetibles para la caracterización experimental del sistema de detección de metano.

3.2.2.2 DISEÑO DE LA CAVIDAD

El diseño de la cavidad se realizó inicialmente en SolidWorks, Figura 3.11, con el propósito de definir la geometría general del sistema antes de su fabricación. Esta etapa permitió establecer las dimensiones principales, la distribución de los orificios de ensamble, las zonas de entrada y salida de la fibra óptica, así como los espacios destinados para la integración de accesorios de monitoreo y conexión de gas.



FIGURA 3.11: Diseño 3D de la cavidad, diseñada en SolidWorks.

La cavidad fue concebida como un sistema compuesto principalmente por dos piezas: una base y una tapa superior. La base funciona como soporte mecánico del interferómetro Mach-Zehnder y de los elementos de sujeción de la fibra, mientras que la tapa permite cerrar el volumen interno donde se introduce el gas. Ambas piezas fueron diseñadas para ser fabricadas en aluminio, debido a su rigidez mecánica, facilidad de maquinado y resistencia estructural.

Durante el diseño, se consideró que la cavidad debía cumplir simultáneamente con varios requerimientos: permitir el paso controlado de la fibra óptica, alojar el MZI sin inducir deformaciones mecánicas, mantener un volumen interno cerrado

para el gas y permitir la instalación de elementos como manómetro, termómetro, válvulas, etc. Por esta razón, la geometría incluyó orificios de ensamble, roscas para accesorios y superficies de contacto destinadas al sellado entre la base y la tapa.

El modelo diseñado contempla una base de aluminio con dimensiones aproximadas de $29\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 3.13\text{ cm}$, y una tapa de aluminio de $29.5\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 9.2\text{ cm}$. Además, el ensamble completo considera un volumen interno aproximado de 2.48 L, equivalente a 0.00248 m^3 , lo cual permite introducir gas de calibración y exponer el sensor óptico bajo condiciones controladas.

3.2.2.3 BASE DE LA CAVIDAD

La base de la cavidad constituye la pieza principal de soporte del sistema experimental. Esta fue diseñada en SolidWorks, Figura 3.12, y posteriormente considerada para su fabricación en aluminio, debido a que este material proporciona rigidez mecánica, buena resistencia estructural y facilidad de maquinado. Sus dimensiones generales son de $29\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 3.13\text{ cm}$, lo que permite contar con un área suficiente para alojar el interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica y sus elementos de fijación.



FIGURA 3.12: Modelo tridimensional de la base de la cavidad diseñada en SolidWorks.

El diseño de la base incluye una zona central rebajada, la cual define el espacio donde se colocará la fibra óptica y donde posteriormente se producirá la interacción entre el sensor y el gas de metano. Alrededor de esta zona se distribuyen los orificios destinados al ensamble con la tapa superior, permitiendo que ambas piezas puedan

unirse mediante tornillos y comprimir el empaque de sellado colocado entre ellas. Además, la base fue diseñada considerando los puntos de entrada y salida de la fibra óptica.

En conjunto, la base cumple tres funciones principales: servir como soporte mecánico del sensor, definir parte del volumen interno de la cavidad y proporcionar la superficie de contacto necesaria para el sellado con la tapa. Por ello, su diseño es fundamental para garantizar la estabilidad del montaje y la repetibilidad de las mediciones experimentales.

3.2.2.4 SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO CON SILICONA

Debido a que la cavidad está formada por dos piezas de aluminio unidas mediante tornillos, fue necesario considerar un mecanismo de protección para la fibra óptica en las zonas de entrada y salida. Al cerrar la cavidad, la presión ejercida entre la base y la tapa podría generar esfuerzos mecánicos directamente sobre la fibra, provocando deformaciones, microcurvaturas o incluso daño físico. Esto es especialmente importante porque el interferómetro Mach-Zehnder es sensible a perturbaciones mecánicas, por lo que cualquier presión localizada sobre la fibra puede modificar su respuesta espectral.

Para reducir este efecto, se diseñó un sistema de amortiguamiento basado en dos pequeñas camas de silicona, silicona 60 A, colocadas en las regiones donde la fibra entra y sale de la cavidad, Figura 3.13. Estas camas funcionan como una superficie flexible entre la fibra y las piezas rígidas de aluminio, permitiendo distribuir la presión de cierre de manera más uniforme. De esta forma, la fibra no queda comprimida directamente entre superficies metálicas, sino apoyada sobre un material deformable que absorbe parte del esfuerzo mecánico.

Este arreglo permite que la fibra entrante y saliente se mantenga en una posición estable sin estar sometida a una presión excesiva. Así, el sistema de amortiguamiento contribuye tanto a la protección física de la fibra como a la estabilidad del sensor durante la medición. La implementación de estas camas de silicona fue considerada desde el diseño de la base de la cavidad, incorporando espacios específicos para su colocación en las zonas de paso de la fibra.

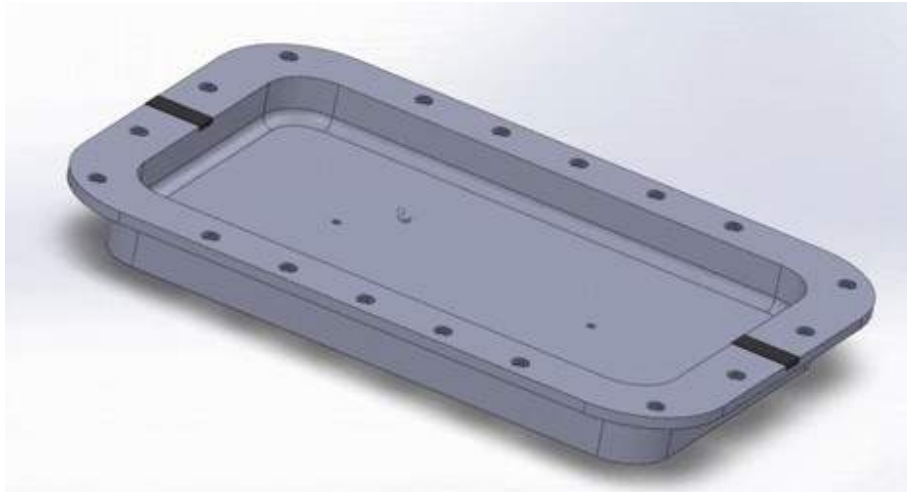


FIGURA 3.13: Diseño 3D de la base de la cavidad con bases de silicona.

3.2.2.5 SISTEMA DE SUJECCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

Para garantizar la estabilidad mecánica del interferómetro Mach-Zehnder dentro de la cavidad, se incorporó un sistema de sujeción basado en dos fiber holder clamps, Figura 3.14. Estos elementos fueron colocados sobre la base de la cavidad con el propósito de mantener fija la fibra óptica durante el experimento, evitando desplazamientos, vibraciones o curvaturas no deseadas.

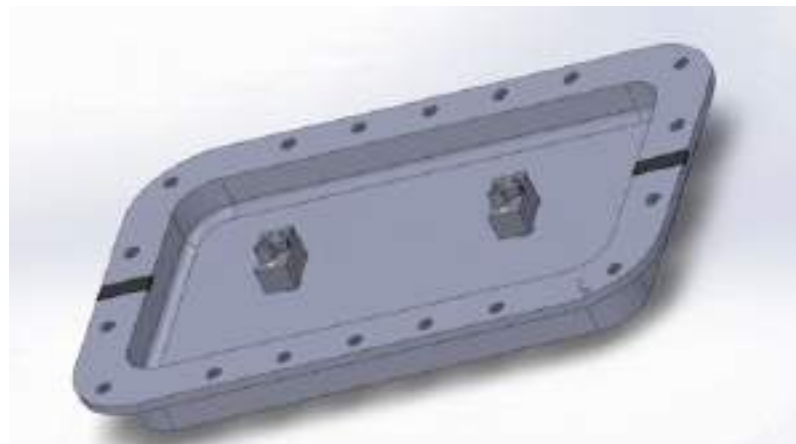


FIGURA 3.14: Diseño 3D de la base de la cavidad con dos Fiber holder clamps.

La incorporación de estos soportes es importante debido a que el sensor MZI es altamente sensible a perturbaciones mecánicas. Cualquier movimiento de la fibra, por pequeño que sea, puede modificar las condiciones de propagación de la luz dentro del interferómetro y generar cambios en el espectro de transmisión. Estos cambios podrían confundirse con variaciones producidas por la interacción del sensor con el

gas, afectando la interpretación de los resultados experimentales

Por esta razón, los fiber holder clamps permiten fijar la fibra de manera controlada, manteniendo estable la región sensible del interferómetro dentro de la cavidad. Al mismo tiempo, su uso evita aplicar presión excesiva sobre la fibra, reduciendo el riesgo de introducir pérdidas adicionales por microcurvaturas o esfuerzos mecánicos.

3.2.2.6 EMPAQUE DE SILICONA Y SELLADO

Para mejorar la hermeticidad de la cavidad se incorporó un empaque de silicona colocado entre la base y la tapa, Figura 3.15. Este empaque tiene la forma de la brida de la cavidad, de manera que cubre la zona de contacto entre ambas piezas y permite distribuir la presión generada por los tornillos de cierre de forma más uniforme.

La función principal del empaque es reducir posibles fugas de gas durante las mediciones. Al cerrar la cavidad, la silicona se comprime ligeramente entre las dos superficies de aluminio, rellenando pequeñas irregularidades o separaciones que podrían quedar entre la base y la tapa. De esta manera, se favorece el sellado del volumen interno donde se coloca el interferómetro Mach-Zehnder y donde se introduce el gas de calibración.

Además de contribuir a la hermeticidad, el empaque cumple una función mecánica importante. Al encontrarse entre dos piezas rígidas de aluminio, la silicona actúa como una capa intermedia que evita el contacto directo aluminio-aluminio. Esto ayuda a proteger las superficies de la cavidad, reducir desgaste por presión y disminuir posibles daños durante el cierre repetido del sistema.

Otro aspecto relevante es que el empaque también ayuda a amortiguar la presión en las regiones cercanas a la entrada y salida de la fibra óptica. Debido a que la fibra pasa a través de la cavidad, es importante evitar que quede comprimida directamente por las piezas metálicas. La presencia de silicona permite suavizar la unión y reducir el riesgo de daño, microcurvaturas o esfuerzos mecánicos sobre la fibra, los cuales podrían alterar la respuesta espectral del sensor.

En este trabajo se utilizó silicona 60 A, elegida por su flexibilidad y capacidad de deformarse bajo presión sin perder completamente su forma. La geometría del empaque fue diseñada para coincidir con la brida de la cavidad, tanto en la base como en la tapa, asegurando una superficie de contacto continua alrededor del volumen interno.

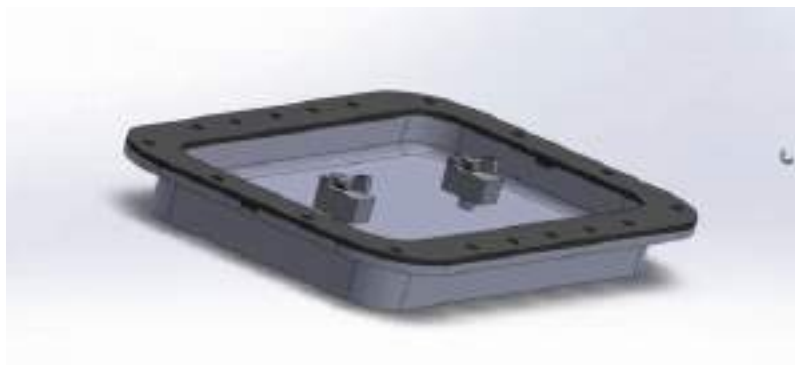


FIGURA 3.15: Modelo tridimensional de la base de la cavidad con empaque de silicona colocado sobre la brida de sellado.

3.2.2.7 TAPA DE LA CAVIDAD

La tapa de la cavidad constituye la segunda pieza principal del sistema y cumple la función de cerrar el volumen interno donde se coloca el interferómetro Mach-Zehnder y se introduce el gas de calibración. Al unirse con la base mediante tornillos, la tapa permite formar un espacio confinado en el cual el sensor óptico puede interactuar con el metano bajo condiciones controladas.

Esta pieza fue diseñada en aluminio, al igual que la base, debido a su resistencia mecánica, rigidez y facilidad de maquinado, Figura 3.16. Su geometría fue planteada para proporcionar un volumen interno suficiente para alojar la fibra óptica sin comprometer su integridad mecánica, además de permitir la integración de distintos accesorios necesarios para la operación de la cavidad.

Una característica importante de la tapa es que incorpora diversos orificios y roscas para el montaje del sistema. En particular, cuenta con 18 orificios en la brida para tornillos $M8 \times 1.25$, los cuales permiten unir la tapa con la base de manera uniforme. Esta distribución ayuda a comprimir el empaque de silicona colocado entre ambas piezas, favoreciendo el sellado y reduciendo posibles fugas de gas.

Además, la tapa incluye conexiones roscadas destinadas a la instalación de accesorios de monitoreo, seguridad y conducción de gas. El diseño contempla dos roscas $1/4$ NPT, una rosca $M27 \times 2.0$ y una rosca $1/2$ NPT. Estas roscas permiten acoplar componentes como manómetro, termómetro, válvula de seguridad, adaptadores y conexiones para la entrada o salida del gas.

De esta manera, la tapa no solo cumple la función de cierre mecánico de la cavidad, sino que también actúa como la interfaz principal para integrar los elementos externos del sistema experimental. Su diseño permite combinar hermeticidad, acceso

para instrumentación y seguridad durante las pruebas de detección de metano.



FIGURA 3.16: Modelo tridimensional de la tapa de la cavidad diseñada en aluminio.

3.2.2.8 UNIÓN DE LA CAVIDAD

Una vez definidos los elementos principales de la cavidad, se realizó la unión de la base, la tapa superior, el empaque de silicona y los elementos internos de sujeción de la fibra óptica. Esta etapa representa la integración mecánica del sistema, cuyo objetivo es formar el volumen cerrado donde posteriormente se alojará el interferómetro Mach-Zehnder y se introducirá el gas de calibración.

El ensamble se obtiene colocando el empaque de silicona entre la base y la tapa, de manera que al unir ambas piezas mediante los tornillos de cierre se genere una compresión uniforme sobre la zona de contacto. Esta compresión permite mejorar el sellado de la cavidad y reducir posibles fugas de gas durante la operación experimental. Además, la presencia del empaque evita el contacto directo entre las piezas de aluminio, protegiendo las superficies y contribuyendo a una unión más estable.

3.2.2.9 COMPONENTES/ACCESORIOS DE LA CAVIDAD

Para complementar el funcionamiento de la cavidad, se integraron distintos componentes externos e internos con el objetivo de monitorear variables importantes, controlar el suministro de gas y mantener condiciones seguras durante la operación experimental, Figura 3.17. Estos accesorios permiten que la cavidad no funcione

únicamente como un volumen cerrado, sino como un sistema instrumentado para realizar mediciones de metano bajo condiciones controladas.

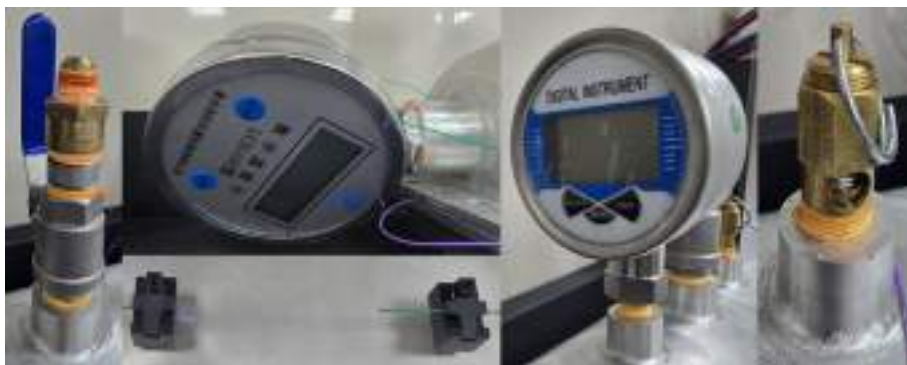


FIGURA 3.17: Componentes integrados a la cavidad de metano para monitoreo, control y seguridad del sistema experimental. Se incluyen la llave tipo bola, termómetro digital, manómetro digital, válvula de seguridad y fiber clamps utilizados para fijar la fibra óptica dentro de la cavidad.

Uno de los principales elementos añadidos fue un termómetro biométrico digital LCD-110, con rango de medición de -50 a 200 °C. Este componente permite monitorear la temperatura durante el experimento, ya que las variaciones térmicas pueden influir tanto en el comportamiento del gas como en la respuesta espectral del sensor de fibra óptica.

También se incorporó un manómetro digital de acero inoxidable para gas, con pantalla LCD inalámbrica y capacidad de medición de hasta 60 MPa. Este accesorio permite conocer la presión interna de la cavidad durante la introducción del gas de calibración.

Como medida de seguridad adicional, se añadió una válvula de seguridad de 125 psi. Su función es liberar presión en caso de que el sistema alcance valores superiores a los permitidos, protegiendo tanto la cavidad como al usuario y al resto del equipo experimental.

Para controlar manualmente el paso del gas hacia la cavidad, se utilizó una llave tipo bola de 1/2 NPT. Este componente permite abrir o cerrar el flujo de gas de manera sencilla y rápida durante el llenado o purga del sistema.

Finalmente, se incorporaron dos fiber clamps con ranura en V, diseñados para sujetar fibras ópticas con diámetros entre $150\text{ }\mu\text{m}$ y $341\text{ }\mu\text{m}$. Estos soportes permiten mantener fija la fibra dentro de la cavidad, evitando desplazamientos o vibraciones durante el experimento.

3.2.2.10 ENSAMBLE COMPLETO DE LA CAVIDAD

Finalmente, se realizó el ensamble completo de la cavidad integrando la base, la tapa superior, el empaque de silicona y los accesorios externos necesarios para su operación, Figura 3.18. En esta etapa, la cavidad dejó de ser únicamente una estructura mecánica y pasó a funcionar como un sistema experimental instrumentado, listo para alojar el interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica y permitir su interacción con el gas de metano.



FIGURA 3.18: Ensamble completo de la cavidad de metano con los componentes externos integrados.

El ensamble final también permite la conexión con el sistema de suministro de gas mediante los adaptadores y accesorios correspondientes. Esto hace posible introducir diferentes concentraciones de metano de forma controlada, manteniendo condiciones experimentales reproducibles para la caracterización del sensor óptico.

En conjunto, la cavidad ensamblada constituye una parte fundamental del sistema de detección de metano, ya que permite confinar el gas, proteger el sensor, monitorear las condiciones internas y operar el montaje de forma segura antes de realizar las pruebas experimentales.

3.2.3 ELABORACIÓN DEL INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER (MZI)

La elaboración del interferómetro Mach-Zehnder (MZI) en fibra óptica se realizó como parte del sistema experimental destinado a la detección de metano. El objetivo de esta etapa fue fabricar una estructura interferométrica del tipo SMF-TF-SMF, donde una sección de fibra adelgazada se coloca entre dos segmentos de fibra monomodo estándar. Esta configuración permite generar interferencia modal debido al acoplamiento de luz entre el modo fundamental del núcleo y modos propagantes en la sección adelgazada o en el revestimiento. Como resultado, se obtiene un espectro de transmisión con máximos y mínimos característicos, cuya respuesta puede modificarse ante perturbaciones externas o cambios en el medio circundante.

El procedimiento de fabricación del MZI se dividió en varias etapas: preparación del material, limpieza y pelado de fibras, corte de extremos, empalme por fusión, generación del desplazamiento de núcleo (*core-offset*), verificación visual de los empalmes y caracterización óptica del interferómetro.

3.2.3.1 MATERIALES Y EQUIPO UTILIZADO

Para la fabricación del interferómetro se emplearon herramientas y equipos específicos de laboratorio de fibra óptica. En primer lugar, se utilizaron pinzas peladoras para retirar el recubrimiento o *buffer* de la fibra en las regiones donde posteriormente se realizarían los empalmes, Figura 3.19 a).

También se utilizaron paños sin pelusa y alcohol isopropílico para limpiar la fibra después de retirar el recubrimiento, Figura 3.19 b). La limpieza es una etapa fundamental, ya que los residuos de polímero pueden generar pérdidas ópticas adicionales o uniones mecánicamente débiles.

Para obtener extremos planos y limpios se empleó una cortadora de fibra óptica, vease Figura 3.19 c). El corte de la fibra es crítico, ya que un extremo inclinado, astillado o irregular puede impedir una correcta alineación durante el empalme por fusión.

Los empalmes fueron realizados utilizando una empalmadora de fibra óptica Fitel S178-A versión 2, Figura 3.19 d). Este equipo permite alinear las fibras, observar sus extremos mediante una cámara integrada y realizar la descarga eléctrica necesaria para fusionarlas. En este trabajo, la empalmadora no solo se utilizó para unir fibras, sino también para introducir un desplazamiento controlado entre los núcleos, con el

fin de favorecer el acoplamiento modal requerido para formar el interferómetro.



FIGURA 3.19: a) pinzas peladoras utilizadas para retirar el recubrimiento de la fibra; b) paños sin pelusa y alcohol isopropílico para la limpieza de la fibra; c) cortadora de fibra óptica para obtener extremos planos y uniformes; d) empalmadora de fibra óptica Fitel S178-A utilizada para realizar los empalmes por fusión.

Las fibras utilizadas fueron fibra monomodo estándar SMF-28e+ de Corning y fibra adelgazada LF54-02, como se puede observar en la Figura 3.20. La fibra SMF-28e+ se utilizó como fibra de entrada y salida, mientras que la fibra adelgazada se empleó como la región sensible del interferómetro. La reducción de dimensiones en la fibra adelgazada favorece una mayor interacción del campo óptico con el medio externo, lo cual resulta conveniente para aplicaciones de sensado.

3.2.3.2 PREPARACIÓN DE LAS FIBRAS

La primera etapa experimental consistió en preparar las fibras que formarían la estructura SMF-TF-SMF. Para ello, se seleccionaron dos segmentos de fibra SMF-28e+ y una sección de fibra adelgazada LF54-02. Los segmentos de fibra SMF actúan como guías de entrada y salida, mientras que la sección TF constituye la región interferométrica central.

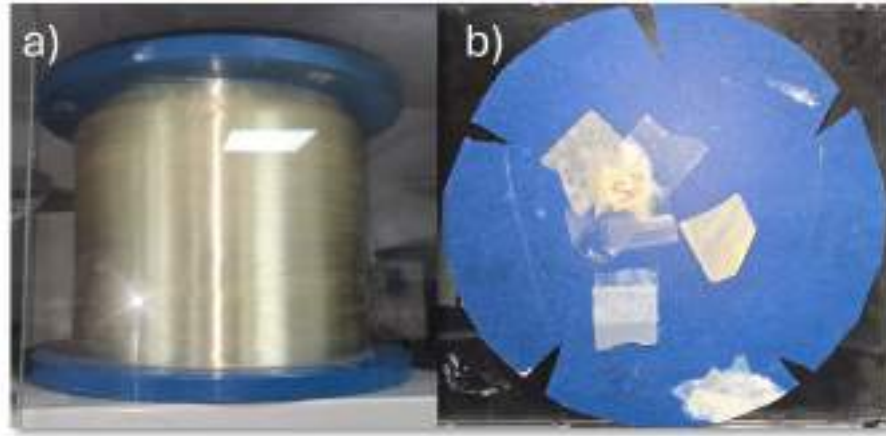


FIGURA 3.20: a) Imagen del rollo de fibra óptica SMF-28e+; b) Imagen de la fibra óptica adelgazada LF54-02.

En las zonas destinadas al empalme, se retiró cuidadosamente el recubrimiento de la fibra utilizando las pinzas peladoras. Este procedimiento debe realizarse de forma controlada para evitar dañar la superficie de la fibra o producir microfracturas. Una vez retirado el recubrimiento, la fibra desnuda fue limpiada con alcohol isopropílico y paños sin pelusa, eliminando cualquier residuo que pudiera afectar el proceso de fusión.

Posteriormente, cada extremo fue cortado con la cortadora de fibra óptica. El objetivo del corte fue obtener una cara transversal plana, limpia y lo más perpendicular posible al eje de propagación. Un corte adecuado mejora el contacto entre las fibras durante el empalme y reduce pérdidas por reflexión, dispersión o mala alineación.

3.2.3.3 CONFIGURACIÓN DEL INTERFERÓMETRO SMF–TF–SMF

El interferómetro fue fabricado con una configuración SMF–TF–SMF, formada por una fibra monomodo estándar, una sección de fibra adelgazada y una segunda fibra monomodo estándar, Figura 3.21. En esta geometría, la luz proveniente de la fibra SMF de entrada se acopla hacia la sección adelgazada, donde puede distribuirse entre distintos modos. Al llegar al segundo empalme, estos modos se recombinan y generan un patrón de interferencia observable en el espectro de transmisión.

La configuración general puede describirse como:

$$\text{SMF-28e+} \longrightarrow \text{TF LF54-02} \longrightarrow \text{SMF-28e+}$$

La longitud de la sección de fibra adelgazada fue de aproximadamente 3 cm. A cada lado de la sección interferométrica se dejó una longitud mayor a 10 cm de fibra SMF, con el fin de facilitar la manipulación, conexión y posterior colocación del sensor dentro de la cavidad experimental.

La fibra adelgazada fue elegida debido a que presenta dimensiones reducidas en comparación con una fibra monomodo convencional. Esta característica puede incrementar la fracción del campo óptico que interactúa con el medio circundante, favoreciendo la sensibilidad del sensor ante cambios externos. En el contexto de la detección de gases, esto resulta relevante porque el MZI debe estar expuesto al ambiente dentro de la cavidad de metano.

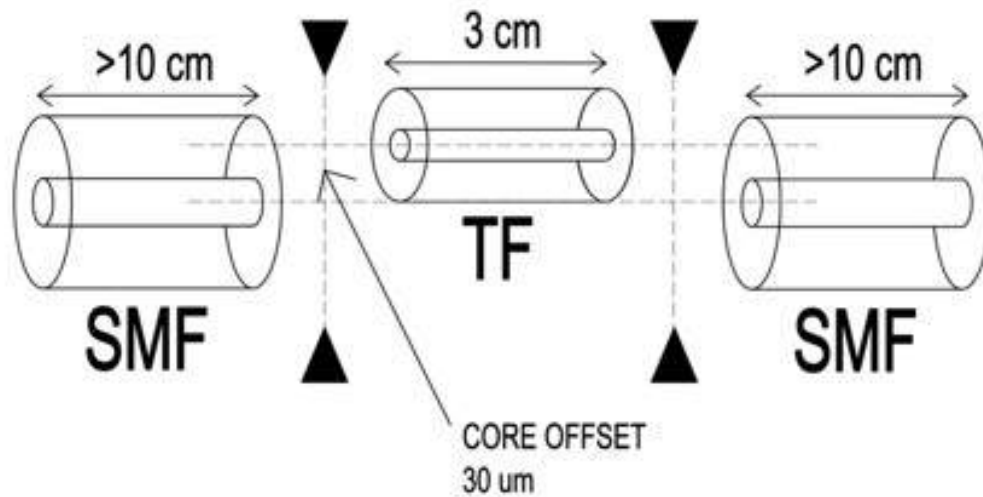


FIGURA 3.21: Esquema de la configuración empleada para el interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica. La estructura se compone de dos segmentos de fibra SMF-28e+ y una sección central de fibra adelgazada LF54-02, con desplazamiento de núcleo en las regiones de empalme.

3.2.3.4 EMPALME POR FUSIÓN Y GENERACIÓN DEL *core-offset*

La formación del MZI se realizó mediante empalmes por fusión entre la fibra SMF-28e+ y la fibra adelgazada. Para ello, se utilizó la empalmadora Fitel S178-A, la cual permitió posicionar las fibras y realizar la descarga eléctrica necesaria para unir las.

A diferencia de un empalme convencional, cuyo objetivo es minimizar pérdidas alineando los núcleos de ambas fibras, en este caso se introdujo un desplazamiento

intencional entre los núcleos, conocido como *core-offset*, Figura 3.22. Este desplazamiento tiene como finalidad perturbar la propagación del modo fundamental y acoplar parte de la energía hacia modos del revestimiento o modos de orden superior. La coexistencia de estos modos dentro de la sección adelgazada da lugar a una diferencia de fase acumulada durante la propagación.



FIGURA 3.22: a) Imagen previa antes del empalme SMF-TF; b) Imagen después del empalme SMF-TF con 30 μm de core-offset.

En este trabajo se consideró un desplazamiento de núcleo de aproximadamente 30 μm . Este valor permite inducir un desbalance modal suficiente para generar un patrón interferométrico observable en el espectro de transmisión. El primer empalme con *core-offset* actúa como región de acoplamiento modal, mientras que el segundo empalme permite la recombinación de los modos propagantes. Como resultado de esta recombinación, se obtiene interferencia constructiva y destructiva en función de la longitud de onda.

3.2.3.5 CARACTERIZACIÓN INTERFEROMÉTRICA

Una vez fabricado el MZI, se realizó su caracterización óptica mediante la medición del espectro de transmisión con un analizador de espectro óptico (OSA), Figura 3.23. Esta medición permitió verificar la presencia de franjas interferométricas y evaluar parámetros importantes del sensor.

La obtención de un espectro con oscilaciones definidas confirma que la estructura SMF-TF-SMF con desplazamiento de núcleo logró inducir interferencia modal. Este resultado es fundamental antes de colocar el sensor dentro de la cavidad, ya que permite verificar que el MZI fue fabricado correctamente y que presenta una respuesta espectral medible.



FIGURA 3.23: Espectro de transmisión de un interferómetro Mach-Zehnder (MZI) medido en un Analizador de Espectro Óptico (OSA).

3.2.4 INTEGRACIÓN DEL SENSOR

La integración del sensor consiste en conectar la fuente láser, la cavidad de gas, el interferómetro Mach-Zehnder y el analizador de espectro óptico en un mismo arreglo experimental, Figura 3.24. La luz emitida por el láser se acopla a la fibra óptica y atraviesa el MZI colocado dentro de la cavidad, donde interactúa con el metano introducido desde el cilindro de calibración.

El gas se suministra mediante un regulador de presión y una válvula de paso, mientras que la cavidad permite monitorear variables como presión y temperatura. Finalmente, la señal transmitida por el MZI se dirige hacia el OSA, donde se registra el espectro de transmisión para analizar los cambios producidos por la presencia del gas.

3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental se llevó a cabo con el objetivo de obtener la respuesta espectral del interferómetro Mach-Zehnder (MZI) de fibra óptica al ser expuesto a diferentes concentraciones de metano. Para ello, se integraron el diodo láser DFB1653P, la cavidad de gas con el MZI en su interior, el sistema de suministro de gas de calibración y el analizador de espectro óptico (OSA).

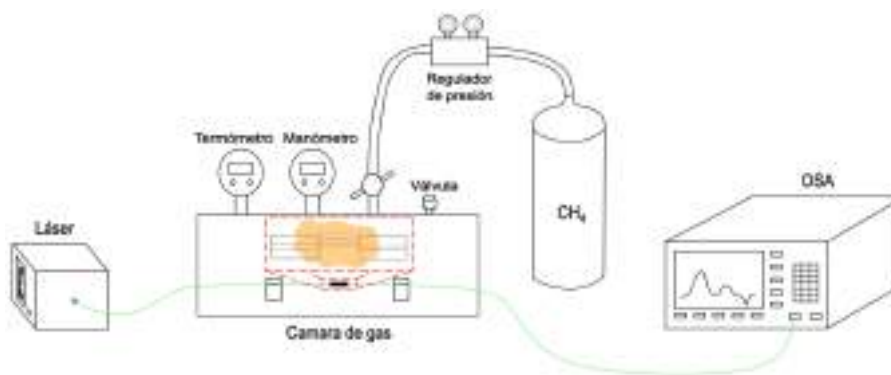


FIGURA 3.24: Esquema de la configuración empleada para el sensor de metano.

Las mediciones se realizaron manteniendo una presión constante de trabajo de 15 PSI, con el fin de comparar la respuesta del sensor bajo las mismas condiciones de presión para aire y para las diferentes concentraciones de metano. Esta presión fue seleccionada como un punto de operación práctico, ya que permitía introducir una cantidad suficiente de gas en la cavidad para realizar la medición sin consumir excesivamente el contenido de los cilindros de calibración. Además, trabajar a presiones mayores podría incrementar la interacción entre la radiación láser y el gas, favoreciendo una atenuación más pronunciada de la señal; sin embargo, también implicaría un mayor consumo de gas y mayores exigencias mecánicas sobre la cavidad. Por ello, 15 PSI se consideró una presión adecuada para mantener un equilibrio entre seguridad, consumo de gas y respuesta óptica medible.

3.3.1 VERIFICACIÓN PREVIA DE HERMETICIDAD DE LA CAVIDAD

Antes de encender el sistema óptico y realizar las mediciones con gas, se verificó la hermeticidad de la cavidad. Esta etapa fue fundamental para asegurar que el sistema pudiera mantener la presión interna durante el tiempo necesario para registrar los espectros de transmisión.

Para ello, el sensor MZI fue colocado dentro de la cavidad y la tapa fue cerrada mediante los tornillos correspondientes. Al cerrar la cavidad, el empaque de silicona quedó comprimido entre la base y la tapa, permitiendo mejorar el sellado del volumen interno. Posteriormente, se introdujo aire hasta alcanzar una presión de 15 PSI, monitoreando la presión mediante el manómetro instalado en la cavidad.

3.3.2 COLOCACIÓN DEL MZI DENTRO DE LA CAVIDAD

Una vez verificada la hermeticidad, se colocó el interferómetro Mach-Zehnder dentro de la cavidad. El MZI fue acomodado cuidadosamente para evitar curvaturas pronunciadas, tensión mecánica o desplazamientos que pudieran alterar su espectro de transmisión.

La fibra fue guiada a través de las zonas de entrada y salida de la cavidad, apoyándose sobre las camas de silicona diseñadas para amortiguar la presión ejercida durante el cierre. Además, el sensor fue sujetado mediante los *fiber clamps* internos, con el objetivo de mantenerlo fijo durante las mediciones.

Esta etapa fue importante debido a que el MZI es sensible a perturbaciones mecánicas. Cualquier movimiento, doblez o presión excesiva sobre la fibra podría modificar el patrón interferométrico y generar cambios espectrales no asociados directamente con la presencia del gas.

3.3.3 CONEXIÓN Y ENCENDIDO DEL LÁSER DFB1653P

Posteriormente, se conectaron los dos cables provenientes de los controladores hacia la carcasa del diodo láser DFB1653P. Uno de estos cables corresponde al controlador de temperatura TED 200 C, mientras que el segundo corresponde al controlador de corriente LDC 240 C.

Primero se encendió el controlador de temperatura. Este controlador fue configurado para operar con el termistor interno del láser, estableciendo un valor de referencia de aproximadamente:

$$T_{\text{set}} = 10 \text{ k}\Omega$$

Este valor corresponde aproximadamente a una temperatura de operación de 25°C. Se esperó a que la lectura del controlador se estabilizara cerca de este valor antes de encender el diodo láser, ya que la longitud de onda de emisión del DFB1653P depende de la temperatura del chip.

Una vez estabilizada la temperatura, se encendió el controlador de corriente del láser. El LDC 240 C fue configurado en modo de corriente constante y se ajustó una corriente de operación aproximada de:

$$I_{LD} = 20.4 \text{ mA}$$

Esta corriente fue suficiente para obtener una emisión óptica estable y observar el espectro del láser en el analizador de espectro óptico.

3.3.4 INTEGRACIÓN ÓPTICA ENTRE EL LÁSER, EL MZI Y EL OSA

Una vez encendido y estabilizado el láser, se realizó la conexión óptica del sistema. La salida de fibra del láser fue conectada mediante un conector rápido a uno de los extremos de la fibra correspondiente al MZI colocado dentro de la cavidad.

El extremo opuesto del MZI fue conectado al analizador de espectro óptico (OSA), de manera que la señal transmitida a través del interferómetro pudiera ser registrada, Figura 3.25.

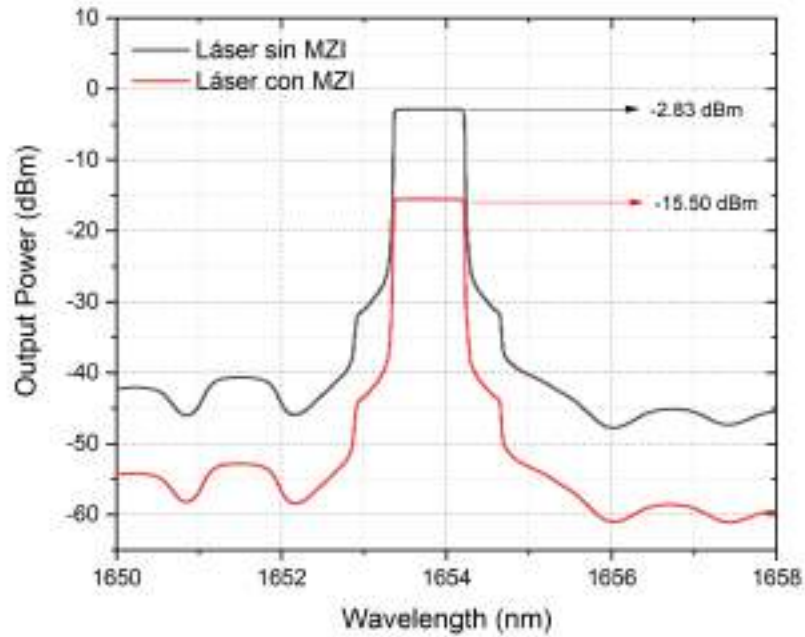


FIGURA 3.25: Comparación del espectro de emisión del láser DFB1653P medido directamente y después de propagarse a través del interferómetro Mach-Zehnder.

La configuración óptica general utilizada fue:

Láser DFB1653P $\rightarrow$ MZI dentro de la cavidad $\rightarrow$ OSA

Con esta configuración, se verificó que la señal óptica del láser atravesara correctamente el sensor y se pudiera visualizar su espectro en la OSA. Esta verificación se realizó con la cavidad cerrada y los tornillos apretados, con el objetivo de confirmar que el cierre mecánico de la cavidad no interrumpiera la transmisión óptica ni dañara la fibra.

3.3.5 MEDICIÓN DEL ESPECTRO DE REFERENCIA CON AIRE

Después de verificar la correcta transmisión óptica del sistema, se realizó la medición de referencia utilizando aire dentro de la cavidad. Esta medición sirvió como línea base para comparar posteriormente la respuesta del sensor ante distintas concentraciones de metano.

Para obtener la referencia, la cavidad fue presurizada con aire hasta alcanzar:

$$P = 15 \text{ PSI}$$

Una vez alcanzada esta presión, se cerró la llave tipo bola para mantener el aire dentro de la cavidad. Posteriormente, se registró el espectro de transmisión del MZI mediante el OSA y se guardó la traza correspondiente.

Esta medición representa la respuesta del MZI en ausencia de metano de calibración y permite identificar el estado inicial del espectro bajo las mismas condiciones de presión utilizadas en las mediciones posteriores.

3.3.6 LIBERACIÓN DEL AIRE DE REFERENCIA

Después de registrar el espectro de referencia con aire, se abrió la llave tipo bola hacia el exterior para liberar la presión contenida en la cavidad. El manómetro fue utilizado para verificar que la presión disminuyera gradualmente hasta alcanzar:

$$P = 0 \text{ PSI}$$

Esta etapa permitió dejar la cavidad lista para la introducción del primer gas de calibración. La liberación del aire fue necesaria para evitar que la medición con metano se realizara sobre una mezcla no controlada de aire presurizado y gas de calibración.

3.3.7 CONEXIÓN DE LOS TANQUES A LA CAVIDAD

Una vez tenida la medición de referencia con aire a 15 PSI se abrió la llave bola para liberar la presión interna. Teniendo la presión interna establecida a 0 PSI se procedió con la introducción de cada uno de los tanques con concentraciones de metano al 1 %, 2 %, y 2.5 %, respectivamente. Las conexiones se realizaron mediante el sistema de regulación y conducción de gas, incluyendo el regulador de presión, manguera, adaptadores y válvula de paso, Figura 3.26.



FIGURA 3.26: Imagen de la cavidad y el gas de calibración.

Antes de introducir el gas, se verificó que las conexiones estuvieran correctamente ajustadas y que la línea de gas estuviera acoplada a la entrada de la cavidad. Posteriormente, se abrió lentamente la válvula del tanque, permitiendo que el gas ingresara de forma gradual a la cavidad.

La presión fue monitoreada continuamente mediante el manómetro hasta alcanzar nuevamente:

$$P = 15 \text{ PSI}$$

Al llegar a esta presión, se cerró la válvula del tanque y la llave tipo bola, dejando el gas confinado dentro de la cavidad durante la medición.

3.3.8 MEDICIONES DE LOS ESPECTROS CON METANO AL 1 %, 2.2 % Y 2.5 %

Una vez obtenida la medición de referencia con aire, se procedió a realizar las mediciones con las mezclas de metano. Para ello, se utilizaron cilindros de gas de calibración con concentraciones de 1 %, 2.2 % y 2.5 % de CH_4 en balance de aire. Cada cilindro fue conectado de manera individual al sistema de entrada de gas de la cavidad mediante su respectiva válvula/regulador, permitiendo controlar la liberación del gas y presurizar la cavidad de forma gradual.

Para cada concentración, primero se verificó que la presión interna de la cavidad se encontrara en 0 PSI. Posteriormente, se conectó el tanque correspondiente y se abrió lentamente la válvula de suministro hasta alcanzar una presión de trabajo de 15 PSI. Una vez alcanzada dicha presión, se cerraron la válvula del tanque y la llave tipo bola, con el fin de mantener el gas confinado dentro de la cavidad durante la medición.

Con el gas dentro de la cavidad y la presión estabilizada, se registró el espectro de transmisión del MZI mediante el analizador de espectro óptico (OSA). La traza obtenida fue guardada como la respuesta del sensor para la concentración correspondiente. Este procedimiento se repitió para las concentraciones de 1 %, 2.2 % y 2.5 % de CH_4 , manteniendo las mismas condiciones de presión y operación del sistema óptico.

Además, durante cada medición se registró la temperatura de la cavidad antes y después de adquirir el espectro, con el propósito de monitorear posibles variaciones térmicas que pudieran influir en la respuesta del sensor.

3.3.9 PURGA DE LA CAVIDAD DESPUÉS DE CADA MEDICIÓN

Después de registrar el espectro correspondiente a cada concentración de metano, se realizó la purga de la cavidad. Para ello, se abrió la llave tipo bola hacia el exterior, permitiendo liberar el gas contenido en el interior del sistema. La presión fue monitoreada mediante el manómetro hasta alcanzar nuevamente 0 PSI.

Esta etapa fue necesaria antes de introducir una nueva concentración de metano, ya que permitió reducir la cantidad de gas remanente dentro de la cavidad. De esta manera, se buscó disminuir la posibilidad de mezclar gases de distintas concentraciones y mejorar la confiabilidad de las mediciones posteriores.

El proceso de purga se realizó después de cada medición, es decir, después de obtener el espectro con 1 %, posteriormente con 2.2 % y finalmente con 2.5 % de CH_4 . Esto permitió mantener una secuencia experimental ordenada y comparar los espectros obtenidos bajo condiciones similares.

3.3.10 CONDICIONES DE MEDICIÓN

Las mediciones experimentales se realizaron manteniendo una presión constante de trabajo de 15 PSI para todas las condiciones evaluadas. Esto permitió comparar los espectros obtenidos bajo una misma presión interna, reduciendo el efecto de variaciones asociadas a la presión del gas dentro de la cavidad.

La presión de 15 PSI fue seleccionada como una condición de operación práctica, ya que permitió introducir una cantidad suficiente de gas en la cavidad sin consumir excesivamente el contenido de los cilindros de calibración.

Para realizar las mediciones se utilizaron cilindros de gas de calibración con concentraciones de 1 %, 2.2 % y 2.5 % de CH_4 , como se muestra en la Figura 3.27. Estos gases permitieron evaluar la respuesta espectral del sensor MZI ante distintos niveles de concentración de metano.



FIGURA 3.27: a) Válvula empleada para controlar el suministro de gas; b) cilindros de gas de calibración utilizados durante la caracterización experimental del sensor.

En cada medición se mantuvieron constantes las condiciones de operación del láser, particularmente la temperatura de referencia de 10 k Ω , equivalente aproximadamente a 25°C, y la corriente de inyección de aproximadamente 20.4 mA. De esta forma, las variaciones observadas en el espectro de transmisión se asociaron principalmente al cambio de concentración de metano dentro de la cavidad.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica del interferómetro Mach-Zehnder (MZI) en COMSOL Multiphysics. La simulación permitió analizar la distribución del campo eléctrico dentro de la estructura, obtener el espectro de transmisión del dispositivo y comparar la respuesta simulada con el comportamiento experimental del interferómetro.

4.1.1 DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO

La Figura 4.1 muestra la distribución tridimensional del campo eléctrico obtenida mediante la interfaz *Electromagnetic Waves, Beam Envelopes* (ewbe). En esta representación se observa la propagación de la luz a lo largo de la estructura interferométrica, así como la redistribución del campo en las regiones donde existe desplazamiento de núcleo o *core-offset*.

El comportamiento observado confirma que la desalineación entre las secciones de fibra favorece el acoplamiento de energía desde el modo fundamental hacia otros modos propagantes. Esta redistribución modal es esencial para la formación del patrón interferométrico, ya que diferentes modos acumulan fases distintas durante su propagación. Al recombinarse en la salida del dispositivo, dichas diferencias de fase dan lugar a máximos y mínimos en el espectro de transmisión.

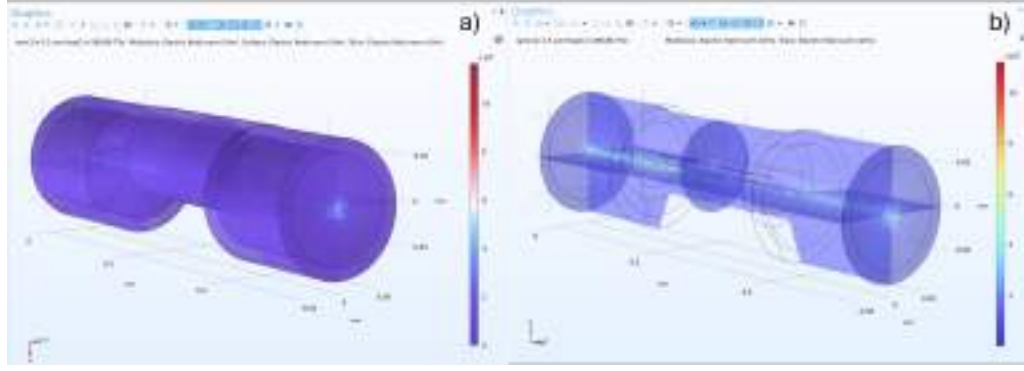


FIGURA 4.1: Distribución tridimensional del campo eléctrico $|E|$ en el interferómetro Mach-Zehnder obtenida mediante COMSOL Multiphysics.

4.1.2 ESPECTRO DE TRANSMISIÓN SIMULADO

A partir del barrido espectral realizado en COMSOL se obtuvo la respuesta de transmisión del interferómetro en función de la longitud de onda. Inicialmente, la transmisión del sistema se calculó mediante el parámetro S_{21} , el cual relaciona la señal óptica transmitida con la señal incidente. Sin embargo, para obtener una representación más cercana a un espectro óptico real, la respuesta del interferómetro fue ponderada mediante una envolvente gaussiana centrada en $1.55 \mu\text{m}$.

La expresión utilizada para representar la potencia transmitida fue:

$$T_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left[|S_{21}|^2 \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_c}{\sigma} \right)^2 \right) \right], \quad (4.1)$$

donde S_{21} es el parámetro de transmisión del interferómetro, λ es la longitud de onda del barrido, $\lambda_c = 1.55 \mu\text{m}$ es la longitud de onda central de la envolvente gaussiana y $\sigma = 0.02 \mu\text{m}$ representa el ancho de dicha envolvente.

Esta modificación permite considerar que la fuente óptica no presenta una potencia uniforme en todo el intervalo espectral, sino una distribución centrada alrededor de una longitud de onda principal. De esta manera, el espectro simulado conserva la modulación interferométrica asociada al MZI, pero queda contenido dentro de una envolvente tipo gaussiana, lo que proporciona una representación más realista de la potencia óptica transmitida.

La Figura 4.2 muestra los resultados exportados de COMSOL y el espectro de transmisión correspondiente. En el espectro se observan variaciones periódicas asociadas al fenómeno de interferencia modal dentro de la estructura SMF-TF-

SMF.

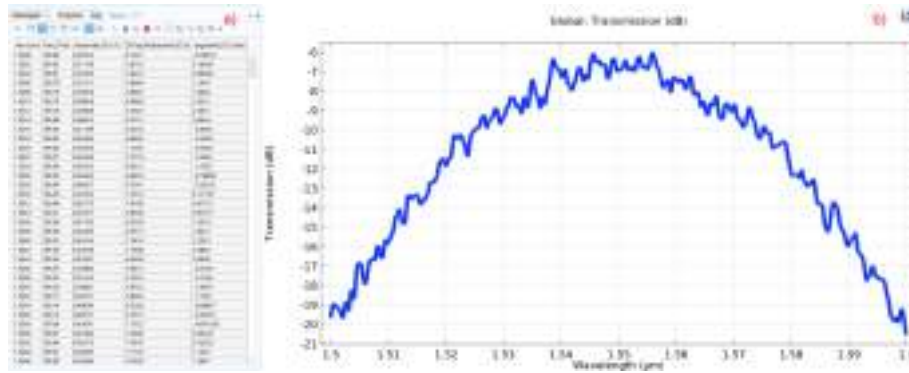


FIGURA 4.2: Resultados de transmisión obtenidos en COMSOL: a) tabla de datos generada durante el barrido espectral; b) espectro de transmisión simulado del interferómetro Mach-Zehnder.

La presencia de máximos y mínimos de transmisión confirma que el modelo numérico logró representar la interferencia generada por la diferencia de fase entre los modos propagantes.

4.1.3 POSTPROCESAMIENTO DEL ESPECTRO SIMULADO

Los datos obtenidos de COMSOL fueron exportados en formato CSV y procesados posteriormente mediante Python. El objetivo de este procesamiento fue obtener una curva espectral más estable y comparable con los resultados experimentales. Para ello, se aplicó un suavizado gaussiano considerando un ancho equivalente a un RBW de 3.5 nm, con el propósito de reducir fluctuaciones numéricas sin eliminar la estructura interferométrica principal.

Adicionalmente, se aplicó una ventana tipo Tukey para suavizar los extremos del espectro y evitar discontinuidades artificiales en la señal. Este procesamiento permitió obtener una representación más clara del comportamiento espectral del interferómetro y facilitó la identificación de máximos locales asociados a las franjas de interferencia.

El uso del suavizado permitió obtener un espectro más representativo de una medición real, Figura 4.3, ya que en los sistemas experimentales la resolución del analizador de espectro óptico introduce un promediado instrumental sobre la señal medida. Por esta razón, el postprocesamiento fue útil para comparar de manera más adecuada la simulación con el espectro experimental.

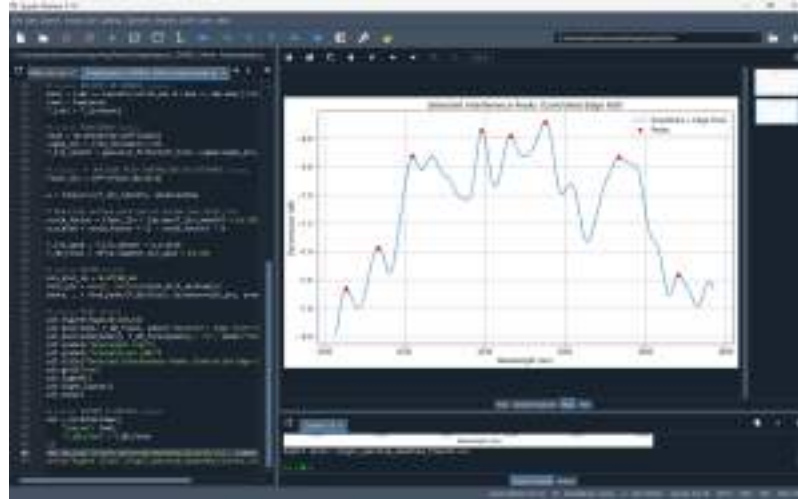


FIGURA 4.3: Espectro de transmisión del interferómetro Mach-Zehnder obtenido mediante postprocesamiento en Python a partir de los datos exportados de COMSOL.

4.1.4 COMPARACIÓN ENTRE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTO

Para evaluar la validez del modelo numérico, se comparó el espectro de transmisión simulado con el espectro obtenido experimentalmente. La Figura 4.4 muestra la superposición de ambas respuestas espectrales.

La comparación muestra una concordancia general entre la simulación y el experimento, principalmente en la tendencia global del espectro, la forma de la envolvente y la presencia de máximos y mínimos de transmisión. Esto indica que el modelo implementado reproduce de manera adecuada los fenómenos interferométricos principales del sistema.

Sin embargo, también se observan diferencias entre ambas curvas. Estas discrepancias pueden atribuirse a factores presentes en el montaje experimental que no fueron considerados completamente en la simulación, tales como pérdidas por empalmes, imperfecciones geométricas, variaciones en el desplazamiento de núcleo, curvaturas de la fibra, ruido experimental y pérdidas de acoplamiento. Además, la geometría simulada corresponde a una versión simplificada del sistema real, por lo que es esperable que existan pequeñas diferencias en la localización exacta de los máximos y mínimos.

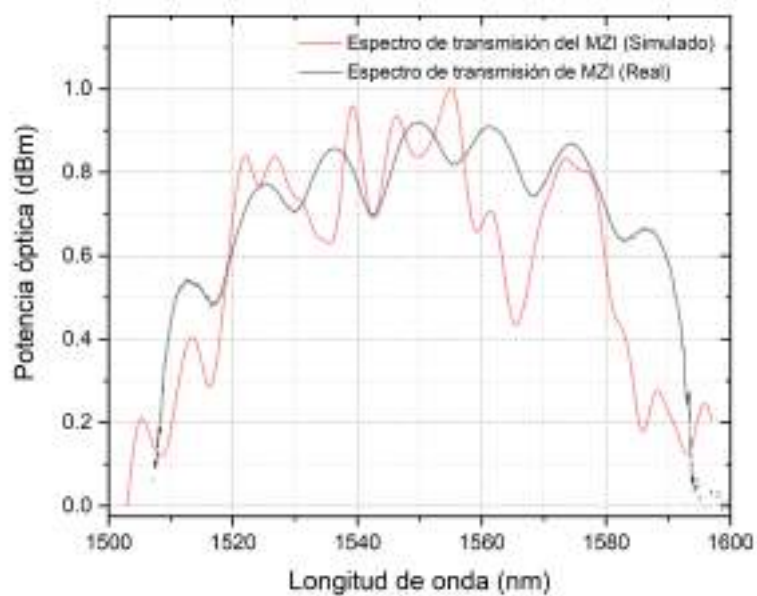


FIGURA 4.4: Comparación entre el espectro de transmisión del interferómetro Mach-Zehnder obtenido mediante simulación numérica y el espectro medido experimentalmente.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER (MZI)

4.2.1 INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE FIBRA LF54-02

Se estudió el efecto de la longitud de la fibra adelgazada LF54-02 (TF) sobre la respuesta interferométrica del sensor. En la Figura 4.5 muestra los espectros ópticos obtenidos para diferentes longitudes de fibra empalmada entre dos segmentos de fibra SMF-28.

El análisis del espectro revela que la longitud del segmento LF54-02 influye directamente en la interferencia modal y, por ende, en la estructura del espectro óptico. A medida que aumenta la longitud del tramo de fibra adelgazada, se modifica la periodicidad de las franjas y la profundidad de modulación, evidenciando que la longitud del trayecto óptico determina la separación entre máximos y mínimos del interferómetro (FSR).

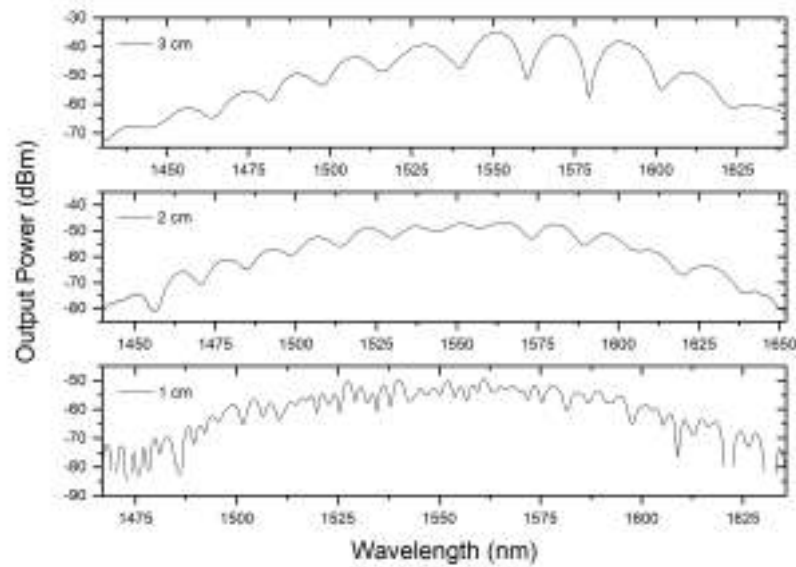


FIGURA 4.5: Espectros ópticos para diferentes longitudes de fibra LF54-02 (TF) empalmada entre dos segmentos de fibra SMF-28.

4.2.2 INFLUENCIA DE LA LONGITUD DEL CORE-OFFSET

También se evaluó el impacto de la distancia de core-offset entre las fibras SMF-28 y LF54-02 manteniendo fija la longitud del tramo adelgazado (3 cm). La Figura 4.6 muestra los tres espectros obtenidos para desplazamientos de 10, 20 y 30 μm .

Los resultados indican que la variación del core-offset afecta de manera poco considerable el acoplamiento modal, modificando poco la distribución espectral.

4.2.3 ANÁLISIS FFT DEL ESPECTRO DEL MZI

En la Figura 4.7 se presenta la caracterización inicial del interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica. En la Figura 4.7 a) se muestra el espectro de transmisión del MZI, donde se observan máximos y mínimos de potencia óptica asociados al patrón de interferencia generado por la recombinación de modos dentro de la estructura SMF-TF-SMF. La presencia de estas oscilaciones confirma que el proceso de empalme con desplazamiento de núcleo permitió excitar modos con diferentes constantes de propagación, dando lugar a una diferencia de fase acumulada a lo largo de la sección interferométrica.

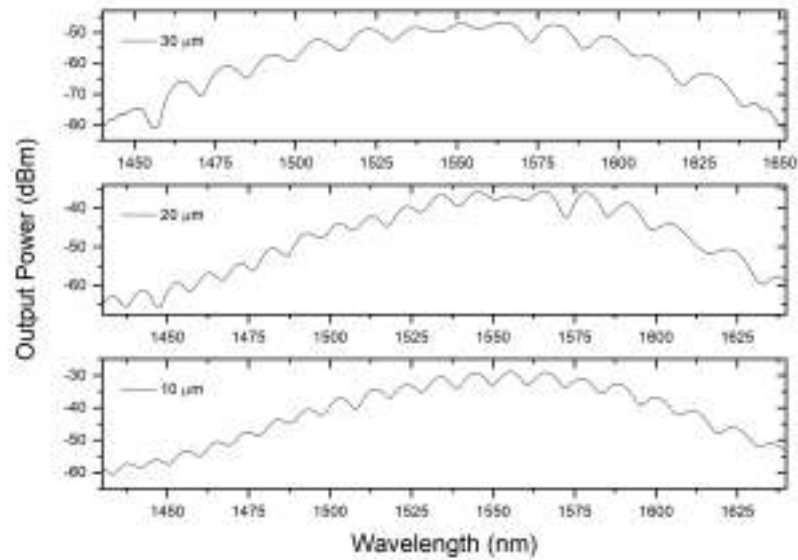


FIGURA 4.6: Espectros ópticos para diferentes longitudes de core-offset entre las dos fibras ópticas, SMF-28 y LF54-02.

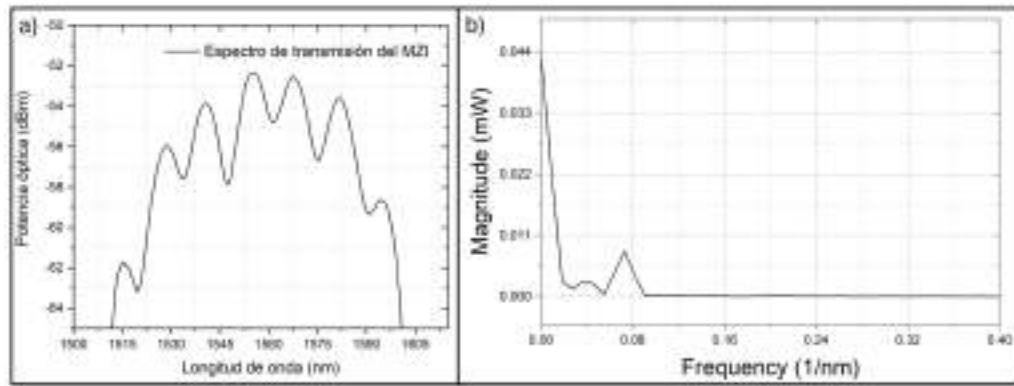


FIGURA 4.7: Caracterización espectral del interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica: a) espectro de transmisión del MZI; b) transformada rápida de Fourier (FFT) del espectro, utilizada para identificar la periodicidad dominante de las franjas.

La Figura 4.7 b) muestra la transformada rápida de Fourier (FFT) aplicada al espectro de transmisión. Este análisis permite identificar las componentes periódicas dominantes del espectro. El primer componente, cercano a baja frecuencia, está asociado principalmente a la envolvente general del espectro y a variaciones lentas de potencia. Por otro lado, el pico localizado alrededor de $0.07\text{--}0.08\text{ nm}^{-1}$ representa la periodicidad principal de las franjas interferométricas. A partir de esta frecuencia espacial puede estimarse un espaciado espectral libre aproximado mediante:

$$FSR \approx \frac{1}{f} \approx \frac{1}{0.075} \approx 13 \text{ nm}$$

por lo que el pico dominante corresponde a un FSR aproximado entre 12.5 y 14.3 nm. Este resultado indica que el MZI presenta una periodicidad interferométrica definida, lo cual es importante para su posterior uso como sensor óptico, ya que los cambios producidos por el gas podrán analizarse a partir de variaciones en la intensidad, desplazamiento o forma del espectro de transmisión.

4.3 HERMETICIDAD DE LA CAVIDAD DE METANO

4.3.1 ENSAYO SIN FIBRA ÓPTICA

Se realizaron pruebas de hermeticidad presurizando la cavidad a 50 psi y monitoreando la presión interna durante 70 minutos. La Figura 4.8 muestra la variación de presión en el tiempo para dos mediciones independientes sin la presencia de fibra óptica. En la primera medición, la presión descendió de -0.087 psi a los 2 minutos a -2.61 psi a los 60 minutos; en la segunda, la caída fue de -0.003 psi a -0.09 psi en el mismo periodo. Estos resultados confirman que la cavidad presenta una mínima pérdida de presión, atribuible a microfugas iniciales, y mantiene un nivel aceptable de hermeticidad.

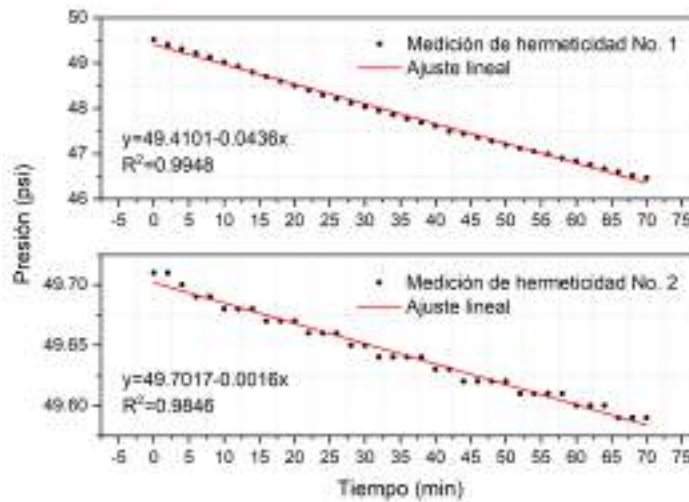


FIGURA 4.8: Datos de la presión de la cavidad vs tiempo sin fibra óptica.

4.3.2 ENSAYO CON FIBRA ÓPTICA

Posteriormente se repitió la prueba con la fibra óptica instalada dentro de la cavidad. En este caso se registró la presión durante 160 minutos (Figura 4.9). Se observó una pérdida lineal de presión durante los primeros 142 minutos, seguida por una estabilización que indica el cierre completo de microfugas y la obtención de una condición hermética. La medición inicial mostró una variación de -0.006 psi a los 2 minutos y -0.18 psi a los 60 minutos, confirmando que la cavidad mantiene su sellado incluso con el paso de las fibras ópticas a través de los puertos de entrada y salida.

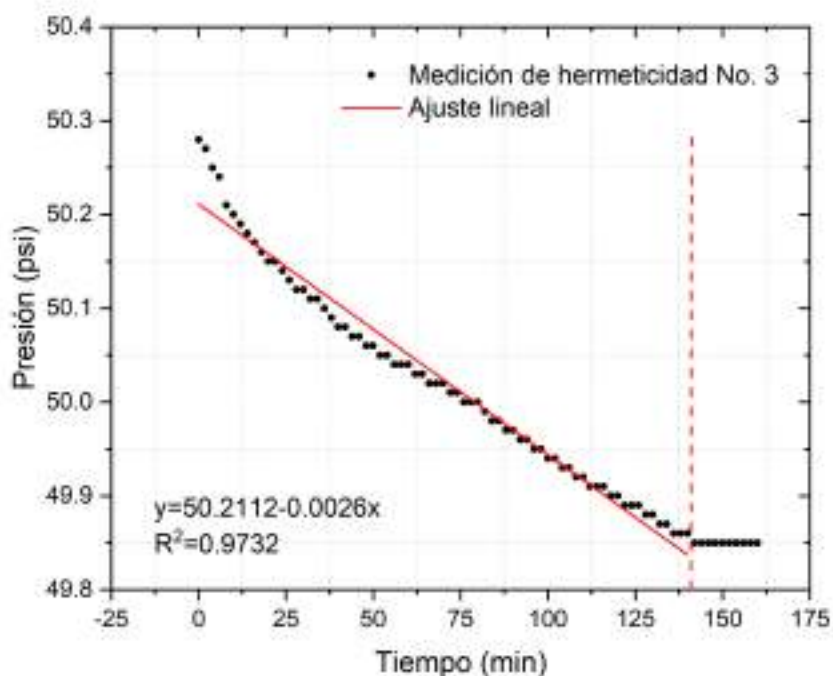


FIGURA 4.9: Datos de la presión de la cavidad vs tiempo con fibra óptica.

En conjunto, los resultados de hermeticidad validan el diseño mecánico y los materiales de sellado empleados, asegurando condiciones adecuadas para las pruebas de sensado con metano.

4.4 RESPUESTA EXPERIMENTAL DEL SENSOR MZI ANTE DIFERENTES CONCENTRACIONES DE METANO

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos al exponer el interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica a diferentes concentraciones de metano. Las mediciones se realizaron utilizando la cavidad previamente diseñada, manteniendo una presión de trabajo de 15 PSI. Se consideró una medición de referencia sin gas de metano, indicada como S/G, y posteriormente se registraron los espectros correspondientes a concentraciones de 1 %, 2.2 % y 2.5 % de CH₄.

Con el fin de evaluar la repetitividad del sistema, el procedimiento experimental se repitió en tres ocasiones. En cada medición se obtuvo el espectro de transmisión del sensor para las diferentes concentraciones, y posteriormente se calculó la atenuación promedio asociada a cada concentración. A partir de estos valores se estimó la sensibilidad del sensor mediante un ajuste lineal de la atenuación en función de la concentración de metano.

4.4.1 ESPECTROS DE TRANSMISIÓN PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE METANO

Las Figura 4.10, muestran los espectros de transmisión obtenidos en las tres mediciones realizadas. En cada gráfica se presenta la respuesta del sensor sin gas de metano, S/G, y la respuesta al introducir concentraciones de 1 %, 2.2 % y 2.5 % de CH₄.

En las tres mediciones se observa un comportamiento consistente: al aumentar la concentración de metano, la potencia óptica transmitida disminuye. Esta disminución se interpreta como una atenuación de la señal asociada a la interacción entre el gas y el sistema óptico. La tendencia observada permite confirmar que el sensor MZI es capaz de responder ante cambios en la concentración de metano dentro de la cavidad.

Aunque existen pequeñas variaciones entre las mediciones, el patrón general se mantiene. En particular, la señal de referencia S/G presenta los valores de potencia más altos, mientras que las curvas correspondientes a las concentraciones de metano se desplazan hacia menores niveles de potencia. Este comportamiento es el esperado para un sistema de detección basado en cambios de transmisión óptica, donde la presencia del gas produce una modificación medible en la señal.

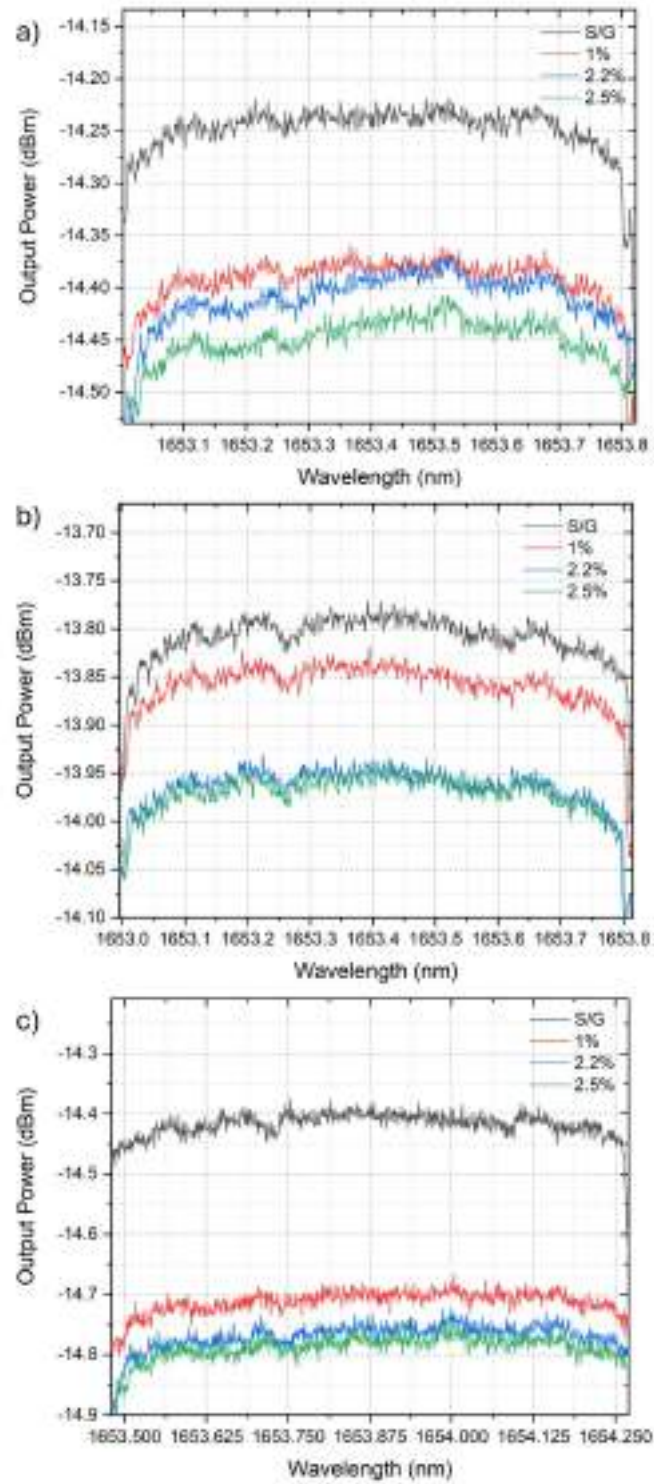


FIGURA 4.10: Primera, segunda, y tercera medición, respectivamente, del espectro de transmisión del sensor MZI para la referencia S/G y para concentraciones de metano de 1 %, 2.2 % y 2.5 % a 15 PSI.

4.4.2 CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN PROMEDIO

Para cuantificar la respuesta del sensor, se calculó la atenuación promedio asociada a cada concentración de metano. Este procedimiento se realizó promediando los valores de potencia óptica en el rango espectral analizado para cada curva experimental. Posteriormente, la atenuación fue calculada tomando como referencia la señal sin gas de metano, véase Tabla 4.1.

Concentración [%CH ₄]	Medición No. 1 [dBm]	Medición No. 2 [dBm]	Medición No. 3 [dBm]
1	0.14485	0.04913	0.29435
2.2	0.16267	0.15607	0.35139
2.5	0.20267	0.16237	0.37007

TABLA 4.1: Valores de la atenuación relativa para cada medición realizada.

De esta forma, para cada concentración se obtuvo un valor representativo de atenuación, el cual resume el cambio global de la señal óptica respecto a la referencia. Este enfoque permite reducir el efecto de fluctuaciones locales del espectro y facilita la comparación entre concentraciones.

4.4.3 SENSIBILIDAD DEL SENSOR

La sensibilidad del sensor se obtuvo a partir de un ajuste lineal de la atenuación en función de la concentración de metano. En términos generales, el ajuste puede expresarse como:

$$A(C) = A_0 + SC, \quad (4.2)$$

donde $A(C)$ es la atenuación en dB para una concentración C , A_0 es la ordenada al origen y S es la sensibilidad del sensor. En este caso, la sensibilidad tiene unidades de:

$$\text{dB}/\%CH_4.$$

Las Figura 4.11 muestra los ajustes lineales obtenidos para cada una de las tres mediciones. En todos los casos se observa una tendencia creciente de la atenuación al aumentar la concentración de metano, lo cual indica que el sensor presenta una respuesta medible ante el gas.

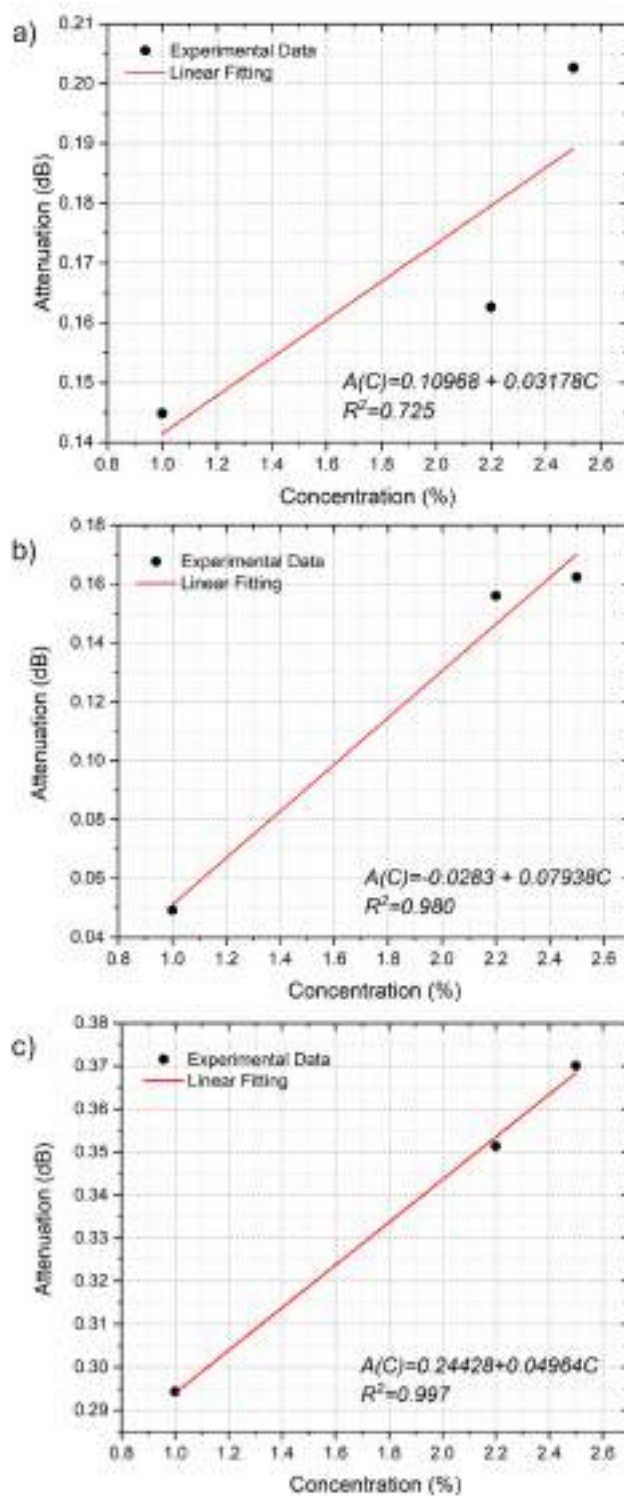


FIGURA 4.11: Curvas de sensibilidades obtenidas a partir de la primera, segunda, y tercera medición experimental, respectivamente. La atenuación promedio se gráfica en función de la concentración de metano y se ajusta mediante una regresión lineal.

4.4.4 REPETITIVIDAD DE LAS MEDICIONES

La repetitividad del sistema se evaluó comparando las sensibilidades obtenidas en las tres mediciones independientes. Los resultados muestran que el sensor conserva el mismo comportamiento general en cada repetición: la potencia transmitida disminuye al aumentar la concentración de metano y la atenuación presenta una tendencia creciente con la concentración.

Sin embargo, también se observan diferencias entre las pendientes obtenidas en cada medición. Estas variaciones pueden estar asociadas a factores experimentales como pequeñas diferencias en el acoplamiento óptico, fluctuaciones de temperatura, variaciones en la presión interna, ruido del analizador de espectro óptico, alineación de conectores o pequeñas variaciones en el llenado y purga de la cavidad.

A pesar de estas variaciones, la tendencia general se conserva, lo que indica que el sistema presenta capacidad de detección y una respuesta repetible en términos cualitativos. No obstante, la dispersión entre mediciones debe considerarse al evaluar el desempeño cuantitativo del sensor.

4.4.5 PARÁMETROS FINALES DEL SENSOR

A partir de las tres curvas de sensibilidad se calcularon los parámetros finales del sensor. Las sensibilidades obtenidas en las tres mediciones fueron:

$$S_1 = 0.03178 \text{ dB/\%CH}_4, \quad (4.3)$$

$$S_2 = 0.07938 \text{ dB/\%CH}_4, \quad (4.4)$$

$$S_3 = 0.04964 \text{ dB/\%CH}_4. \quad (4.5)$$

La sensibilidad promedio del sensor se calculó mediante:

$$\bar{S} = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{n}, \quad (4.6)$$

donde $n = 3$ es el número de mediciones realizadas. Sustituyendo los valores experimentales:

$$\bar{S} = \frac{0.03178 + 0.07938 + 0.04964}{3}, \quad (4.7)$$

$$\bar{S} = 0.0536 \text{ dB}/\%CH_4. \quad (4.8)$$

Posteriormente, se calculó la desviación estándar de las sensibilidades con el fin de evaluar la dispersión entre las tres mediciones. Al tratarse de un conjunto limitado de mediciones experimentales, se utilizó la desviación estándar muestral:

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n - 1}}. \quad (4.9)$$

Sustituyendo los valores:

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{(0.03178 - 0.0536)^2 + (0.07938 - 0.0536)^2 + (0.04964 - 0.0536)^2}{3 - 1}}, \quad (4.10)$$

$$\sigma_S = 0.02405 \text{ dB}/\%CH_4. \quad (4.11)$$

A partir de la desviación estándar y de la sensibilidad promedio, se estimó el error relativo asociado a la sensibilidad del sensor. Este parámetro permite expresar la dispersión de las mediciones respecto al valor promedio en forma porcentual:

$$E_r = \frac{\sigma_S}{\bar{S}} \times 100. \quad (4.12)$$

Sustituyendo:

$$E_r = \frac{0.02405}{0.0536} \times 100, \quad (4.13)$$

$$E_r = 44.86159 \%. \quad (4.14)$$

Este valor indica que existe una dispersión considerable entre las sensibilidades obtenidas en las tres mediciones, lo cual puede atribuirse a variaciones experimentales durante el proceso de llenado, purga, alineación del sensor, estabilidad de la cavidad o acoplamiento óptico.

Finalmente, se estimó la resolución experimental del sensor. Para ello, se utilizó la relación entre la desviación estándar de la señal de referencia y la sensibilidad promedio del sensor:

$$R = \frac{\sigma_{\text{señal}}}{\bar{S}}. \quad (4.15)$$

En este caso, la desviación estándar de la señal fue:

$$\sigma_{\text{señal}} = 0.01615 \text{ dB}. \quad (4.16)$$

Por lo tanto:

$$R = \frac{0.01615 \text{ dB}}{0.0536 \text{ dB}/\% \text{CH}_4}, \quad (4.17)$$

$$R = 0.30138 \% \text{CH}_4. \quad (4.18)$$

La resolución experimental representa la concentración mínima de metano que podría producir un cambio de señal comparable con la variabilidad experimental del sistema. En otras palabras, concentraciones menores a este valor serían difíciles de distinguir de las fluctuaciones propias de la medición.

Los parámetros obtenidos se resumen en la Tabla 4.2.

Parámetro	Valor
Sensibilidad promedio	0.0536 dB/ %CH ₄
Desviación estándar	0.02405 dB/ %CH ₄
Error relativo	44.86159 %
Resolución experimental	0.30138 %CH ₄

TABLA 4.2: Parámetros experimentales obtenidos de las mediciones con el sensor.

4.4.6 CONVERSIÓN DE LA RESOLUCIÓN EXPERIMENTAL A PPM

Además de expresar la concentración de metano en porcentaje volumétrico, también es común reportarla en partes por millón, ppm. Esta unidad indica cuántas partes de una sustancia existen por cada millón de partes de una mezcla. En el caso de gases, ppm permite expresar concentraciones menores de manera más clara.

La relación entre porcentaje y ppm está dada por:

$$1 \% = 10,000 \text{ ppm.} \quad (4.19)$$

Por lo tanto, las concentraciones de metano utilizadas en este trabajo equivalen a:

$$1 \% \text{ CH}_4 = 10,000 \text{ ppm,} \quad (4.20)$$

$$2.2 \% \text{ CH}_4 = 22,000 \text{ ppm,} \quad (4.21)$$

$$2.5 \% \text{ CH}_4 = 25,000 \text{ ppm.} \quad (4.22)$$

A partir de los resultados obtenidos, la resolución experimental del sensor fue de:

$$R = 0.30138 \% \text{ CH}_4. \quad (4.23)$$

Al convertir este valor a ppm se obtiene:

$$R_{\text{ppm}} = 0.30138 \times 10,000 = 3013.8 \text{ ppm.} \quad (4.24)$$

Por lo tanto, bajo las condiciones experimentales empleadas, el sensor presenta una resolución aproximada de:

$$R_{\text{ppm}} \approx 3014 \text{ ppm de CH}_4. \quad (4.25)$$

Este valor indica que el sistema puede distinguir cambios de concentración del orden de miles de ppm.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

En este trabajo se desarrolló e implementó un sistema óptico para la detección de metano basado en un interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica. El sistema integró una fuente láser DFB1653P, una cavidad de gas diseñada específicamente para alojar el sensor, un arreglo de suministro de gases de calibración y un analizador de espectro óptico para registrar la respuesta espectral del interferómetro.

Inicialmente, se realizó el análisis y diseño de los principales elementos del sistema. Se fabricó un interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica mediante una configuración SMF-TF-SMF, empleando empalmes con desplazamiento de núcleo para inducir acoplamiento modal. Esta estructura permitió obtener un espectro de transmisión con características interferométricas, confirmando que el sensor fabricado presentaba una respuesta óptica medible.

Asimismo, se diseñó y construyó una cavidad de aluminio para contener el gas de prueba y permitir la interacción controlada entre el metano y el sensor de fibra óptica. La cavidad incorporó elementos de sellado, sujeción de fibra, monitoreo de presión y temperatura, así como accesorios de seguridad. Esto permitió realizar mediciones bajo condiciones controladas y reproducibles, manteniendo una presión de trabajo de 15 PSI.

También se llevó a cabo la integración del láser DFB1653P con sus respectivos controladores de temperatura y corriente. El control térmico permitió estabilizar el láser en una condición cercana a 25°C, mientras que el controlador de corriente permitió operar la fuente óptica de manera estable. La verificación del espectro de emisión confirmó que el láser operaba en la región cercana a 1653 nm, la cual es relevante para la detección óptica de metano.

Por otra parte, la simulación numérica realizada en COMSOL Multiphysics permitió analizar la distribución del campo eléctrico y la respuesta espectral del interferómetro. Los resultados mostraron que el desplazamiento de núcleo favorece la redistribución modal dentro de la fibra, lo cual explica la formación del patrón interferométrico observado experimentalmente. La comparación entre el espectro simulado y el espectro experimental mostró una concordancia general en la tendencia de la respuesta, validando el uso del modelo numérico como herramienta complementaria para interpretar el comportamiento del sensor.

Finalmente, los resultados experimentales demostraron que el sensor MZI presenta una respuesta óptica ante la presencia de metano. En las tres mediciones realizadas se observó una disminución de la potencia transmitida al incrementar la concentración de CH_4 , lo cual confirma que el sistema es capaz de detectar cambios en el medio gaseoso dentro de la cavidad.

Los resultados obtenidos indican que el sensor presenta una respuesta medible ante diferentes concentraciones de metano y que puede distinguir variaciones de concentración del orden de décimas de porcentaje bajo las condiciones experimentales utilizadas. En particular, la resolución experimental obtenida fue de $0.30138\% \text{CH}_4$, equivalente aproximadamente a 3014 ppm, considerando que $1\% \text{CH}_4 = 10,000$ ppm. Este valor indica que el sistema desarrollado puede resolver cambios de concentración del orden de miles de ppm dentro del intervalo evaluado.

Aunque esta resolución demuestra la capacidad del sensor para detectar variaciones de metano, también evidencia que futuras mejoras deberán enfocarse en reducir dicho valor para permitir la detección de concentraciones menores.

Sin embargo, el error relativo obtenido muestra que la repetitividad cuantitativa aún puede mejorarse. Esta dispersión puede estar relacionada con variaciones experimentales durante el montaje, el acoplamiento óptico, la presurización de la cavidad o el registro espectral.

En conjunto, el comportamiento observado valida el principio de operación del sistema propuesto y demuestra el potencial del interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica como plataforma para la detección de metano. Aunque el sistema aún requiere optimización para mejorar su resolución y repetitividad, los resultados obtenidos constituyen una base experimental sólida para el desarrollo de sensores ópticos de CH_4 con capacidad de monitoreo más sensible y estable.

5.2 CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un sistema de detección de metano basado en fibra óptica. Este objetivo se cumplió mediante el diseño, fabricación e integración de un sensor interferométrico Mach-Zehnder (MZI), una cavidad de gas, una fuente láser en la región cercana a 1653 nm y un sistema de medición espectral.

De manera particular, se logró:

- Fabricar un interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica mediante la técnica de desplazamiento de núcleo (*core-offset*).
- Diseñar y construir una cavidad de gas para alojar el sensor y permitir su exposición controlada a diferentes concentraciones de metano.
- Integrar y operar el diodo láser DFB1653P mediante control térmico y control de corriente.
- Verificar experimentalmente la emisión del láser en la región cercana a 1653 nm, correspondiente a una zona de interés para la absorción del metano en el infrarrojo cercano.
- Obtener espectros de transmisión del sistema bajo diferentes concentraciones de CH₄.
- Analizar la variación de la intensidad transmitida en función de la concentración de metano.
- Calcular parámetros de desempeño del sensor, tales como sensibilidad, desviación estándar, error relativo y resolución experimental.

A partir de los resultados experimentales, se observó que la respuesta óptica del sistema presentó cambios medibles al exponer el sensor a diferentes concentraciones de metano. En particular, se registró una disminución de la intensidad transmitida conforme aumentó la concentración de CH₄ dentro de la cavidad. Este comportamiento permitió establecer una relación entre la concentración del gas y la atenuación de la señal óptica transmitida.

Por lo tanto, los resultados obtenidos permiten considerar que la hipótesis planteada fue cumplida. Se comprobó que un sistema basado en un interferómetro

Mach-Zehnder en fibra óptica, fabricado mediante desplazamiento de núcleo e integrado dentro de una cavidad de gas, puede presentar variaciones medibles al ser expuesto a distintas concentraciones de metano.

Asimismo, el uso de una fuente láser con emisión cercana a 1653 nm permitió evaluar la interacción entre el metano y la señal óptica transmitida en una región espectral asociada a la absorción del gas. Bajo estas condiciones, el incremento en la concentración de CH_4 produjo una variación en la intensidad registrada, lo cual permitió estimar la sensibilidad promedio, la repetitividad entre mediciones y la resolución experimental del sensor.

En conjunto, estos resultados demuestran la viabilidad del sistema desarrollado como una propuesta experimental para la detección de metano mediante variaciones en la transmisión óptica de un interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica.

5.3 LIMITACIONES DEL TRABAJO

Aunque los resultados obtenidos son favorables, se identificaron algunas limitaciones experimentales. La principal fue la dispersión observada entre las sensibilidades de las tres mediciones, reflejada en un error relativo de 44.86159 %. Esta variación puede estar asociada a factores como cambios en el acoplamiento óptico, fluctuaciones de temperatura, estabilidad del láser, pequeñas variaciones en la presión interna de la cavidad, pérdidas en conectores, ruido instrumental o diferencias durante el proceso de llenado y purga de la cavidad.

Otra limitación importante es que las mediciones se realizaron en un intervalo reducido de concentraciones de metano. Aunque fue posible observar una tendencia de atenuación al aumentar la concentración, sería conveniente ampliar el número de puntos experimentales para obtener una curva de calibración más robusta.

Asimismo, el sistema aún depende de una alineación y conexión manual de componentes ópticos y mecánicos, lo cual puede introducir variaciones entre mediciones. Por esta razón, una mejora en la estabilidad mecánica y en el control del procedimiento experimental podría reducir la dispersión de los resultados.

5.4 TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro, se propone adaptar la cavidad para que el sensor pueda interactuar de forma continua con el aire del ambiente, evitando que la medición

dependa únicamente de la introducción manual de gas mediante tanques de calibración. Para ello, sería necesario rediseñar el sistema de entrada y salida de gas, permitiendo un flujo controlado del medio exterior a través de la región sensible del MZI. Esta modificación permitiría realizar mediciones en tiempo real y avanzar hacia un sistema de monitoreo ambiental capaz de detectar concentraciones de metano de manera continua.

También se recomienda realizar mediciones con un mayor número de concentraciones de metano, incluyendo valores más bajos, con el objetivo de evaluar con mayor precisión el límite de detección y la linealidad del sensor.

Otra posible mejora consiste en optimizar la geometría del interferómetro, modificando parámetros como la longitud de la sección sensible, el desplazamiento de núcleo y el tipo de fibra utilizada. Estas modificaciones podrían incrementar la sensibilidad del sensor y mejorar la relación señal-ruido.

Finalmente, se propone complementar el análisis experimental con simulaciones adicionales que incluyan pérdidas reales, variaciones geométricas y cambios en el índice de refracción del medio circundante. Esto permitiría obtener un modelo más cercano al sistema físico y facilitaría el diseño de futuras versiones del sensor.

[illegible]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Karakurt, I., Aydin, G., & Aydiner, K. (2012). Sources and mitigation of methane emissions by sectors: A critical review. *Renewable Energy*, 39, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.006>
- [2] Yergin, D. (1991). The prize: The epic quest for oil, money, & power. Simon & Schuster.
- [3] Pollock, C. (2016). The canary in the coal mine. *Journal of Avian Medicine and Surgery*, 30(4), 386–391. <https://doi.org/10.1647/1082-6742-30.4.386>
- [4] The canary resuscitator — Science and Industry Museum. (2018, 27 marzo). Science And Industry Museum Blog. <https://blog.scienceandindustrymuseum.org.uk/canary-resuscitator/>
- [5] Thomas, J. M. (2015). Sir Humphry Davy and the coal miners of the world: a commentary on Davy (1816) ‘An account of an invention for giving light in explosive mixtures of fire-damp in coal mines’. *Philosophical Transactions Of The Royal Society A Mathematical Physical And Engineering Sciences*, 373(2039), 20140288. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0288>
- [6] Humphry Davy’s miners’ safety lamp — Royal Institution. (s. f.). Royal Institution. [https://www.rigb.org/explore-science/explore/collection/Humphry-davys-miners-safety-lamp](https://www.rigb.org/explore-science/explore/collection/ Humphry-davys-miners-safety-lamp)
- [7] Johnson, O. (1927). Development of Catalytic Combustion Sensors for Combustible Gas Detection. *Journal of Industrial Gas Safety*, 12(3), 45–52.
- [8] Zhou, Y., Li, J., Zhang, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2019). A novel fabricating process of catalytic gas sensor based on a microdroplet method. *Micromachines*, 10(2), 1–12. <https://doi.org/10.3390/mi10020123>
- [9] Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Wiley.

- [10] Nikolic, M. V., Milovanovic, V., Vasiljevic, Z. Z., & Stamenkovic, Z. (2020). Semiconductor Gas Sensors: Materials, Technology, Design, and Application. *Sensors*, 20(22), 6694. <https://doi.org/10.3390/s20226694>
- [11] Yunusa, Z., Hamidon, M. N., Kaiser, A., & Awang, Z. (2014). Gas sensors: A review. *Sensors & Transducers*, 168(4), 61–75. <https://goo.su/2uNC04>
- [12] Bareza, N. J., Gopalan, K. K., Alani, R., Paulillo, B., & Pruner, V. (2020). Mid-infrared gas sensing using graphene plasmons tuned by reversible chemical doping. *ACS Photonics*, 7(4), 879–884. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b01714>
- [13] Allsop, T., & Neal, R. (2021). A review: Application and implementation of optic fibre sensors for gas detection. *Sensors*, 21(20), 6755. <https://doi.org/10.3390/s21206755>
- [14] Zhang, J., Xiang, Y., Wang, C., Chen, Y., Tjin, S. C., & Wei, L. (2022). Recent advances in optical fiber enabled radiation sensors. *Sensors*, 22(3), 1126. <https://doi.org/10.3390/s22031126>
- [15] Noor, N. M., Jusoh, M. A., Razis, A. F., Alawiah, A., & Bradley, D. A. (2015). Flat Ge-doped optical fibres for food irradiation dosimetry. *AIP Conference Proceedings*, 1657(1), 100007. <https://doi.org/10.1063/1.4915214>
- [16] Fernandez Fernandez, A., Brichard, B., O’Keeffe, S., Fitzpatrick, C., Lewis, E., Vaille, J. R., Dusseau, L., Jackson, D. A., Ravotti, F., Glaser, M., & El-Rabii, H. (2008). Real-time fibre optic radiation dosimeters for nuclear environment monitoring around thermonuclear reactors. *fusion engineering and design*, 83(1), 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.05.034>
- [17] Rozaila, Z. S., Khandaker, M. U., Abdul Sani, S. F., Sabtu, S. N., Amin, Y. M., Maah, M. J., & Bradley, D. A. (2017). Environmental monitoring through use of silica-based TLD. *Journal of Radiological Protection*, 37(3), 761–779. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa770e>
- [18] Phéron, X., Girard, S., Boukenter, A., Brichard, B., Delepine-Lesoille, S., Bertrand, J., & Ouerdane, Y. (2012). High γ – ray dose radiation effects on the performances of Brillouin scattering based optical fiber sensors. *Optics Express*, 20(24), 26978–26985. <https://doi.org/10.1364/OE.20.026978>
- [19] Di Francesca, D., Vecchi, G. L., Girard, S., Alessi, A., & Brugger, M. (2018). Radiation induced attenuation in single-mode phosphosilicate optical fibers for dosimetry. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 65(1), 126–131. <https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2776218>

- [20] Benton, E. R., & Benton, E. V. (2001). Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 184(1–2), 255–294. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00748-0](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00748-0)
- [21] Suter, J. J., Poret, J. C., & Rosen, M. J. (1992). Fiber optic ionizing radiation detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 39(4), 674–679. <https://doi.org/10.1109/23.159686>
- [22] Veronese, I., Cantone, M. C., Chiodini, N., Coray, A., Fasoli, M., Lomax, A., Mones, E., Moretti, F., & Vedda, A. (2010). Feasibility study for the use of cerium-doped silica fibres in proton therapy. *Radiation Measurements*, 45(7), 635–639. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.100>
- [23] Hashim, S., Bradley, D. A., Saripan, M. I., Ramli, A. T., & Wagiran, H. (2010). The thermoluminescence response of doped SiO_2 optical fibres subjected to fast neutrons. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(4–5), 700–703. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.10.027>
- [24] Mahdiraji, G. A., Dermosesian, E., Safari, M. J., Adikan, F. R. M., & Bradley, D. A. (2015). Collapsed-hole Ge-doped photonic crystal fiber as a diagnostic radiation dosimeter. *Journal of Lightwave Technology*, 33(16), 3439–3445. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2406775>
- [25] Alyahyawi, A., Jupp, T., Alkhorayef, M., & Bradley, D. A. (2018). Tailor-made Ge-doped silica-glass for clinical diagnostic X-ray dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*, 138, 45–49. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.07.011>
- [26] Caretto, N., Chiodini, N., Moretti, F., Origgi, D., Tosi, G., & Vedda, A. (2010). Feasibility of dose assessment in radiological diagnostic equipments using Ce-doped radio-luminescent optical fibers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 612(2), 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.10.200>
- [27] Industrial Fiber Optics. (s.f.). Tyndall's Historical Experiment.
- [28] Alexander Graham Bell's PHOTOPHONE
- [29] Kao, C. K., & Hockham, G. A. (1966). Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 113(7), 1151–1158. <https://doi.org/10.1049/piee.1966.0189>
- [30] Keiser, G. (2000). *Optical Fiber Communications* (3rd ed.). McGraw-Hill.

- [31] Ghatak, A., & Thyagarajan, K. (1998). *Introduction to Fiber Optics*. Cambridge University Press.
- [32] Meyer, J., Sompo, J., & von Solms, S. (2022). *Fiber Lasers: Fundamentals with MATLAB® Modelling*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003256380>
- [33] Senior, J. M. (2009). *Optical Fiber Communications: Principles and Practice* (3rd ed.). Pearson Education.
- [34] Agrawal, G. P. (2010). *Fiber-Optic Communication Systems* (4th ed.). Wiley-Interscience.
- [35] Palais, J. C. (2005). *Fiber Optic Communications* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.
- [36] Udd, E., & Spillman Jr., W. B. (2011). *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists* (2nd ed.). Wiley.
- [37] Grattan, K. T. V., & Meggitt, B. T. (2000). *Optical Fiber Sensor Technology: Fundamentals*. Springer.
- [38] Culshaw, B., & Kersey, A. (2008). Fiber-optic sensing: A historical perspective. *Journal of Lightwave Technology*, 26(9), 1064–1078.
- [39] Measures, R. M. (2001). *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. Academic Press.
- [40] Kersey, A. D., et al. (1997). Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1442–1463.
- [41] Lee, B. (2003). Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 9(2), 57–79.
- [42] Hartog, A. H. (2017). *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. CRC Press.
- [43] Oscroft, G. (1992). Intrinsic fibre optic sensors. *Sensor Review*, 12(2), 10–14. <https://doi.org/10.1108/eb007872>
- [44] Othonos, A., & Kalli, K. (1999). *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House.
- [45] Sun, H., Yang, S., Zhang, X., Yuan, L., Yang, Z., & Hu, M. (2014). Simultaneous measurement of temperature and strain or temperature and curvature based on an optical fiber Mach–Zehnder interferometer. *Optics Communications*, 340, 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.11.085>

- [46] Zhang, Y., Wang, Y., & Wang, D. (2019). A review of optical fiber Mach–Zehnder interferometers with micro-cavity fabricated by femtosecond laser and sensing applications. *Optical Fiber Technology*, 50, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.01.010>
- [47] Zhou, D., & Wang, Y. (2014). Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review. *Sensors*, 14(4), 7451–7488. <https://doi.org/10.3390/s140407451>
- [48] Cano-Contreras, M., Guzman-Chavez, A. D., Mata-Chavez, R. I., Vargas-Rodriguez, E., Jauregui-Vazquez, D., Claudio-Gonzalez, D., Estudillo-Ayala, J. M., Rojas-Laguna, R., & Huerta-Mascotte, E. (2014). All-Fiber Curvature Sensor Based on an Abrupt Tapered Fiber and a Fabry–Pérot Interferometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(22), 2213–2216. <https://doi.org/10.1109/lpt.2014.2349979>
- [49] Zhang, G., et al. (2014). All-fiber curvature sensor based on an abrupt tapered fiber and a Fabry–Pérot interferometer. *Optics Communications*, 328, 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.04.084>
- [50] Pawar, D., Lo Presti, D., Lemma, E. D., Rainer, A., Kumar, A., Kanawade, R., Silvestri, S., Schena, E., & Massaroni, C. (2024). Polymeric PEI/PEG coated optical fiber Fabry–Perot interferometer for CO_2 detection. *IEEE Sensors Journal*, 24(24), 40883–40889. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3478088>
- [51] Wang, X., & Wolfbeis, O. S. (2014). Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2013–2015). *Analytical Chemistry*, 88(1), 203–227.
- [52] Taha, B. A., Ali, N., Sapiee, N. M., Fadhel, M. M., Mat Yeh, R. M., Bachok, N. N., Al Mashhadany, Y., & Arsad, N. (2021). Comprehensive Review Tapered Optical Fiber Configurations for Sensing Application: Trend and Challenges. *Biosensors*, 11(8), 253. <https://doi.org/10.3390/bios11080253>
- [53] Bhardwaj, V., Kishor, K., & Sharma, A. (2020). Tapered optical fiber geometries and sensing applications based on Mach-Zehnder Interferometer: A review. *Optical Fiber Technology*, 58, 102302. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102302>
- [54] Russell, P. St. J. (2003). Photonic crystal fibers. *Science*, 299(5605), 358–362. <https://doi.org/10.1126/science.1079280>
- [55] Sierra-Hernandez, J. M., Castillo-Guzman, A., Selvas-Aguilar, R., Vargas-Rodriguez, E., Gallegos-Arellano, E., Guzman-Chavez, D. A., Estudillo-Ayala, J. M., Jauregui-Vazquez, D., & Rojas-Laguna, R. (2015). Torsion sensing setup based on a

- three beam path Mach–Zehnder interferometer. *Microwave And Optical Technology Letters*, 57(8), 1857–1860. <https://doi.org/10.1002/mop.29208>
- [56] Wang, Q., Kong, L., Dang, Y., Xia, F., Zhang, Y., Zhao, Y., Hu, H., & Li, J. (2015). High sensitivity refractive index sensor based on splicing points tapered SMF-PCF-SMF structure Mach-Zehnder mode interferometer. *Sensors And Actuators B Chemical*, 225, 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.11.047>
- [57] Knight, J. C. (2003). Photonic crystal fibres. *Nature*, 424(6950), 847–851. <https://doi.org/10.1038/nature01940>
- [58] Dudley, J. M., Genty, G., & Coen, S. (2006). Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. *Reviews of Modern Physics*, 78(4), 1135–1184. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1135>
- [59] Rifat, A. A., Mahdiraji, G. A., Chow, D. M., Shee, Y. G., Ahmed, R., & Adikan, F. R. M. (2015). Photonic crystal fiber-based sensors. *Sensors*, 15(2), 11499–11526. <https://doi.org/10.3390/s150511499>
- [60] Benabid, F., Knight, J. C., Antonopoulos, G., & Russell, P. St. J. (2002). Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber. *Science*, 298(5592), 399–402. <https://doi.org/10.1126/science.1076408>
- [61] Wang, C., Huang, H., Meng, D., Zhang, J., Ho, H. L., & Jin, W. (2018). Hollow-core photonic bandgap fibers: properties and sensing technology. *Opto-Electronic Engineering*, 45(9), 180151.
- [62] Wang, A., Pickrell, G. R., Xiao, H., & May, R. G. (2003). Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry–Perot interferometric sensors. *Measurement Science and Technology*, 14(9), R61–R72. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/9/202>
- [63] Pereira, D. A., Lopes, C. R., & Silva, M. J. (2014). Radiation dosimeter using an extrinsic fiber optic sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 215, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.04.012>
- [64] Reinsch, T., Blöcher, G., Milsch, H., Bremer, K., Lewis, E., Leen, G., & Lochmann, S. (2012). A fibre optic sensor for the in situ determination of rock physical properties. *arXiv preprint arXiv:1208.1233*. <https://arxiv.org/abs/1208.1233>

- [65] Hu, D. J. J., Wong, R. Y.-N., & Shum, P. P. (2018). Photonic crystal fiber-based interferometric sensors. En *Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications* (Capítulo 2). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70713>.
- [66] Hayashi, N., Mizuno, Y., Nakamura, K., Set, S. Y., & Yamashita, S. (2018). Fiber-optic cascaded forward Brillouin scattering seeded by backward stimulated Brillouin scattering: conceptual proposal and experimental validation. arXiv preprint arXiv:1804.00452. <https://arxiv.org/abs/1804.00452>
- [67] Chiodo, N., Quintin, N., Stefani, F., Wiotte, F., Camisard, E., Chardonnet, C., Santarelli, G., Amy-Klein, A., Pottier, P.-E., & Lopez, O. (2015). Cascaded optical fiber link using the Internet network for remote clocks comparison. arXiv preprint arXiv:1509.05885. <https://arxiv.org/abs/1509.05885>
- [68] Gao, S., Ji, C., Ning, Q., Chen, W., & Zhang, Y. (2020). High-sensitive Mach-Zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core-offset splicing technique. *Optical Fiber Technology*, 56, 102202. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102202>
- [69] Chen, J., Wang, Y., & Wang, D. (2018). Study of a large lateral core-offset in-line fiber modal interferometer. *Optics and Precision Engineering*, 26(12), 3021–3028. <https://doi.org/10.3788/OPE.20182612.3021>
- [70] Zhang, J., Tian, C., Guo, Z., & Wang, W. (2021). Fiber-optic vector magnetic field sensor based on a magnetic-fluid-infiltrated large-core-offset Mach-Zehnder interferometer. *Applied Optics*, 60(34), 10548–10555. <https://doi.org/10.1364/AO.433456>
- [71] Tang, J., Zhou, J., Guan, J., Long, S., Yu, J., Guan, H., Lu, H., Luo, Y., & Zhang, J. (2016). Fabrication of Side-Polished Single Mode-Multimode-Single Mode Fiber and Its Characteristics of Refractive Index Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, PP(99), 1–1. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2615941>
- [72] Correia, R., James, S., Lee, S.-W., Morgan, S. P., & Korposh, S. (2018). Bio-medical application of optical fibre sensors. *Journal of Optics*, 20(7), 073003. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aac9b3>
- [73] Huerta-Mascotte, E., Sierra-Hernandez, J., Mata-Chavez, R., Jauregui-Vazquez, D., Castillo-Guzman, A., Estudillo-Ayala, J., Guzman-Chavez, A., & Rojas-Laguna, R. (2016). A Core-Offset Mach Zehnder Interferometer Based on A Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber and Its Torsion Sensing Application. *Sensors*, 16(6), 856. <https://doi.org/10.3390/s16060856>

- [74] Nguyen, L. V., Hwang, D., Moon, S., Moon, D. S., & Chung, Y. (2008). High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch. *Optics Express*, 16(15), 11369. <https://doi.org/10.1364/oe.16.011369>
- [75] Hao, X., Tong, Z., Zhang, W., & Cao, Y. (2014). A fiber laser temperature sensor based on SMF core-offset structure. *Optics Communications*, 335, 78–81. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.08.065>
- [76] Wang, Q., Meng, H., Fan, X., Zhou, M., Liu, F., Liu, C., Wei, Z., Wang, F., & Tan, C. (2020). Optical fiber temperature sensor based on a Mach-Zehnder interferometer with single-mode-thin-core-single-mode fiber structure. *Review Of Scientific Instruments*, 91(1). <https://doi.org/10.1063/1.5128485>
- [77] Wang, J., Bian, C., Gang, T., & Hu, M. (2020). High-sensitive Mach-Zehnder interferometer for humidity measurements based on concatenating single-mode concave cone and core-offset. *Optik*, 208, 164465. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164465>
- [78] Nazeri, K., & Bradley, C. (2020). The effect of photonic crystal fibre structure on the performance of Mach-Zehnder interferometer fibre optic gas sensors. *Optical Fiber Technology*, 58, 102294. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102294>
- [79] Zhou, X., Zhang, Y., & Wang, Y. (2012). Femtosecond laser fabricated micro Mach-Zehnder interferometer with deposited palladium film for hydrogen sensing. *Optics Letters*, 37(11), 1940–1942. <https://doi.org/10.1364/OL.37.001940>
- [80] Pacheco-Chacon, E., Sierra-Hernandez, J., Gallegos-Arellano, E., Avila-Garcia, Bianchetti, M., Hernandez-Romano, I., Lopez-Dieguez, Y., Herrera-Piad, L., & Rojas-Laguna, R. (2021). An aluminum-coated asymmetric core-offset Mach-Zehnder interferometer temperature sensor. *Optical Fiber Technology*, 65, 102591. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102591>
- [81] Vasconcelos, F. W. C. de, Rodrigues, L. Q., Araujo, M., & Guimarães, G. (2024). Research and Improvement in Magnetic Field Sensors Using Mach-Zehnder Interferometer with Cobalt Ferrite Nanoparticles. *Sensors*, 11(9), 806. <https://doi.org/10.3390/photonics11090806>
- [82] Kok, S., Go, Y., Wang, X., & Wong, D. (2024). A review of nanostructure coating techniques to achieve high-precision optical fiber sensing applications. *Nanomanufacturing*, 4(4), 214–240. <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing4040015>

- [83] Frankenberg, C., Warneke, T., Butz, A., Aben, I., Hase, F., Spietz, P., & Brown, L. (2008). Methane spectroscopy in the near infrared and its implication on atmospheric retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8, 10021. <https://doi.org/10.5194/acpd-8-10021-2008>
- [84] Gordon, I. E., Rothman, L. S., Hargreaves, R. J., Hashemi, R., Karlovets, E. V., Skinner, F., ... & Kochanov, R. V. (2022). The HITRAN2020 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 277, 107949. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949>
- [85] Liu, Y., Lin, H., Dai, Y., Zhou, A., & Yuan, L. (2018). Fiber in-line Mach–Zehnder interferometer for gas pressure sensing. *IEEE Sensors Journal*, 18(19), 8012–8016. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2864277>
- [86] Li, Z., Liao, C., Wang, Y., Xu, L., Wang, D., Dong, X., Liu, S., Wang, Q., Yang, K., & Zhou, J. (2015). Highly-sensitive gas pressure sensor using twin-core fiber based in-line Mach-Zehnder interferometer. *Optics Express*, 23(5), 6673. <https://doi.org/10.1364/oe.23.006673>
- [87] Vitoria, I., Ruiz Zamarreño, C., Ozcariz, A., & Matias, I. R. (2021). Fiber optic gas sensors based on lossy mode resonances and sensing materials used therefor: A comprehensive review. *Sensors*, 21(3), 731. <https://doi.org/10.3390/s21030731>
- [88] Wang, H., Pu, S., Wang, N., Dong, S., & Huang, J. (2013). Magnetic field sensing based on singlemode–multimode–singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding. *Optics Letters*, 38(19), 3765. <https://doi.org/10.1364/ol.38.003765>
- [89] Arevalo-Bautista, L. J., Selvas-Aguilar, R., Sierra-Hernandez, J. M., Gallegos-Arellano, E., Rico-Mendez, M. A., De Cordoba-Castella, P. J. F., & Toral-Acosta, D. (2024). Displaced thinned single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer tested for temperature and curvature applications. *Results In Optics*, 17, 100744. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2024.100744>
- [90] Li, L., Xia, L., Xie, Z., & Liu, D. (2012). All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications. *Optics Express*, 20(10), 11109–11120. <https://doi.org/10.1364/OE.20.011109>
- [91] Zhang, S., Zhang, W., Gao, S., Geng, P., & Xue, X. (2012). Fiber-optic bending vector sensor based on Mach–Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper. *Optics Letters*, 37(21), 4480–4482. <https://doi.org/10.1364/OL.37.004480>

-
- [92] Zhao, Y., Li, X., & Cai, L. (2015d). Mach–Zehnder interferometer formed by a large core-offset splicing fiber for temperature and displacement measurement. *Optics Communications*, 356, 54-58. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.06.081>
- [93] Yang, F., Zong, S., Li, X., Hu, Y., Wang, Z., Qu, Y., Wang, J., & Li, Y. (2025). Optical fiber methane sensor based on Mach–Zehnder interferometer induced by multimode interference. *Micromachines*, 16(4), 406. <https://doi.org/10.3390/mi16040406>

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Leonardo Jahir Arévalo Bautista

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Ingeniería Física Industrial

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Tesis:

DESARROLLO DE UN SENSOR DE METANO BASADO EN
INTERFEROMETRÍA MACH-ZEHNDER CON FIBRA ÓPTICA

El autor nació el 28 de enero de 2002 en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, lugar donde creció y realizó parte de su formación académica. Es hijo de Ana Laura Bautista Pecina y Rubén Arévalo Bautista.

Cursó sus estudios de primaria y secundaria en el Instituto Luis Pasteur. Posteriormente, realizó sus estudios de nivel medio superior en la Preparatoria No. 2 de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Más adelante, ingresó a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde obtuvo el título de Licenciado en Física. Durante su formación universitaria y de posgrado, participó durante aproximadamente cinco años como estudiante en el Laboratorio de Fotónica del Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas (CICFIM), donde desarrolló actividades relacionadas con sistemas ópticos, fibra óptica y sensores fotónicos.

Asimismo, durante un año se desempeñó como presidente del capítulo estudiantil SPIE UANL, participando en actividades de divulgación, organización académica y promoción de la óptica y la fotónica dentro de la comunidad estudiantil.