

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.

Estudio y desarrollo de un algoritmo de
reconocimiento de patrones con aplicación en
sensores interferométricos de fibra óptica

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN
MECATRÓNICA

PRESENTA:

María de los Ángeles Martínez Guerrero

DIRECTOR: Dr. Rodolfo Martínez Manuel

CODIRECTOR: Dr. Luis Manuel Valentín Coronado

AGUASCALIENTES, AGUASCALIENTES.

Julio 28, 2025

Resumen

Los sistemas interferométricos de fibra óptica (SIFO) destacan por su alta sensibilidad en la medición de variables físicas. No obstante, su implementación en configuraciones multipunto o multiparamétricas incrementa la complejidad en la interpretación de señales, debido a la superposición y a respuestas no lineales de los sensores. Ante este desafío, se propone un algoritmo de reconocimiento de patrones diseñado específicamente para SIFO, el cual se distingue por su baja complejidad matemática y su reducida necesidad de datos de entrenamiento, a diferencia de los modelos tradicionales.

Además, se propone una técnica de ampliación del rango de medición en sensores interferométricos con base en el batimiento entre las señales interferométricas, que permite ampliar el rango de medición del sensor sin modificar la estructura física de éste. Ambos desarrollos—el algoritmo y la técnica de ampliación del rango de medición—son integrados en un sistema multipunto y validados mediante simulaciones y pruebas experimentales. Los resultados demuestran una identificación precisa de señales aún en condiciones de superposición de las señales, lo que confirma la eficacia del enfoque propuesto para optimizar sistemas SIFO mediante soluciones computacionales ligeras.

Palabras clave: Sensores interferométricos, algoritmo de reconocimiento de patrones, rango de medición, sistema multipunto

Abstract

Fiber optic interferometric systems are known for their high sensitivity in the measurement of physical variables. However, their implementation in multipoint or multiparameter configurations increases the complexity of signal interpretation due to signal overlap and nonlinear sensor responses. To address this challenge, a pattern recognition algorithm specifically designed for IFOS is proposed, characterized by its low mathematical complexity and reduced need for training data, in contrast to traditional models.

Moreover, a technique for extending the measurement range is proposed, based on the beat phenomenon between interferometric signals. This approach allows for range extension without altering the physical structure of the sensor. Both developments - the algorithm and the range extension technique - are integrated into a multipoint system and validated through simulations and experimental tests. The results demonstrate accurate signal identification even under overlapping conditions, confirming the effectiveness of the proposed approach to optimize SIFO systems using lightweight computational solutions.

Keywords: Interferometric sensors, pattern recognition algorithm, measuring range, multipoint system

Dedicada a mi padre, Juan Martínez, y a mis hermanos, Juan Alberto y Luis Martínez. Siempre serán mi fuerza; gracias por darme siempre lo mejor de ustedes. Los amo profundamente.

Y a mi compañera de vida, mi madre, María Guerrero. Gracias por tu amor, por tu apoyo incondicional, por creer en mí y por ser un ejemplo de valentía y resiliencia. Todo lo que soy, te lo debo a ti.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Rodolfo Martínez Manuel por creer en mí, por apoyarme en todo momento y por compartir generosamente su conocimiento. Y al Dr. Luis Manuel Valentín Coronado por su apoyo y paciencia a lo largo del proyecto, y por aportar siempre un toque de humor a las reuniones.

Agradezco a mi comité de seguimiento, el Dr. Mikhail Shlyagin y el Dr. Natanel Cuando Espitia, por compartir cada cuatrimestre observaciones y comentarios que, sin duda, enriquecieron este trabajo.

Agradezco al Mtro. Jonathan Esquivel, compañero de laboratorio, por compartir su conocimiento con paciencia y generosidad.

Agradezco a mi amigo, el Dr. Andrés Camarillo Avilés, por ofrecer siempre su ayuda en el laboratorio, por escucharme y por darme ánimo cuando más lo necesitaba.

Agradezco a mis compañeros de cubículo, Amanda, Miguel, Ricardo y Melissa por hacer más ameno el día a día y el espacio de trabajo.

Agradezco con mucho cariño a mis amigos Noé, Lizeth y Alejandra. Los amo profundamente; son parte fundamental de este logro, y sin su apoyo, nada habría sido igual.

Agradezco a mi pareja, Miguel Calvillo, por acompañarme durante estos dos años, por caminar a mi lado en este proyecto, y por estar presente en los momentos buenos y malos. Gracias por tanto.

Finalmente, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo económico brindado a través de la beca para cursar estudios de posgrado en el Centro de Investigaciones en Óptica.

Índice general

Lista de figuras	vi
Glosario	viii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Definición del problema	5
1.3. Justificación	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo General	7
1.4.2. Objetivos Específicos	7
1.5. Hipótesis	7
1.6. Resumen de la tesis	8
2. Estado del Arte	10
2.1. Fundamentos teóricos	10
2.1.1. Sensores interferométricos de fibra óptica	11
2.1.2. Algoritmos de reconocimiento de patrones (ARP)	12
2.2. Implementación de SIFO	15
2.2.1. Sensores puntuales	16
2.2.2. Sistemas multipunto	17
2.2.3. Sensores multiparámetros	18
2.3. Algoritmos-SIFO	19
2.3.1. Sensores puntuales e inteligencia artificial	20
2.3.2. Sensores multipunto e inteligencia artificial	22

2.3.3. Sensores multiparamétricos e inteligencia artificial	23
2.4. Conclusión del capítulo	25
3. Rango Fabry-Pérot	26
3.1. Rango SIFO	27
3.1.1. Modelado y simulación del sensor	28
3.1.2. Fabricación y caracterización del sensor	34
3.1.3. Versión compacta del sensor	36
3.2. Estudio-Algoritmo	37
3.2.1. Descripción del ARP	37
3.2.1.1. Vectorización de las señales	37
3.2.1.2. Cálculo de similaridad	38
3.2.1.3. Clasificación de la señal	40
3.3. Procesamiento-ARP	40
3.3.1. Sensores puntuales	41
3.3.2. Sensores multipunto	42
3.4. Conclusión del capítulo	42
4. Experimentación y resultados	44
4.1. Exp.-Rango	44
4.1.1. Sensor dividido	45
4.1.2. Sensor versión compacta	47
4.2. Algoritmo	48
4.2.1. Índice de refracción	49
4.2.2. Temperatura	50
4.2.3. Deformación mecánica	52
4.2.4. Señales multiparamétricas	53
4.3. ARP-multipunto	55
4.4. Discusión	59
5. Conclusiones	61
5.1. Conclusiones	61
5.2. Recomendaciones	62

Referencias

64

Lista de figuras

2.1. Ejemplos de diferentes configuraciones de interferómetros; a) Interferómetro Fabry-Pérot; b) Interferómetro Mach-Zehnder; c) Interferómetro Michelson; d) Interferómetro Sagnac. <i>Imagen adaptada de Milou (2021)</i>	12
2.2. Ejemplo de la estructura básica de una CNN	14
2.3. Integración de sensores de fibra óptica con algoritmos de reconocimiento de patrones. <i>Imagen tomada de Guzman-Chavez et al. (2022)</i>	20
3.1. Arreglo experimental de dos cavidades F-P.	27
3.2. Espectro de la señal utilizando cavidades diferentes; 3.1mm y 6.3mm.	31
3.3. Espectro de la señal utilizando cavidades similares; 3.1mm y 3.38mm.	31
3.4. Procedimiento para fabricación de espejos. a) Corte transversal en la punta de la fibra. b) Ataque con ácido fluorhídrico. c) empalme con otra fibra previamente cortada.	35
3.5. Arreglo experimental de la versión compacta del sensor.	36
3.6. Vectorización de señales interferométricas	38
3.7. Comparación de señales interferométricas	39
4.1. Arreglo experimental a) Sensor dividido en 2 brazos; b) Sensor compacto	45
4.2. Resultados de la técnica de aplicación de rango a) Señal de la envolvente con diferentes temperaturas; b) Respuesta lineal del seguimiento del máximo de la envolvente.	46

4.3. Resultados de la técnica de aplicación de rango a) Señal envolvente con diferentes temperaturas; b) Respuesta lineal del seguimiento del máximo de la envolvente.	47
4.4. Arreglo experimental a) Para los sensores con medición en transmitancia; b) Para los sensores con medición en reflejancia . . .	48
4.5. Índice de refracción; a)Arreglo experimental; b)Configuración del sensor; c)Señales del SIFO.	49
4.6. Matriz de confusión de la clasificación de valores de índice de refracción.	50
4.7. Temperatura; a)Arreglo experimental; b)Configuración del sensor; c)Señales del SIFO.	51
4.8. Matriz de confusión de la clasificación de valores de temperatura .	52
4.9. Deformación mecánica; a)Arreglo experimental; b)Señales del SIFO	52
4.10. Matriz de confusión clasificación de valores de deformación mecánica.	53
4.11. Curvatura y dirección; a)Arreglo experimental; b)Configuración del sensor; c)Señales del SIFO.	54
4.12. Matriz de confusión de la clasificación de valores de magnitud y dirección de curvatura.	54
4.13. Espectro del sistema multipunto (S1 y S2, se refieren a sensor 1 y 2, respectivamente. Cada uno a una temperatura diferente.). . .	56
4.14. Matrices de confusión de cada sensor por separado; a)Clasificación de temperaturas del S1; b)Clasificación de temperaturas del S2. .	57
4.15. Arreglo experimental del sistema multipunto	58
4.16. Matriz de confusión; a) Clasificación de las temperaturas del sensor 1; b) Clasificación de las temperaturas del sensor 2.	59

Glosario

<i>ANN</i>	Redes neuronales artificiales
<i>ARP</i>	Algoritmo de reconocimiento de patrones
<i>BBS</i>	Fuente de espectro amplio
<i>CNN</i>	Redes neuronales convencionales
<i>DNN</i>	Redes neuronales profundas
<i>ECF</i>	Fibra óptica de núcleo elíptico
<i>EF</i>	Factor de mejora
<i>EFR</i>	Rango espectral de la envolvente
<i>FBG</i>	Regillas de Bragg
<i>FFT</i>	Transformada rápida de Fourier
<i>FP</i>	Fabry-Pérot
<i>FSR</i>	Rango espectral libre
<i>HCF</i>	Fibra óptica de núcleo hueco
<i>HF</i>	Ácido fluorhídrico
<i>IDFT</i>	Transformada discreta inversa de Fourier
<i>IR</i>	Índice de refracción
<i>MCF</i>	Fibra óptica multinúcleo
<i>MI</i>	Interferómetro Michelson

<i>ML</i>	Aprendizaje automático
<i>MZI</i>	Interferómetro Mach-Zehnder
<i>NC</i>	Fibra óptica sin núcleo
<i>OPD</i>	Diferencia de camino óptico
<i>OSA</i>	Analizador de espectros ópticos
<i>SIFO</i>	Sensores interferométricos de fibra óptica
<i>SMF</i>	Fibra monomodal estándar
<i>SVM</i>	Máquinas de soporte vectorial

1

Introducción

En la actualidad, los sistemas de sensores de fibra óptica representan una opción confiable para el monitoreo de diferentes parámetros físicos, gracias a ventajas como su inmunidad a interferencias electromagnéticas, alta sensibilidad, su capacidad para operar en diversas condiciones ambientales y su tamaño compacto Elsherif et al. (2022).

En el caso de los sensores interferométricos, la señal proveniente de estos dispositivos suele ser cuasiestática, es decir, refleja cambios graduales en los parámetros físicos medidos. Este comportamiento permite aplicar técnicas de procesamiento como el seguimiento de envolventes, la detección de mínimos y máximos, o el análisis espectral mediante la transformada de Fourier, que son adecuadas para extraer información relevante a partir de variaciones lentas o periódicas en la señal. Además, dependiendo de la configuración del sensor, la señal puede presentar variaciones de fase, amplitud o frecuencia, asociadas a parámetros como temperatura, deformación mecánica, índice de refracción, curvatura, humedad, elementos químicos o muestras biológicas. Para procesar estas señales, se emplean técnicas bien establecidas como la transformada de Fourier, el seguimiento de envolventes o la detección de mínimos y máximos. No obstante, estas técnicas no son tan efectivas cuando las señales presentan respuestas no lineales, señales con frecuencias muy similares, o patrones de interferencia de mayor complejidad comparado con la típica señal cosenoidal producto de la interferencia de dos ondas. Este tipo de señales con mayor complejidad se obtienen por diferentes razones, tales como el incremento en el número de parámetros medidos, la cantidad

1. INTRODUCCIÓN

de sensores involucrados o el diseño de sensores con fibras especiales, las cuales pueden presentar respuestas no lineales o patrones no periódicos.

Adicionalmente, en configuraciones que incorporan múltiples sensores interferométricos, la identificación de la señal asociada a cada sensor puede volverse complicada. Esto se debe a la necesidad de realizar un proceso de demodulación para separar y distinguir la respuesta individual de cada sensor, lo cual puede ser complejo en presencia de una superposición espectral. En estas condiciones, diferentes valores físicos pueden generar respuestas similares, lo que complica la interpretación directa de las señales. Para enfrentar este tipo de desafíos, algunos trabajos han explorado el uso de técnicas de aprendizaje automático para mejorar la identificación de componentes de señal. Por ejemplo, en Nikolai Ushakov and Lioku (2022), se propone una estrategia basada en el uso combinado de machine learning y el algoritmo MUSIC, que mejora la estimación del número de componentes presentes en señales interferométricas, superando el desempeño de métodos tradicionales como la transformada de Fourier.

En estos escenarios, la implementación de técnicas de reconocimiento de patrones se vuelve importante no solo para garantizar un monitoreo adecuado, sino que también abre la posibilidad de diseñar sistemas de sensores más novedosos, cuya complejidad no se vea limitada por las restricciones del procesamiento clásico de señales interferométricas.

Ante estas limitaciones, si bien los algoritmos de inteligencia artificial (IA), como las redes neuronales, han mejorado significativamente el desempeño en tareas de demodulación y clasificación, su implementación suele requerir grandes volúmenes de datos para el entrenamiento. Este requisito puede resultar excesivo o poco práctico, ya que las señales interferométricas presentan en muchos casos patrones estables y repetitivos. Por ello, se vuelve relevante el desarrollo de algoritmos capaces de operar eficazmente con cantidades reducidas de información, sin comprometer la precisión.

El propósito general de este trabajo es optimizar el procesamiento de señales en sensores interferométricos de fibra óptica mediante el desarrollo y aplicación de una técnica para la ampliación de rango de medición y un algoritmo de reconocimiento de patrones. En primer lugar, se presenta la técnica para la ampliación del rango de medición en sensores interferométricos Fabry-Pérot, que permite

superar la ambigüedad de 2π y, como prueba de concepto, se realiza el modelo, la simulación y experimentos con el parámetro de temperatura. Posteriormente, se desarrolla un algoritmo de reconocimiento de patrones diseñado para operar con una reducida información de entrada en el entrenamiento, adaptado especialmente para este tipo de sensores. Finalmente, se propone la combinación de ambos enfoques, con el objetivo de reducir la complejidad del sistema y generar una herramienta robusta y eficaz para el procesamiento y la interpretación de las señales.

1.1. Antecedentes

Actualmente, los sensores interferométricos de fibra óptica se utilizan en diversos escenarios gracias a su alto rendimiento, por ejemplo, en ambientes con alta interferencia electromagnética, en aplicaciones dentro de entornos explosivos o inflamables donde los sensores electrónicos podrían generar chispas, o en el monitoreo estructural a larga distancia, donde el uso de sensores electrónicos sería más costoso. Estos sensores se basan en la división de la luz en al menos dos ondas que, al reencontrarse, interfieren entre sí. La diferencia en el camino óptico recorrido por cada onda genera una señal de interferencia cuya variación depende de los cambios en los parámetros físicos a los que se expone el sensor. Milou (2021).

Cabe destacar que las tecnologías de sensores de fibra óptica se han consolidado como soluciones viables en entornos agresivos, como aplicaciones médicas de imagenología, monitoreo estructural en ingeniería civil, exploración en la industria energética, vigilancia ambiental, para la medición de parámetros mecánicos, químicos y térmicos. Dispositivos como los interferómetros de Mach-Zehnder, Fabry-Pérot, Michelson y Sagnac han sido ampliamente desarrollados y aplicados en contextos donde se requiere un alto desempeño, entendido como alta sensibilidad, precisión, inmunidad a interferencias electromagnéticas y capacidad de operación en condiciones extremas de temperatura, presión, etc. Venketeswaran et al. (2022).

A lo largo de los años, se han desarrollado diversas metodologías para el monitoreo y procesamiento de señales interferométricas Li et al. (2021). Entre

ellas destacan el seguimiento de mínimos o máximos en la señal y la aplicación de la transformada de Fourier. Sin embargo, la complejidad del monitoreo aumenta significativamente cuando intervienen múltiples factores, como en los escenarios multiparamétricos, multipunto, o los sensores que no presentan una respuesta lineal al parámetro medido.

Para abordar esta problemática, se ha reportado el uso de algoritmos de IA Martínez-Manuel et al. (2023, 2022); Venketeswaran et al. (2022). Aunque han demostrado ser efectivos, los algoritmos clásicos están diseñados para resolver problemas complejos, como los que se presentan en aplicaciones médicas avanzadas (por ejemplo, imagenología y diagnóstico asistido), en visión computacional o en procesamiento de señales con alta variabilidad temporal. Sin embargo, requieren grandes cantidades de datos para su entrenamiento. Esta exigencia puede resultar excesiva en el caso de sensores interferométricos, donde los patrones de interferencia tienden a ser estables y repetibles. Aun cuando existan respuestas no lineales o interacción entre variables físicas, el cambio espectral asociado a una variación en un parámetro específico suele presentar un comportamiento reproducible. Por ello, no siempre es necesario recopilar grandes volúmenes de datos para lograr un buen desempeño del algoritmo.

Además, en cuanto a los sensores interferométricos Fabry-Pérot, una oportunidad de mejora viene con el rango de medición definido por el periodo de la señal interferométrica, el cual a su vez está definido por la longitud de la cavidad, la cual es inversamente proporcional al rango de medición. En trabajos recientes como Liu et al. (2022) y Chen et al. (2024), se han propuesto esquemas que combinan un interferómetro Fabry-Pérot con rejillas de Bragg (FBG), donde la FBG actúa como una referencia espectral que permite localizar segmentos del espectro o identificar intervalos de medición específicos. Sin embargo, estas propuestas no incrementan el rango total de medición, sino que únicamente dividen el espectro interferométrico para una mejor sensibilidad, pero el rango de medición sigue acotado por la longitud de la cavidad. Por tanto, estas propuestas aportan mejoras en la interpretación de la señal, pero no en el aumento de rango de medición. En contraste, en esta tesis se propone una técnica sencilla basada en la concatenación de dos cavidades interferométricas de diferente longitud, sin necesidad de FBGs ni estructuras paralelas, para ampliar el rango de medición de temperatura de

manera eficiente y práctica. El uso de dos cavidades también ha sido previamente reportado para generar un batimiento conocido como efecto Vernier Liu et al. (2021b), el cual es ampliamente conocido por mejorar la sensibilidad del sensor al aislar una de las cavidades. Sin embargo, en este trabajo ambas cavidades son expuestas simultáneamente al parámetro medido, lo que permite extender el rango de medición en lugar de centrarse únicamente en la sensibilidad. Además, cuando se plantea un sistema multipunto (es decir, con dos o más sensores en cascada), se incorpora un algoritmo de reconocimiento de patrones que permite identificar de forma precisa cuál sensor está activo, utilizando solo una cantidad reducida de datos y sin requerir procesos de demodulación complejos.

En este contexto, el desarrollo de un algoritmo de reconocimiento de patrones más robusto, pero con menor complejidad, permitiría optimizar tanto el procesamiento y monitoreo de las señales como el uso eficiente de la información de entrada, facilitando una identificación confiable con un conjunto de datos más reducido.

1.2. Definición del problema

En el campo de la instrumentación óptica, los sensores interferométricos de fibra óptica han demostrado ser una solución eficaz para aplicaciones en entornos exigentes, como plantas industriales, zonas con alta interferencia electromagnética, ambientes explosivos o inflamables, y sistemas de monitoreo estructural a larga distancia. A pesar de sus ventajas, el procesamiento de las señales que generan puede volverse complejo, especialmente en aplicaciones multiparamétricas o cuando se emplean múltiples sensores en un mismo sistema.

Actualmente, se han utilizado diferentes metodologías para el monitoreo de estas señales. No obstante, estas técnicas presentan limitaciones cuando los sensores tienen respuestas no lineales o cuando hay información cruzada entre múltiples sensores, dificultando la identificación. En respuesta a esta problemática, se han explorado algoritmos de inteligencia artificial, que han demostrado buenos resultados, pero requieren una gran cantidad de datos para entrenarse adecuadamente, lo cual puede resultar excesivo o innecesario dado que los patrones de interferencia en este tipo de señales son, en muchos casos, repetibles.

Por tanto, el problema específico que se busca resolver es la falta de algoritmos de reconocimiento de patrones que permitan el procesamiento eficiente de señales interferométricas complejas con una limitada cantidad de datos de entrada, sin comprometer la precisión en la identificación de los sensores o parámetros involucrados.

Una de las características importantes de los sensores interferométricos es que la señal generada es de naturaleza cosenoidal resultado de la interferencia óptica. Esta forma periódica implica una ambigüedad cada 2π en la fase. Esto se traduce en un período definido como rango espectral libre (FSR por sus siglas en inglés) el cual depende directamente de la longitud de la cavidad y define el rango de medición de los sensores. Para abordar esta condición, en esta tesis se propone, en primer lugar, una técnica basada en la combinación de cavidades interferométricas con longitudes específicas. Esta configuración permite generar una señal envolvente que amplía el rango de medición sin necesidad de aumentar la complejidad estructural del sistema. Posteriormente, al extender esta técnica hacia un sistema multipunto, surge una nueva dificultad: la interpretación de señales más complejas debido a la superposición de respuestas. Para resolver este desafío, se desarrolla un algoritmo de reconocimiento de patrones, capaz de identificar con precisión tanto el parámetro medido como el sensor activo, optimizando así el análisis de datos en entornos con múltiples fuentes de información.

1.3. Justificación

El desarrollo de este algoritmo resulta de gran relevancia tanto en el campo de los sensores de fibra óptica como en el de los algoritmos de IA. El optimizar el procesamiento y monitoreo de SIFO, representará un avance en el área de inteligencia artificial al reducir la cantidad de información necesaria para el entrenamiento del algoritmo sin afectar su efectividad.

Este desarrollo tiene el potencial de ser aplicado no solo en el ámbito de los sensores de fibra óptica, sino también en otros escenarios donde se requiera reconocimiento de patrones con características cuasi estáticas, es decir, que presenten cambios periódicos y repetibles en cada valor del parámetro. Esto permitiría

optimizar el uso de algoritmos, evitando la recolección excesiva de datos y reduciendo los errores asociados al sobreentrenamiento, especialmente en contextos donde existe un desajuste entre la información de entrada y el comportamiento esperado del modelo.

Con lo anterior, se lograría optimizar el tiempo destinado a la adquisición de datos necesarios para el entrenamiento, lo que se traduce en procesos más eficientes y escalables para futuras aplicaciones.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un algoritmo de reconocimiento de patrones que optimice el monitoreo de sensores interferométricos de fibra óptica para reducir la cantidad de información requerida en el entrenamiento, manteniendo la efectividad en escenarios con señales cuasi estáticas y sistemas multipunto.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una técnica de sensores de fibra óptica con ampliación del rango de medición, que permita generar señales interferométricas con envolvente.
- Estudiar y desarrollar un algoritmo de reconocimiento de patrones para señales interferométricas.
- Implementar el algoritmo propuesto utilizando señales interferométricas obtenidas de un sistema multipunto de sensores de fibra óptica.

1.5. Hipótesis

El algoritmo de reconocimiento de patrones propuesto, con base en la vectorización de señales interferométricas, permite identificar con al menos un 95 % de exactitud el valor del parámetro físico asociado a cada señal en sensores de fibra óptica, incluso bajo condiciones de sensado multipunto. Esta precisión se

mantiene en señales generadas mediante una técnica de ampliación del rango de medición, entendida como la extensión del intervalo de valores del parámetro físico que puede ser correctamente distinguido por el sistema sensor.

1.6. Resumen de la tesis

En este capítulo se introdujo el contexto general de los SIFO. Se discutieron los retos asociados a configuraciones complejas, como los sistemas multipunto, donde la superposición de las señales y la presencia de respuestas no lineales dificultan la interpretación directa de las señales. Asimismo, se mencionó una estrategia para extender el rango efectivo de medición sin modificar la estructura física de los interferómetros, mediante el uso combinado de cavidades y procesamiento espectral. Finalmente, se justificó el uso de algoritmos de reconocimiento de patrones (ARP) como herramientas clave para abordar esta complejidad, haciendo énfasis en la necesidad de métodos computacionalmente eficientes.

Los siguiente capítulos de la presente tesis se organizan de la siguiente manera:

El capítulo 2 presenta los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del trabajo. Se describen los principios de los SIFO, las configuraciones más comunes de sensores y la ambigüedad de fase, así como una revisión del estado del arte sobre técnicas de identificación de señales. Asimismo, se describen los fundamentos necesarios para entender el funcionamiento de los ARP y cómo estos han sido utilizados recientemente en sensores de fibra óptica.

El capítulo 3 detalla la técnica propuesta para la ampliación del rango de medición, abarcando el modelo y la simulación de dicha técnica. Además, se presenta el funcionamiento del algoritmo propuesto de reconocimiento de patrones. Se describe su estructura matemática, su estrategia de entrenamiento con bajo volumen de datos, y su capacidad para distinguir señales interferométricas incluso en condiciones de superposición espectral.

En el capítulo 4 aborda la técnica de ampliación de rango basada en cavidades acopladas. Se explica su principio de funcionamiento, su integración con el algoritmo propuesto y su implementación en entornos simulados. Además, presenta los resultados experimentales y de simulación obtenidos con el sistema completo.

Se analiza el desempeño del algoritmo y de la técnica de ampliación de rango en un escenario multipunto.

Para finalizar, el capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo desarrollado y las recomendaciones que se podrían llevar a cabo para futuras mejoras en el sistema.

2

Estado del Arte y Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos necesarios para el desarrollo de la técnica de ampliación de rango de medición en sensores interferométricos y del algoritmo de reconocimiento de patrones (ARP) propuesto, así como la integración de ambas propuestas en un sistema de medición.

Primero, se presentan los fundamentos para entender el funcionamiento de los SIFO describiendo su estructura, su comportamiento interferométrico y los principales tipos de sistema según su forma de implementación: sensores puntuales, multipunto y multiparamétricos. En el capítulo se da el contexto para poder entender la importancia de los interferómetros tipo Fabry-Pérot y la relevancia de optimizar su rango de medición.

Después, se presentan los fundamentos de los ARP, dándole importancia a su método de clasificación y a la forma de entrenamiento, así como a los retos que conlleva la implementación de estos algoritmos en sensores de fibra óptica.

Por último, se describe cómo han sido implementados los sistemas de reconocimiento de patrones en los diferentes sistemas de sensores de fibra óptica. Se analiza cómo estos algoritmos mejoran el procesamiento de señales provenientes de sensores de fibra óptica y cómo aún hay oportunidades de optimización.

2.1. Fundamentos teóricos

Esta sección presenta los fundamentos teóricos del proyecto, abordando dos componentes principales: los sensores interferométricos de fibra óptica (SIFO) y

los algoritmos de reconocimiento de patrones (ARP). Se describen los principios de funcionamiento, configuración y retos de los SIFO, así como el papel de los ARP en la clasificación de señales ópticas, sentando así las bases para entender su integración en la propuesta del trabajo.

2.1.1. Sensores interferométricos de fibra óptica

Los SIFO son de gran relevancia en el área de sensores de fibra óptica, destacando por su sensibilidad y versatilidad para operar en diferentes ambientes que suponen desafíos para sensores convencionales, además de que suelen ser de bajo costo.

Estos sensores funcionan con el principio de interferencia óptica, donde dos o más haces de luz recorren diferentes caminos ópticos dentro de la estructura de fibra. La superposición de estos haces genera patrones interferométricos cuya modulación es sensible a diferentes parámetros físicos. Entre las arquitecturas más utilizadas destacan los interferómetros Fabry-Pérot (FP), Mach-Zehnder, Michelson y Sagnac (véase Fig.2.1), cada uno con diferentes características que determinan su sensibilidad, rango dinámico y campos de aplicación Elsherif et al. (2022); Milou (2021).

Los SIFO operan midiendo los cambios en la diferencia de camino óptico (OPD) generados por perturbaciones físicas externas. Esta diferencia de camino se traduce en una variación de fase entre haces de luz, los cuales se combinan generando un patrón de interferencia. Dicho patrón se manifiesta como una señal espectral cuyo desplazamiento está directamente relacionado con los cambios en el entorno, tales como temperatura, presión, índice de refracción o deformación. Al analizar estas variaciones en el espectro interferométrico, es posible cuantificar con alta precisión el parámetro físico que las produjo Milou (2021).

Su principio de operación está basado en medir los cambios de fase entre haces de interferencia en longitud de onda, que se manifiestan como desplazamientos en el espectro, variaciones de intensidad o cambios en el patrón de interferencia. Para su demodulación se emplean técnicas como el seguimiento de máximos y mínimos o el análisis espectral por transformada de Fourier Milou (2021); Wen et al. (2022).

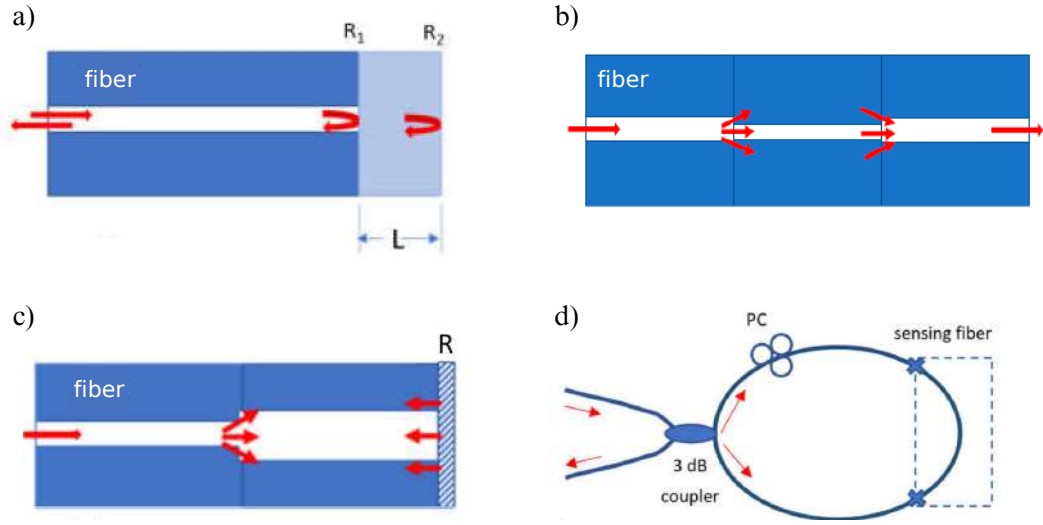


Figura 2.1: Ejemplos de diferentes configuraciones de interferómetros; a) Interferómetro Fabry-Pérot; b) Interferómetro Mach-Zehnder; c) Interferómetro Michelson; d) Interferómetro Sagnac. *Imagen adaptada de Milou (2021)*

Los sensores interferométricos de fibra óptica constituyen una tecnología importante para la detección precisa y confiable de parámetros físicos y químicos, siendo relevantes en ambientes donde son necesarias mediciones de alta precisión en condiciones adversas. Su continua optimización y la integración con algoritmos avanzados de procesamiento de señales, como los ARP, amplían aún más su potencial para aplicaciones industriales, ambientales y biomédicas.

2.1.2. Algoritmos de reconocimiento de patrones (ARP)

Los ARP son herramientas utilizadas para extraer información relevante a partir de datos complejos. En los últimos años, han tomado relevancia en aplicaciones que emplean señales provenientes de SIFO, donde el objetivo es lograr una clasificación automática de eventos físicos relacionados con parámetros de medición, particularmente en configuraciones donde las señales adquieren mayor complejidad, como los sistemas multipunto o multiparamétricos.

Entre las técnicas clásicas de reconocimiento de patrones para resolver tareas se encuentran las máquinas de soporte vectorial (SVM por sus siglas en inglés) y las redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés), mientras que

los enfoques más recientes se apoyan en el aprendizaje profundo, como lo son las redes neuronales convolucionales (CNN por sus siglas en inglés) Pin Wang (2021); Zhang et al. (2020). Estas herramientas permiten realizar tareas complejas de clasificación y han demostrado ser eficaces.

Las SVM son algoritmos utilizados en tareas de clasificación supervisada. En este tipo de algoritmos se trabaja con conjuntos de datos cuyas muestras están etiquetadas según una categoría o clase. Estas clases representan grupos de datos con características similares como, por ejemplo, un valor de temperatura en un evento físico. El objetivo de este algoritmo es separar de manera eficiente los diferentes grupos o categorías dentro de un conjunto de datos. Esta separación se realiza tratando de maximizar la distancia entre los datos de cada clase y de esta manera, poder clasificar las distintas clases.

Entre las ventajas de utilizar las SVM está su capacidad para adaptarse a distintos tipos de problemas. Estos algoritmos funcionan muy bien cuando los datos pueden catalogarse fácilmente, pero también pueden resolver problemas más complejos mediante transformaciones matemáticas, las cuales son capaces de ver patrones incluso cuando los datos no son distinguibles a simple vista. Por esto, las SVM se han convertido en una herramienta aplicable a diversas áreas donde se requiere reconocer patrones, como la clasificación de imágenes, textos o señales.

Por otro lado, el funcionamiento de las redes neuronales artificiales (ANN) está inspirado en el cerebro humano y se compone de unidades llamadas neuronas artificiales, organizadas en capas. Cada una de estas neuronas recibe información, la procesa y transmite el resultado a otras neuronas. Formando así redes neuronales que relacionan información compleja entre datos, lo que las hace muy útiles para tareas como la clasificación o el reconocimiento de patrones.

Una de las ventajas de las ANN es su capacidad de generalización: usando ejemplos conocidos, pueden identificar patrones en datos nuevos. Aunque requieren ajustes en sus parámetros y pueden llegar a demandar mucho tiempo de entrenamiento, su adaptabilidad la convierte en una herramienta viable y muy utilizada en el aprendizaje automático Zhang et al. (2020).

Por su parte, las redes neuronales convolucionales (CNN) son una variante especializada de las ANN, que son mayormente utilizadas en el procesamiento y

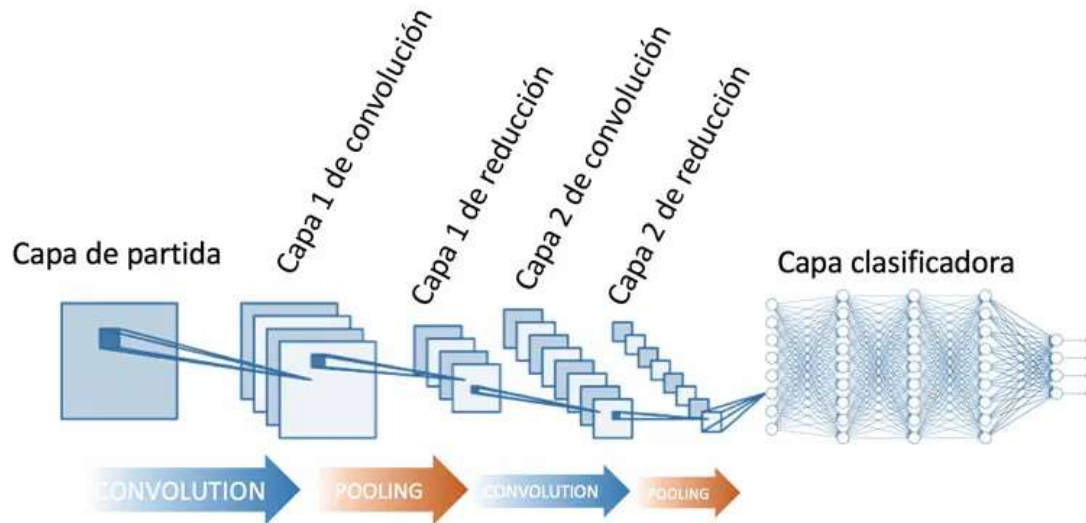


Figura 2.2: Ejemplo de la estructura básica de una CNN

análisis de imágenes. A diferencia de las redes tradicionales, las CNN trabajan con el objetivo de reconocer patrones espaciales mediante filtros que recorren la imagen, reconociendo así características específicas como bordes, formas o texturas. Esta arquitectura reduce la cantidad de parámetros requeridos, lo cual es importante en tareas de reconocimiento visual.

Las CNN se caracterizan por tomar de manera automática características relevantes a diferentes niveles -estas características son tomadas a través de múltiples operaciones tal como lo muestra la Fig.2.2- y por esto se han consolidado como una de las principales herramientas en aplicaciones de clasificación de imágenes, visión por computadora y reconocimiento de objetos. La red comienza con capas de convolución, que extraen características locales de la imagen mediante filtros. Estas capas suelen ir seguidas de capas de pooling, que reducen la dimensionalidad conservando la información más relevante. A medida que se avanza en profundidad, se extraen características de mayor nivel, hasta llegar a las capas completamente conectadas, encargadas de realizar la clasificación final. Además, tienen una alta precisión cuando se utilizan en conjuntos de datos grandes y complejos, como en imágenes médicas, satelitales o de sensores avanzados Gui et al. (2024).

En investigaciones recientes, se han comparado los algoritmos clásicos con modelos de aprendizaje profundo con el objetivo de seleccionar el enfoque más adecuado según la complejidad de la tarea a resolver, el tipo de datos, el tamaño del conjunto de entrenamiento y los requerimientos de precisión y tiempo de procesamiento Adane Nega Tarekegna (2021); Pin Wang (2021). Estos algoritmos han sido diseñados y optimizados para enfrentar tareas altamente complejas como la clasificación de imágenes médicas o reconocimiento facial, donde se requiere extraer cientos o miles de características para tener un buen desempeño Gui et al. (2024). Debido a esto, su aplicación en tareas con menor información requerida para la clasificación, como el análisis de señales ópticas en sensores interferométricos, resulta innecesaria, ya que estos modelos poseen capacidades que exceden los requerimientos de tareas con menor complejidad estructural, como el abordado en este trabajo de tesis.

La elección del algoritmo de reconocimiento de patrones más adecuado depende del problema que se busca resolver y de la naturaleza de los datos. La aplicación de algoritmos clásicos y profundos construye sistemas de clasificación complejos para abordar desafíos en entornos de alta complejidad Adane Nega Tarekegna (2021); Pin Wang (2021); Zhang et al. (2020). Esto convierte a estos algoritmos en herramientas demasiado complejas para aplicaciones en el monitoreo de eventos físicos mediante SIFO, donde las señales presentan patrones menos variados en comparación con los entornos ya antes mencionados .

2.2. Implementación de SIFO

El uso SIFO se ha extendido en diferentes escenarios de monitoreo físico, como aplicaciones industriales, ambientales, médicas, debido a su sensibilidad, inmunidad electromagnética y tamaño compacto. La implementación de estos sensores puede adaptarse a distintos escenarios según el tipo de medición requerida, ya sea en configuraciones puntuales, multipunto o multiparamétricas Lee et al. (2012).

Cada una de estas configuraciones presenta retos específicos para el procesamiento de señales. Los sensores puntuales permiten la detección de un único parámetro físico en un solo punto de medición, y su análisis suele requerir métodos menos complejos. En cambio, los sensores multipunto, que monitorean varios

puntos simultáneamente, generan señales más densas y patrones superpuestos, lo que aumenta la dificultad en su interpretación. Finalmente, los sensores multiparamétricos están diseñados para detectar múltiples parámetros en un mismo sistema, lo cual incrementa significativamente la complejidad del procesamiento, ya que requiere separar y analizar efectos superpuestos sobre una misma señal.

Ante este panorama, surge la necesidad de desarrollar ARP que permitan identificar con precisión los valores medidos sin la necesidad de tener grandes cantidades de datos para su correcto funcionamiento, incluso bajo condiciones de sensores con mayor complejidad técnica como en configuraciones multipunto. Este trabajo se enmarca en dicha necesidad, proponiendo un enfoque que mejora la precisión del reconocimiento en señales interferométricas.

2.2.1. Sensores puntuales

Los sensores interferométricos de fibra óptica puntuales (o simplemente sensores puntuales) están diseñados para realizar la medición de algún parámetro, como lo puede ser temperatura, presión, deformación o índice de refracción en una única posición específica a lo largo de la fibra óptica. A diferencia de los sensores distribuidos o multipunto, los sensores puntuales están dedicados a monitorear un solo punto, lo cual permite una mayor precisión y sensibilidad Tao Zhu and Duan (2012).

Debido a su gran capacidad en cuanto a sensibilidad a pequeños cambios, se han reportado diferentes esfuerzos, entre los que se encuentran los interferómetros de Fabry-Pérot, Mach-Zehnder (MZI), Michelson (MI) y Sagnac. De estos, los F-P son particularmente atractivos por su simplicidad de diseño, sensibilidad y tamaño compacto. Los F-P pueden clasificarse en intrínsecos (donde la cavidad interferométrica se encuentra dentro de la fibra y la luz viaja dentro del núcleo) y extrínsecos (donde la cavidad se sitúa fuera de ella, por ejemplo, utilizando aire o polímeros; por lo tanto, la luz viaja fuera del núcleo de la fibra) Grattan and Meggitt (1995); Islam et al. (2014). Cada configuración tiene ventajas y desventajas en cuanto a sensibilidad, facilidad de fabricación, robustez, etc.

Los sensores puntuales interferométricos representan una tecnología viable y adaptable, capaz de integrarse en sistemas de diversas áreas. Su desarrollo ha

sentado las bases para soluciones más avanzadas en sistemas multipunto, convirtiéndolos en un elemento clave dentro del área de sensores de fibra óptica. Islam et al. (2014); Tao Zhu and Duan (2012); Zhaobing Tian (2009).

2.2.2. Sistemas multipunto

Los sistemas de sensores multipunto son aquellos que cuentan con múltiples elementos sensores de detección en ubicaciones físicas distintas, conectados a través de fibras ópticas individuales. Estos sistemas permiten diseñar configuraciones en las que cada sensor opera de forma independiente, facilitando su reemplazo y adaptación a distintos tipos de medición en diferentes puntos del sistema.

Este tipo de configuración es útil cuando se requiere realizar mediciones simultáneas en distintas regiones de un sistema, como en estructuras complejas, procesos industriales, o aplicaciones biomédicas. Por ejemplo, en el trabajo Nikolai A. Ushakov (2020) los sistemas multipunto basados en interferómetros F-P permiten registrar la onda de pulso en distintas partes del cuerpo humano para estimar parámetros como la velocidad de propagación de la onda. Este tipo de medición puede implementarse usando dos sensores F-P independientes conectados a diferentes fibras, lo que garantiza una mayor flexibilidad en su colocación.

Asimismo, en aplicaciones de tipo químico o biológico, se han desarrollado configuraciones multipunto en las que sensores F-P son colocados en distintas fibras para realizar detecciones simultáneas en diferentes puntos. En estas configuraciones, cada sensor tiene una cavidad interferométrica accesible desde el exterior, lo que permite que distintos fluidos o compuestos interactúen directamente con la cavidad. Gracias al uso de técnicas como el recubrimiento con biomoléculas específicas, cada sensor puede ser implementado para una función concreta, evitando el acoplamiento cruzado entre señales y asegurando un análisis selectivo en paralelo Xie et al. (2019). Esto se debe a que uno de los retos de trabajar con sensores multipunto es el posible cruce entre señales, por lo que se requieren técnicas diferentes para facilitar la demodulación de las señales.

Los sistemas multipunto con base en fibras ópticas individuales permiten monitorear varias ubicaciones de forma simultánea, manteniendo la independencia

operativa de cada sensor. Esta arquitectura ofrece un mayor control sobre los puntos de medición y facilita la integración de diferentes tipos de sensores en un mismo sistema. Sin embargo, el procesamiento de las señales resultantes puede volverse más complejo, ya que la superposición de respuestas o el comportamiento independiente de cada cavidad puede dificultar la interpretación directa de los datos adquiridos.

2.2.3. Sensores multiparámetros

Los sensores multiparamétricos de fibra óptica son sensores que miden simultáneamente más de una magnitud física (como temperatura, deformación o índice de refracción) en un punto específico. Esta característica es relevante en aplicaciones complejas, como monitoreo industrial, médico o ambiental, donde diferentes variables interactúan al mismo tiempo y se requiere el monitoreo de estas variables al mismo tiempo Liu et al. (2021a).

A diferencia de los sistemas multiplexados (que distribuyen sensores independientes a lo largo de la fibra), los sensores multiparamétricos constan de un único dispositivo, midiendo desde una única región del sensor, lo que mejora la resolución y la exactitud al evitar gradientes de temperatura u otras variaciones espaciales que podrían introducir errores Simon Pevec (2019).

Entre las configuraciones más comunes se encuentran los interferómetros FP, los cuales pueden apilarse con diferentes configuraciones de cavidad; comúnmente pueden utilizarse en cascada, donde cada cavidad puede registrar un parámetro diferente en la medición. Estos sistemas pueden ser interrogados eficientemente mediante técnicas como el análisis matricial, que relaciona cambios espectrales con las variables físicas mediante coeficientes de sensibilidad específicos Simon Pevec (2019). Además, se pueden aplicar métodos que utilizan la transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) para extraer componentes armónicas individuales de la señal y lograr seguimiento de fases Simon Pevec (2019).

El monitoreo mediante sensores multiparamétricos puede beneficiarse del uso de redes neuronales artificiales, ya que estas permiten establecer una relación directa entre las respuestas espectrales del sensor y los valores de los parámetros físicos medidos. Esto es especialmente útil en escenarios donde no se identifican

características espectrales dominantes o no es posible construir un modelo matemático que describa con precisión la respuesta del sistema Perez-Herrera et al. (2021). Las redes neuronales artificiales ofrecen una alternativa flexible y eficaz para interpretar señales complejas, provenientes de múltiples parámetros medidos al mismo tiempo.

Los sensores multiparamétricos representan un progreso importante en sistemas interferométricos, al integrar la capacidad de medir diversas magnitudes físicas simultáneamente en un único punto, lo cual amplía las aplicaciones posibles de estos sistemas. Lo anterior es posible gracias a su diseño físico especializado y al uso de técnicas modernas de interrogación y procesamiento de datos, entre ellas los algoritmos de inteligencia artificial Liu et al. (2021a); Perez-Herrera et al. (2021); Simon Pevec (2019).

2.3. Implementación de algoritmos de reconocimiento de patrones en SIFO

En los últimos años, los ARP han sido utilizados en el procesamiento de señales provenientes de SIFO, ya que permiten automatizar la clasificación de eventos físicos a partir de señales complejas. Estos algoritmos, provenientes del aprendizaje automático y del aprendizaje profundo, son capaces de identificar patrones recurrentes en los datos y clasificarlos de manera eficiente. En la Fig.2.3 se pueden observar algunos de los algoritmos antes mencionados como SV, ANN y CNN.

La implementación de estos algoritmos varía dependiendo de la configuración del sistema sensor de detección. En sensores puntuales, donde se mide un único parámetro físico en una ubicación específica, los algoritmos pueden entrenarse con conjuntos de datos relativamente simples y enfocados. En cambio, en sistemas multipunto, que integran múltiples sensores colocados en diferentes puntos de medición, el reto se encuentra en sincronizar las mediciones y clasificar la señal de cada uno de los puntos de medición. Finalmente, los sistemas multiparamétricos resultan en añadir complejidad a las señales, ya que se deben identificar múltiples parámetros físicos de forma simultánea a partir de una sola señal interferométrica.

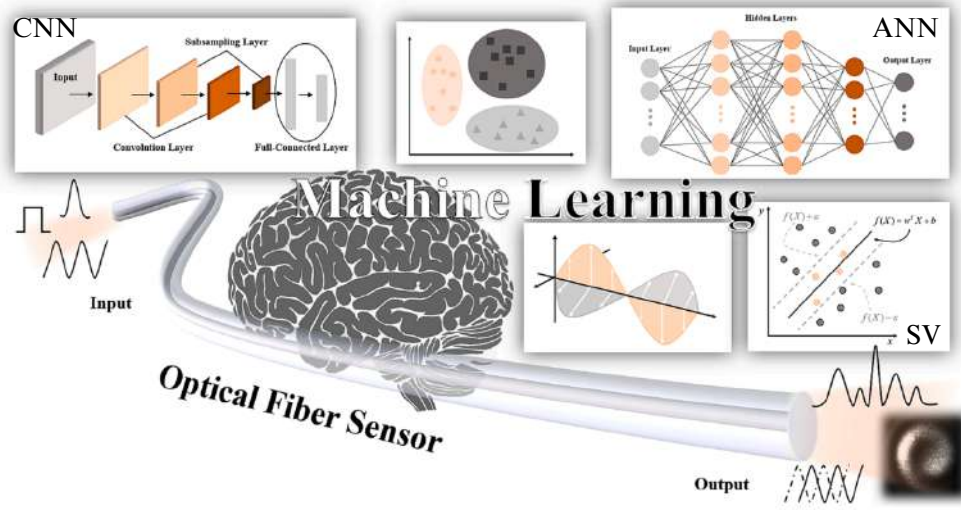


Figura 2.3: Integración de sensores de fibra óptica con algoritmos de reconocimiento de patrones. *Imagen tomada de Guzman-Chavez et al. (2022).*

En esta sección se describe cómo se han implementado técnicas de reconocimiento de patrones en cada una de estas configuraciones descritas en la sección 2.2.1, 2.2.2 y 2.2.3, exponiendo los retos que presentan estas señales y los algoritmos que han demostrado ser eficaces según el tipo de señal y la complejidad del sistema de medición.

2.3.1. Sensores puntuales e inteligencia artificial

La integración de ARP ha optimizado la forma en que se procesan e interpretan las señales obtenidas por SIFO. Un ejemplo de esta integración se encuentra en el trabajo Wang et al. (2025) en donde desarrollan un sensor interferométrico de humedad, desarrollado mediante una fibra óptica de núcleo hueco desplazado (LD-HCF por sus siglas en inglés) recubierta con un microfilamento de un material compuesto formado por alcohol polivinílico dopado con puntos cuánticos de carbono, el cual fue implementado en una mascarilla para monitoreo respiratorio en tiempo real. Para este sistema se emplea una red neuronal híbrida del tipo CNN optimizada, logrando una precisión de clasificación del 97.62 % en patrones respiratorios como apnea, tos o caminata. Este trabajo demuestra la efectividad

del reconocimiento de patrones combinado con un sensor interferométrico puntual para el diagnóstico temprano de enfermedades respiratorias.

Por otro lado, los algoritmos de aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés) han demostrado ser herramientas útiles para complementar o simplificar los procesos de demodulación en sensores interferométricos puntuales. En configuraciones como la de Fabry–Pérot, donde la señal presenta una ambigüedad intrínseca de 2π , existen métodos ópticos como el uso de múltiples longitudes de onda o cavidades que permiten realizar seguimiento de fase y extender el rango dinámico de medición. Sin embargo, el uso de ANNs ofrece una alternativa basada en datos para mapear directamente la fase o el parámetro físico deseado a partir de la señal interferométrica, incluso en configuraciones con espectros complejos o con limitaciones en el sistema óptico. En ciertos estudios, este enfoque ha permitido alcanzar precisiones de $0,17^\circ\text{C}$ en sensores de temperatura Guzman-Chavez et al. (2022), aunque este valor puede variar según la aplicación específica. Además, las ANNs pueden implementarse sin requerir componentes ópticos adicionales, lo que contribuye a simplificar el diseño y reducir costos.

El de ML también permite mejorar la eficiencia en la extracción de características a partir de señales generadas por sensores puntuales. A diferencia de los métodos tradicionales de demodulación, tanto dinámicos como estáticos (los cuales requieren hardware especializado o seguimiento explícito de picos e intensidad para estimar variaciones físicas), los modelos de ML pueden aprender directamente patrones no lineales en la señal, incluso cuando esta se presenta únicamente como una señal de intensidad. Aunque clásicamente no es posible demodular completamente el comportamiento interferométrico con intensidad sola, los algoritmos ML son capaces de identificar características específicas de la señal que están correlacionadas con variables físicas como temperatura, esfuerzo mecánico o índice de refracción, logrando así una estimación precisa sin necesidad de reconstruir la fase de forma explícita Zhou et al. (2024).

Los sensores ópticos de fibra puntuales se han beneficiado significativamente del uso de ARP cuando presentan señales de mayor complejidad donde no se puede hacer el uso de las técnicas clásicas antes mencionadas para la correcta clasificación de las señales. Desde aplicaciones biomédicas en tiempo real hasta la mejora en la resolución de parámetros físicos en condiciones complejas, los

enfoques con base en IA y ML han demostrado aportar beneficios concretos en sensores ópticos. Estas técnicas permiten abordar limitaciones inherentes a los métodos tradicionales, como la necesidad de sistemas ópticos complejos para la demodulación o la dificultad para extraer características cuando hay ruido, desalineaciones o variabilidad entre sensores. Por ejemplo, en sensores interferométricos, los modelos de IA pueden aprender relaciones no triviales en señales espectrales o de intensidad que están asociadas a variables físicas, permitiendo estimaciones precisas incluso sin reconstruir la fase. Además, su implementación puede reducir la dependencia de hardware especializado, simplificando el diseño del sistema sin comprometer la precisión Guzman-Chavez et al. (2022); Wang et al. (2025); Zhou et al. (2024).

2.3.2. Sensores multipunto e inteligencia artificial

Los sistemas de sensores multipunto, como ya se mencionó representan ventajas en el ámbito de sensores de fibra debido a su capacidad de monitorear varios puntos de medición al mismo tiempo. Sin embargo, esta capacidad también introduce nuevos retos, especialmente en la etapa de demodulación e interpretación de las señales, debido a la superposición de las señales y la complejidad del análisis de los datos adquiridos.

En este contexto, los algoritmos de inteligencia artificial son herramientas importantes para resolver estos desafíos. Por ejemplo, se ha demostrado que las redes neuronales pueden superar a métodos tradicionales como la transformada rápida de Fourier (FFT) en la demodulación de señales superpuestas provenientes de sensores FP extrínsecos multiplexados. A través del entrenamiento con un conjunto reducido de espectros bajo condiciones específicas, una red neuronal fue capaz de predecir el estado de deformación en cada sensor individual, manteniendo un bajo nivel de diafonía incluso en presencia de ruido Wu et al. (2021). De esta manera se demuestra cómo los algoritmos de IA pueden procesar señales complejas.

Asimismo, el uso combinado de técnicas de multiplexación de sensores y aprendizaje profundo ha demostrado mejoras significativas en la sensibilidad de sensores de interferencia multimodal. En un estudio reciente, se empleó una red neuronal

convolucional para analizar el espectro completo proveniente de un sensor con fibra de múltiples núcleos, evitando el seguimiento manual de picos específicos. Gracias a esta estrategia, fue posible lograr resoluciones de temperatura y de índice de refracción hasta diez veces superiores a las alcanzadas mediante métodos tradicionales Zhang et al. (2025). Demostrando el potencial de las técnicas de reconocimiento de patrones para extraer características útiles para la correcta clasificación de las señales en este tipo de sistemas.

Aunque estas estrategias han demostrado ser eficaces, también presentan desafíos importantes relacionados con la carga computacional y el volumen de datos necesario para el entrenamiento de los modelos.

2.3.3. Sensores multiparamétricos e inteligencia artificial

Los sensores multiparamétricos de fibra óptica tienen como objetivo la medición simultánea de dos o más variables físicas (como temperatura, deformación, presión o índice de refracción) mediante un solo sensor. Esta capacidad resulta de gran utilidad en aplicaciones donde los parámetros están acoplados. Sin embargo, esta ventaja implica una complejidad adicional en la interpretación de las señales resultantes, ya que suelen presentarse problemas de sensibilidad cruzada y respuestas espectrales no lineales.

En relación a los sensores multiparamétricos se han propuesto configuraciones de sensores que combinan diferentes mecanismos de interferometría, como los interferómetros Fabry-Pérot y las rejillas de Bragg. Aunque ambos elementos responden a variaciones en el índice de refracción efectivo inducidas por efectos termoópticos y elastoópticos, su principio de funcionamiento y su diseño geométrico permiten que sus respuestas espectrales sean distintas. En particular, las FBG se caracterizan por un desplazamiento de su pico de reflexión central, mientras que los FP presentan un patrón interferométrico que puede modificarse en frecuencia, fase e intensidad. Esta diferencia permite identificar las contribuciones individuales de temperatura y deformación cuando se utilizan en estructuras en cascada (FBG-FP) Koustav Dey (2023); Xu et al. (2023). En este sentido, los ARP resultan de utilidad, ya que permiten interpretar estas señales y separar las respuestas superpuestas, incluso en presencia de efectos no lineales.

De esta forma, los ARP han cobrado relevancia en el campo de los SIFO. Modelos como las redes neuronales artificiales (ANN), redes profundas (DNN) o métodos híbridos con redes generativas adversariales (GAN) han demostrado ser herramientas eficaces para resolver las relaciones complejas entre la señal de salida del sensor y los parámetros físicos que la generan Koustav Dey (2023); Xu et al. (2023). Estos modelos pueden reconocer de manera precisa las variaciones en parámetros como temperatura o deformación a partir de características específicas de la señal, incluso en escenarios donde las respuestas son no lineales o presentan espectros superpuestos, sin necesidad de modelados complejos o linealizaciones previas.

Más allá de la tradicional extracción de picos espectrales, enfoques recientes han propuesto aprovechar toda la señal espectral generada por sensores interferométricos, incluso cuando no hay mínimos o máximos fácilmente identificables. Por ejemplo, se ha demostrado que dispositivos —como fibras con cavidades heteroestructuradas tipo fibra monomodal estándar, fibra óptica de núcleo hueco, fibra monomodal estándar (SMF-HCF-SMF) —pueden ser implementados para realizar mediciones complejas, como la detección de curvatura y dirección de flexión, utilizando aprendizaje automático sobre el espectro completo sin requerir modificaciones estructurales complejas en la fibra Chen Zhu (2022). Este cambio de enfoque, en el que el espectro se trata como una firma compleja que contiene toda la información relevante del entorno, ha permitido superar las limitaciones del método clásico de seguimiento de picos, el cual descarta gran parte del contenido informativo del espectro total.

De esta forma, se ha demostrado que modelos de ML no solo mejoran la precisión y robustez, sino que también permiten identificar múltiples variables simultáneamente y, además, disminuyen los requisitos técnicos del sistema de interrogación óptica, lo cual representa una ventaja significativa para su implementación en entornos reales. Así, los sensores multiparamétricos, en conjunto con ARP, representan una solución avanzada y versátil para tareas de monitoreo complejo en sistemas interferométricos de fibra óptica.

2.4. Conclusión del capítulo

Los sensores interferométricos de fibra óptica representan una tecnología eficiente para el monitoreo de diversos parámetros físicos, gracias a sus múltiples ventajas como alta sensibilidad, inmunidad a interferencias electromagnéticas, bajo tamaño, etc. Estas cualidades son relevantes para aplicaciones tanto industriales como biomédicas.

Sin embargo, conforme se incrementa la complejidad de los sistemas de medición —ya sea por la implementación de configuraciones multipunto, mediciones multiparamétricas o por la aparición de respuestas no lineales en los sensores—, se vuelve relevante el uso de algoritmos de reconocimiento de patrones que permitan interpretar adecuadamente las señales adquiridas. Estos algoritmos, provenientes del aprendizaje automático y profundo, han demostrado su efectividad en tareas complejas como la clasificación de imágenes o el reconocimiento facial, y por ello también han sido utilizados con éxito en sistemas SIFO. No obstante, es importante considerar que estas técnicas fueron diseñadas para tareas que requieren grandes volúmenes de datos para su entrenamiento y presentan una alta carga computacional.

Dado lo anterior, en el caso de sistemas de detección ópticos se visualiza optimizar las configuraciones de SIFO mediante el desarrollo de un algoritmo más simple, basado en principios matemáticos, que sea capaz de resolver tareas de clasificación o detección en señales interferométricas sin depender de grandes cantidades de datos. Esto permitiría mantener la eficiencia en la interpretación de señales, reduciendo al mismo tiempo la dependencia de recursos computacionales y facilitando su implementación práctica.

3

Técnica para la ampliación del rango de medición de sensores Fabry-Pérot y el desarrollo de un algoritmo de reconocimiento de patrones

Este capítulo describe el procedimiento seguido para abordar dos objetivos fundamentales del presente trabajo: la ampliación del rango de medición de SIFO tipo Fabry-Pérot y el desarrollo de un algoritmo de reconocimiento de patrones (ARP) diseñado para procesar señales provenientes de este tipo de sensores. La metodología propuesta se divide en tres ejes principales. El primero corresponde al desarrollo de la técnica de ampliación de rango de medición, que contempla el modelo y la simulación del sistema, así como el diseño y la construcción de cavidades tipo Fabry-Pérot con longitudes específicas que permiten generar señales con una envolvente, ampliando así el rango de medición sin necesidad de componentes adicionales. En el segundo eje se propone un algoritmo de reconocimiento de patrones con base en la vectorización de señales, el cual destaca por su robustez y simplicidad. Utiliza herramientas matemáticas elementales como el producto punto para calcular la similitud entre señales y reconocer patrones. A diferencia de los algoritmos tradicionales, el algoritmo propuesto no requiere de grandes

volúmenes de datos, lo que lo convierte en una alternativa para el uso en sistemas de fibra óptica. Finalmente, el tercer eje consiste en la integración del sensor y el algoritmo, mediante la implementación de pruebas experimentales y simuladas que validen el funcionamiento en conjunto del sistema.

3.1. Desarrollo de una técnica de SIFO con ampliación de rango de medición

En esta sección se realiza el desarrollo de una técnica para ampliar el rango de medición en sensores interferométricos Fabry-Pérot de fibra óptica, para ello se realiza el modelado matemático que fundamenta dicha técnica y posteriormente se valida con su simulación. El objetivo es ampliar el rango de medición mediante el diseño adecuado de las longitudes de dos cavidades tipo F-P que en conjunto conformarán un sensor de temperatura. Posteriormente, se lleva a cabo una simulación que implementa dicho modelado, permitiendo predecir la respuesta del sensor ante variaciones de temperatura. Así, la simulación permite validar la viabilidad de la técnica propuesta y guiar el diseño físico del sensor hacia una implementación práctica.

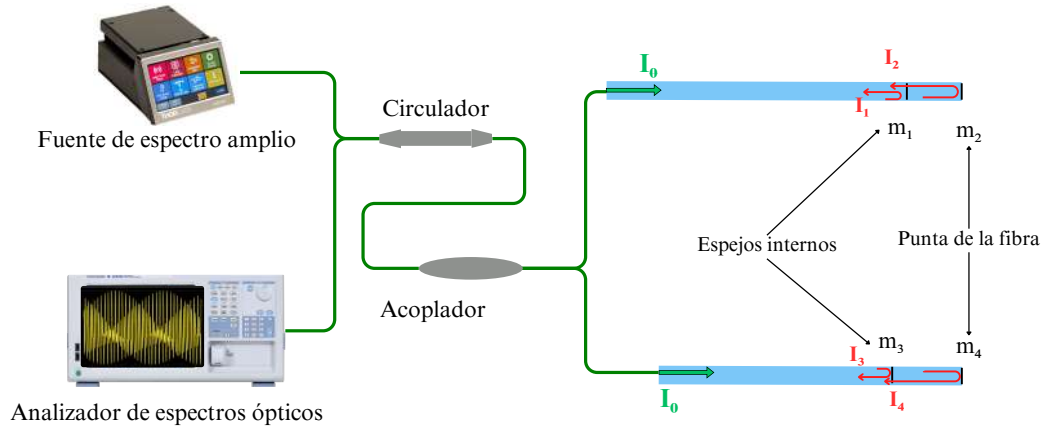


Figura 3.1: Arreglo experimental de dos cavidades F-P.

La configuración propuesta se basa en un par de interferómetros FP, cuyas cavidades están construidas con fibra monomodo estándar (SMF, por sus siglas en

inglés) y espejos de baja reflectividad. El sensor está compuesto por dos cavidades F-P, como se observa en la Fig. 3.1. : la primera cavidad, C_1 , está delimitada por los espejos m_1 y m_2 , mientras que la segunda cavidad, C_2 , se encuentra entre los espejos m_3 y m_4 . En esta estructura, los espejos m_1 y m_3 son espejos de fibra con una reflectividad cercana al 0.1 %, fabricados mediante el método de ataque químico descrito en Martínez-Manuel and Esquivel-Hernández (2021).

Por otro lado, los espejos m_2 y m_4 presentan una reflectividad aproximada del 3.5 %, atribuida a la reflexión de Fresnel en la punta clivada de la fibra. La luz de amplio espectro es dirigida hacia ambos interferómetros a través de un circulador de fibra óptica y un acoplador óptico que divide la luz en dos brazos con el 50 % de luz en cada uno de ellos (50/50), mientras que la señal del sensor se adquiere con un analizador de espectro óptico (OSA). Para evitar la interferencia entre las dos cavidades, se emplean diferentes longitudes de fibra SMF en los brazos entre el acoplador y cada cavidad, como se observa en la Fig.3.1.

3.1.1. Modelado y simulación del sensor

En esta sección se describe el modelo teórico que permite comprender la técnica propuesta para los sensores interferométricos F-P. En sistemas con este tipo de sensores se monitorea para posteriormente calcular los desplazamientos de fase generados por cambios en parámetros físicos, en este caso, de temperatura. El seguimiento de la señal se realiza mediante el monitoreo de máximos o mínimos de interferencia. Sin embargo, esta técnica enfrenta una limitación: debido a la naturaleza periódica de la señal interferométrica, en donde cada variación de 2π en la fase introduce una ambigüedad en la medición.

Esta ambigüedad está directamente relacionada con la diferencia de camino óptico (OPD) de la cavidad interferométrica, la cual depende de su longitud efectiva. A medida que se incrementa la longitud de la cavidad, el rango de medición utilizable se reduce. Es decir, una cavidad más larga permite mayor sensibilidad, pero restringe el rango de medición.

Para superar esta limitación, en este trabajo se propone una técnica con base en el diseño conjunto de dos cavidades FP de longitudes similares. Al combinarse, estas cavidades generan una señal interferométrica modulada que presenta una

envolvente característica, la cual permite extender el rango de medición efectivo. Si bien el uso de dos cavidades podría recordar a la técnica tipo Vernier, en nuestro caso ambas responden simultáneamente a la misma perturbación (por ejemplo, cambios de temperatura) y no se emplean con el objetivo de mejorar la sensibilidad, sino para ampliar el rango dinámico de medición. Esta estrategia requiere el diseño de una segunda cavidad, lo cual implica cierta complejidad adicional respecto a configuraciones de una sola cavidad; sin embargo, no exige modificar la estructura base del sensor ni incorporar componentes ópticos activos o referencias externas. A partir de este modelo, se realiza la simulación de las señales interferométricas considerando variaciones de temperatura y diferencias de longitud entre cavidades, lo cual permite anticipar el comportamiento del sensor y evaluar su desempeño teórico antes de la implementación física.

Así pues, el modelo propuesto parte de una configuración de un sistema compuesto por dos cavidades F-P fabricadas con SMF, utilizando espejos de baja reflectividad. A través de expresiones analíticas, se calcula la señal de interferencia resultante, considerando un desplazamiento de fase generado por cambios de temperatura. Además, se estudia cómo la interacción entre ambas cavidades genera la envolvente espectral que permite ampliar el rango de medición del sensor.

A partir de la Fig. 3.1, la intensidad reflejada en cada espejo de los dos interferómetros puede expresarse como:

$$I_1 = R_1 I_0, \quad (3.1)$$

$$I_2 = \beta_{c1}^2 T_{c1}^2 R_2 I_0 = \varepsilon_{c1} R_2 I_0, \quad (3.2)$$

$$I_3 = R_3 I_0, \quad (3.3)$$

$$I_4 = \beta_{c2}^2 T_{c2}^2 R_4 I_0 = \varepsilon_{c2} R_4 I_0. \quad (3.4)$$

donde I_0 representa la intensidad de luz que incide en ambas cavidades. Esta intensidad se considera igual para ambos interferómetros debido al acoplador 50/50. Los coeficientes R_1 , R_2 , R_3 y R_4 corresponden a la reflectividad de cada uno de los espejos de fibra (m_1 , m_2 , m_3 y m_4). Los factores β_{c1}^2 y β_{c2}^2 representan las pérdidas acumuladas en cada cavidad debidas las propiedades de acoplamiento de los espejos, mientras que T_{c1}^2 y T_{c2}^2 son las transmitancias de los espejos. Así,

los términos ε_{c1} y ε_{c2} agrupan estas pérdidas junto con el doble paso de la luz en cada cavidad. En este modelo se ignora la atenuación por propagación en la fibra, ya que las cavidades tienen una longitud menor a un centímetro, lo que permite suponer que dicha pérdida es despreciable. Esta simplificación permite condensar en ε_{c1} y ε_{c2} los parámetros constantes del sensor para facilitar la notación en las ecuaciones 3.2 y 3.4.

Suponiendo que no existen pérdidas adicionales por los conectores, el acoplador, el circulador o alguna curvatura adicional de la fibra, la señal interferométrica que llega al OSA se puede modelar como:

$$I_s = [R_1 + \varepsilon_{c1}R_2 + R_3 + \varepsilon_{c2}R_4] I_0 + 2\sqrt{\varepsilon_{c1}R_1R_2}I_0 \cos\left(\frac{4\pi n_{eff}L_{c1}}{\lambda} + \theta_1 + \Delta\theta_{T1}\right) + 2\sqrt{\varepsilon_{c2}R_3R_4}I_0 \cos\left(\frac{4\pi n_{eff}L_{c2}}{\lambda} + \theta_2 + \Delta\theta_{T2}\right), \quad (3.5)$$

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del modo fundamental de la fibra y λ es la longitud de onda de la fuente óptica. Las fases θ_1 y θ_2 representan las fases iniciales en cada una de las cavidades y dependen de su fabricación. Las variaciones de fase por efecto térmico, $\Delta\theta_{T1}$ y $\Delta\theta_{T2}$, dependen de la longitud de cada cavidad y de la diferencia de temperatura ΔT entre una condición inicial y la condición de medición, pudiéndose expresar como $\Delta\theta_T = 86,86 \cdot L_c \cdot \Delta T$ (ver Esquivel-Hernández et al. (2024)).

Cabe destacar que la fase se repite cada 2π , lo que limita el rango de temperatura medible antes de que se presente ambigüedad. Por ejemplo, a modo de prueba de concepto, si se consideran dos cavidades de longitudes muy diferentes como 3.1 mm y 6.3 mm, respectivamente, la ambigüedad térmica estará dada por la longitud de la cavidad más pequeña, 3.1 mm. Si utilizamos $\Delta\theta_T = 86,86 \cdot L_c \cdot \Delta T$ reemplazando $\Delta\theta_T$ por 2π , obtenemos un rango de medición de 23°C (ver Fig. 3.2).

Para ampliar significativamente el rango de medición, se propone una nueva técnica con base en el diseño específico de 2 cavidades. Al mantener una diferencia específica en la longitud de ambas cavidades, se genera un efecto de batimiento entre sus señales, lo que da lugar a una envolvente con un FSR mayor. Esta

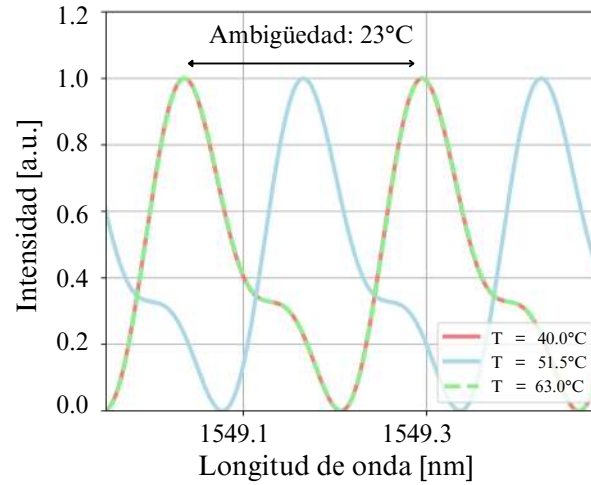


Figura 3.2: Espectro de la señal utilizando cavidades diferentes; 3.1mm y 6.3mm.

técnica, con base en el uso de una envolvente generada por la interferencia de dos cavidades, permite extender el rango de medición sin necesidad de incorporar componentes adicionales ni cambiar el principio de operación del sensor. En la Fig. 3.3 se ilustra esta técnica: manteniendo la cavidad corta en 3,1 mm y la cavidad larga a 3,38 mm, se observa que la ambigüedad ocurre a 260,°C, ampliando el rango de medición unas 11.07 veces (de 23°C a 260°C).

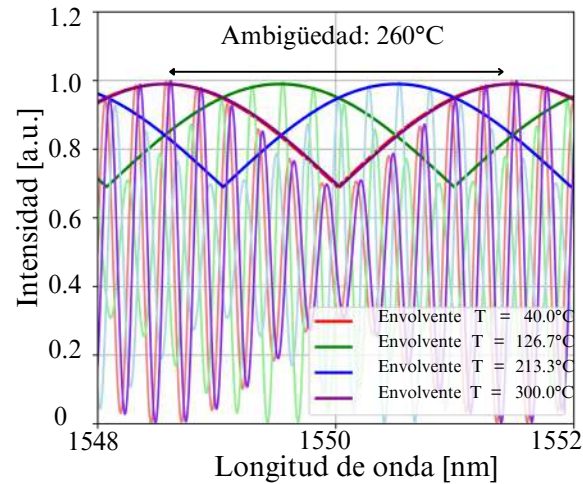


Figura 3.3: Espectro de la señal utilizando cavidades similares; 3.1mm y 3.38mm.

Para obtener una expresión que describa el batimiento de las cavidades y

con esto la envolvente que amplía el rango de medición, se debe partir de la ecuación 3.5, que representa la interferencia entre dos cavidades ópticas. En dicha ecuación, el primer término $[R_1 + \varepsilon_{c1}R_2 + R_3 + \varepsilon_{c2}R_4] I_0$ se mantiene sin cambios, ya que representa una contribución constante a la intensidad promedio de la señal. Por otro lado, los dos términos oscilatorios que contienen funciones coseno son los responsables de generar la modulación que caracteriza el batimiento que se puede ver en forma de una envolvente.

Comúnmente, para calcular esta envolvente se utiliza la la identidad trigonométrica 3.6

$$\cos a + \cos b = 2 \cos \left(\frac{a+b}{2} \right) \cos \left(\frac{a-b}{2} \right), \quad (3.6)$$

$$\cos a = 2 \cos \left(\frac{a+b}{2} \right) \cos \left(\frac{a-b}{2} \right) - \cos b, \quad (3.7)$$

Considerando señales con diferente amplitud, se utiliza la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} A \cos a + B \cos b = & A \left[2 \cos \left(\frac{a+b}{2} \right) \cos \left(\frac{a-b}{2} \right) - \cos b \right] \\ & + B \left[2 \cos \left(\frac{a+b}{2} \right) \cos \left(\frac{a-b}{2} \right) - \cos a \right], \end{aligned} \quad (3.8)$$

lo que permite reagrupar los términos como:

$$A \cos a + B \cos b = 2(A+B) \cos \left(\frac{a+b}{2} \right) \cos \left(\frac{a-b}{2} \right) - A \cos b - B \cos a. \quad (3.9)$$

De esta expresión, se retiene únicamente el coseno que contiene la diferencia entre las fases (es decir, $\cos((a-b)/2)$), ya que es esta diferencia la que determina el período de la envolvente.

Para simplificar aún más la expresión, se definen $\alpha = \varepsilon_1 R_1 R_2$ y $\gamma = \varepsilon_1 \varepsilon_2 R_2 R_3$ como productos de las amplitudes. Así, la ecuación de la envolvente se reduce a:

$$\begin{aligned} \text{Env} = & [R_1 + \varepsilon_{c1}R_2 + R_3 + \varepsilon_{c2}R_4] I_0 \\ & + 2I_0 \sqrt{\alpha + \gamma} \cos \left(\frac{4\pi n_{eff}}{\lambda} \Delta L + 86,86 \cdot \Delta T \cdot \Delta L + \Delta \theta \right), \end{aligned} \quad (3.10)$$

donde ΔL representa la diferencia entre las longitudes ópticas de las cavidades, y $\Delta\theta$ la diferencia entre las fases iniciales de cada cavidad. La ecuación anterior representa directamente la envolvente generada por la interferencia de dos señales con caminos ópticos distintos. De ella se puede observar que el período de dicha envolvente depende inversamente de la diferencia entre las longitudes ópticas de las cavidades: cuanto menor sea esta diferencia, mayor será el período resultante, lo que a su vez se traduce en un mayor rango de medición.

Esta envolvente tiene un período que se relaciona directamente con la frecuencia de batimiento, f_b , definida como la diferencia entre las frecuencias de las señales generadas por las cavidades C_1 y C_2 , es decir, $f_b = |f_1 - f_2|$. Considerando que estas frecuencias son inversamente proporcionales a los respectivos FSR de las cavidades (FSR_1 y FSR_2), se obtiene la siguiente expresión:

$$f_b = \left| \frac{1}{FSR_1} - \frac{1}{FSR_2} \right| = \frac{|FSR_2 - FSR_1|}{FSR_1 \cdot FSR_2}. \quad (3.11)$$

Dado que el FSR para una cavidad puede expresarse como $FSR = \lambda^2/(2nL)$, es posible derivar el rango espectral de la envolvente ($EFSR$ por sus siglas en inglés), el cual describe el nuevo período de batimiento generado por la interacción entre las cavidades:

$$EFSR = \frac{FSR_1 \cdot FSR_2}{|FSR_2 - FSR_1|} = \frac{\lambda^2}{2n\Delta L}, \quad (3.12)$$

donde $\Delta L = |L_1 - L_2|$ representa la diferencia de longitudes entre las cavidades. Este resultado demuestra que mientras menor sea la diferencia entre las longitudes, mayor será el $EFSR$. En este contexto, puede definirse un factor de amplificación (EF), como la relación entre el $EFSR$ y el FSR de la cavidad corta:

$$EF = \frac{\lambda^2/(2n\Delta L)}{\lambda^2/(2nL_1)} = \frac{L_1}{\Delta L}. \quad (3.13)$$

Es importante señalar que las ecuaciones 3.7 y 3.8 consideran que ambas cavidades están constituidas por el mismo material (es decir, comparten el mismo índice de refracción). En casos donde se utilicen materiales diferentes, se deben considerar índices distintos (n_1 y n_2), lo cual modifica las expresiones anteriores a $EFSR = \lambda^2/2(n_2L_2 - n_1L_1)$ y $EF = n_1L_1/(n_2L_2 - n_1L_1)$, respectivamente.

3.1.2. Fabricación y caracterización del sensor

Una vez desarrollado el modelo teórico y validado el diseño de los sensores mediante simulaciones, se procedió a la fabricación de las cavidades del sensor considerando la técnica de ampliación de rango de medición propuesta. Para la construcción de los sensores, se tomó en cuenta el factor de amplificación (EF), logrando incrementar el rango de medición del sensor en un factor aproximado de 15, únicamente mediante el diseño geométrico de las cavidades. Con ello, se fabricaron cavidades con longitudes específicas, diseñadas para las pruebas de concepto. Este enfoque destaca por permitir la extensión del rango de medición sin necesidad de modificar el material base del sensor ni recurrir a técnicas adicionales como el uso de rejillas de Bragg, simplificando así la implementación práctica de la solución.

A partir de las ecuaciones 3.12 y 3.13, se diseñó para la prueba de concepto un sensor compuesto por dos cavidades con longitudes de $L_1 = 3,1$ mm y $L_2 = 3,3$ mm, de manera que la diferencia entre ellas permite alcanzar una ampliación del rango de medición de aproximadamente 15 veces, conforme se establece en la ecuación 3.13. Este diseño permitió ampliar el rango de medición de temperatura desde 23 hasta 360,°C. La validación de este resultado se realizó mediante simulaciones, utilizando los parámetros $R_1 = R_3 = 0,001$, $R_2 = R_4 = 0,035$, $\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{c2} = 0,25$, un índice efectivo $n_{eff} = 1,456$ para una longitud de onda en 1550 nm y un barrido de longitud de onda entre 1540 nm y 1560 nm.

La fabricación de estas cavidades se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la referencia Martínez-Manuel and Esquivel-Hernández (2021). En este método de fabricación, se utiliza fibra monomodo estándar (SMF) previamente clivada con una cortadora de fibra óptica modelo CT-30 marca Fujikura. Esta punta de fibra es atacada con ácido fluorhídrico (HF) para carcomer el núcleo de la fibra. Después, se alinea y empalma una segunda fibra monomodo previamente cortada de forma transversal con la punta atacada previamente con ácido, generando una reflexión en el punto de contacto. Para realizar este empalme, se utilizó una empalmadora Fujikura modelo 70S, aplicando un total de 25 arcos de descarga para lograr un empalme estable. Después, se realiza un corte en el extremo libre de la segunda fibra; este corte será el segundo espejo debido al efecto

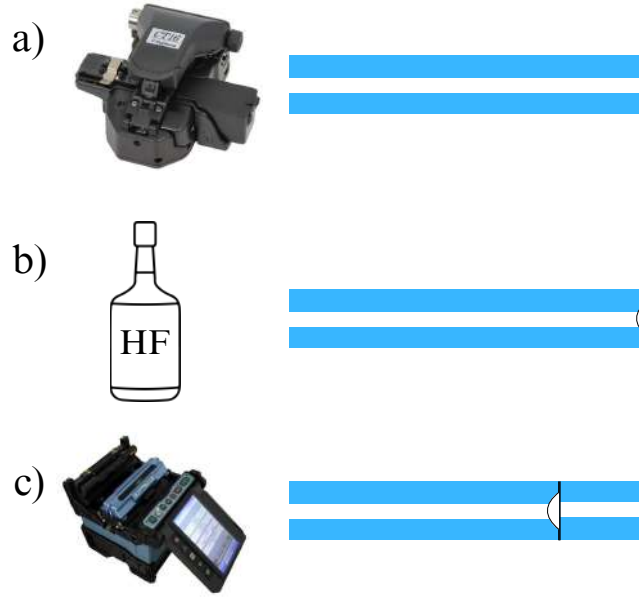


Figura 3.4: Procedimiento para fabricación de espejos. a) Corte transversal en la punta de la fibra. b) Ataque con ácido fluorhídrico. c) empalme con otra fibra previamente cortada.

de Fresnel de la luz que se refleja en la punta de la fibra. Con esto, se forman dos puntos reflectantes que funcionan como espejos, delimitando una cavidad en la fibra. Este procedimiento se puede observar en la Fig. 3.4.

Para la realización de la prueba de concepto, se fabricaron múltiples cavidades siguiendo el procedimiento descrito, ya que durante el proceso se enfrentaron retos como alcanzar las longitudes precisas requeridas o evitar la fractura de las cavidades debido al ataque químico previo. A través de la optimización y ajuste de la técnica de fabricación, se obtuvieron finalmente dos cavidades que cumplieron con las características deseadas, con longitudes de $L_1 = 3,1$ mm y $L_2 = 3,3$ mm, respectivamente. Estas se conectaron a un acoplador 50/50 para conformar el sensor, cuya caracterización experimental se detalla a continuación.

Para la caracterización de las cavidades, se realizó primero una medición de referencia antes de construir los espejos internos. Esta medición se comparó posteriormente con la cantidad de luz reflejada tras la fabricación de los espejos, lo que permitió estimar una reflectividad aproximada del 0.1% en cada uno de ellos. Con estos dos parámetros —la reflectividad interna y la longitud efectiva—

se obtuvo la caracterización completa de cada cavidad.

3.1.3. Versión compacta del sensor

Una vez validada la técnica de fabricación y con el objetivo de simplificar el arreglo experimental y facilitar su integración práctica, se optó por desarrollar una versión compacta del sensor. En esta configuración, se prescinde del uso de un acoplador 50/50, ya que ambas cavidades se encuentran contenidas en una sola fibra, como se muestra en la Fig. 3.5. Para modelar el comportamiento óptico de esta configuración también se emplea la ecuación 3.10, considerando la interferencia entre las dos cavidades alojadas en una única fibra. La fabricación de esta versión presentó ciertos desafíos, principalmente debido al debilitamiento estructural que sufre la fibra tras ser atacada con ácido, lo que complica la realización de un segundo corte limpio en el mismo segmento de fibra.

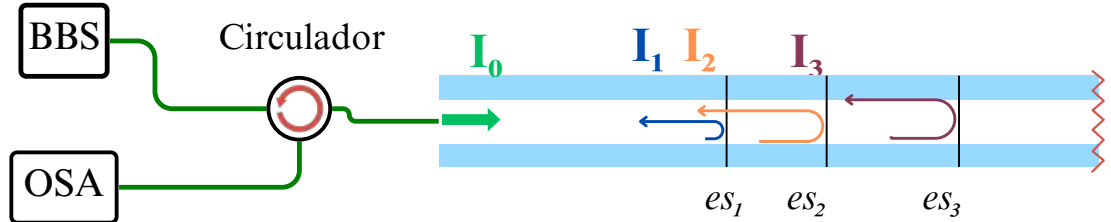


Figura 3.5: Arreglo experimental de la versión compacta del sensor.

Para superar esta dificultad, se construyeron primero las cavidades por separado. Posteriormente, una de las cavidades era nuevamente atacada con ácido para formar la microcavidad que serviría como espejo intermedio, y se procedía al empalme entre ambas fibras. Finalmente, dado que ambos espejos ya se encuentran formados mediante el ataque químico, no fue necesario cortar la punta de la fibra, evitando así cualquier reflexión indeseada en ese extremo. Como resultado de este procedimiento, los tres espejos que conforman las dos cavidades presentan una reflectividad aproximada del 0.1 %.

3.2. Estudio del algoritmo de reconocimiento de patrones

El análisis de señales provenientes de SIFO requiere técnicas que permitan identificar de manera precisa las condiciones físicas que generan dichas respuestas. En esta sección se analiza un algoritmo de reconocimiento de patrones (ARP) desarrollado para este propósito, el cual permite asociar señales adquiridas con valores físicos previamente conocidos, facilitando así la lectura e interpretación automática de la variable medida. El estudio incluye una descripción detallada del funcionamiento del algoritmo.

3.2.1. Descripción del ARP

En esta sección se presenta un algoritmo novedoso diseñado para el reconocimiento de patrones en señales provenientes de SIFO. A diferencia de métodos previos, este algoritmo destaca por su simplicidad y eficiencia, al estructurarse en dos etapas principales. En la primera, tanto las señales de referencia como las señales a analizar se transforman en vectores, considerando cada muestra de la señal registrada como un componente del vector correspondiente. Los vectores de referencia conforman una base de datos que representa todos los posibles valores del parámetro físico que se desea medir.

Posteriormente, se calcula el ángulo entre el vector de la señal de prueba y cada uno de los vectores de la base de datos, utilizando el producto punto. Este ángulo se traduce en una medida de similaridad: cuanto más pequeño es el ángulo, mayor es la similaridad entre las señales. Finalmente, se identifica el vector más parecido al de prueba, lo que permite determinar el patrón reconocido y, con ello, determinar el valor físico asociado al parámetro medido.

3.2.1.1. Vectorización de las señales

El algoritmo propuesto se basa en la comparación de señales interferométricas que están representadas como vectores en un espacio multidimensional, en el cual cada dimensión corresponde a una muestra de la señal. Para llevar a cabo esta vectorización, se sigue un procedimiento específico. Primero, se adquiere la señal

interferométrica muestreada de forma equiespaciada, es decir, con un intervalo de muestreo constante T .

Para preservar únicamente los valores de la señal en los puntos deseados de muestreo, se utiliza un tren de impulsos definido como:

$$\tau(\lambda) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\lambda - nT), \quad (3.14)$$

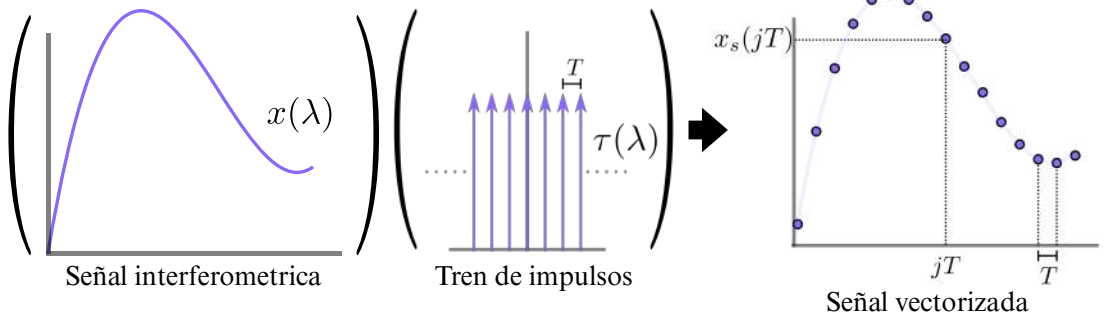


Figura 3.6: Vectorización de señales interferométricas

Posteriormente, se realiza el producto entre la señal interferométrica continua $x(\lambda)$ y el tren de impulsos, obteniendo así la señal muestreada $x_s(\lambda)$:

$$x_s(\lambda) = x(\lambda)\tau(\lambda) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)\delta(\lambda - nT). \quad (3.15)$$

Finalmente, las muestras extraídas se organizan como un vector $\vec{x} \in \mathbb{R}^m$, donde m representa el número de puntos muestreados. Este vector constituye la representación discreta de la señal interferométrica que se utilizará en las siguientes etapas del algoritmo. La Fig. 3.6 muestra gráficamente este proceso de vectorización.

3.2.1.2. Cálculo de similaridad

Una vez que las señales han sido convertidas en vectores, el siguiente paso en el algoritmo consiste en medir qué tan parecidos son estos vectores entre sí. Para ello, se emplea una métrica de comparación que permite evaluar la similaridad entre un vector de prueba y los vectores almacenados en la base de datos.

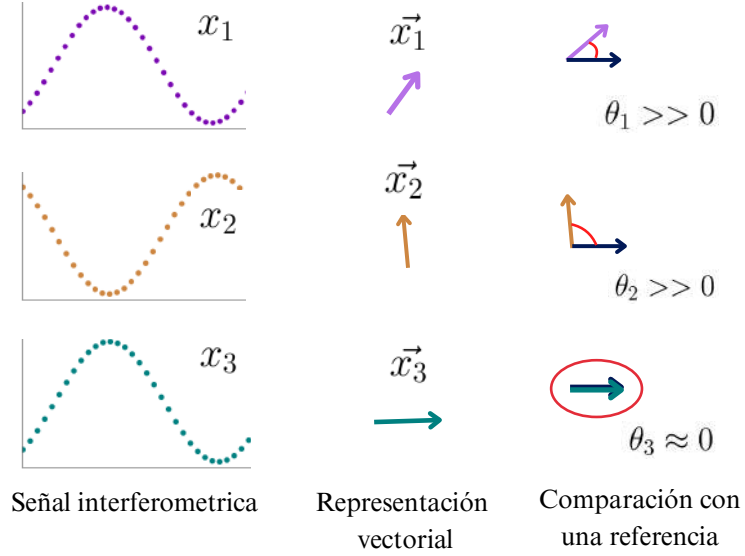


Figura 3.7: Comparación de señales interferométricas

Entre las distintas métricas disponibles, se eligió utilizar una basada en la similaridad angular, la cual se enfoca en comparar la dirección de los vectores en lugar de su magnitud. El ángulo entre los vectores —en este caso, el vector de la base de datos y el vector de prueba— se calcula mediante:

$$\theta = \arccos \left(\frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{\|\vec{u}\| \|\vec{v}\|} \right), \quad \vec{u}, \vec{v} \in \mathbb{R}^m. \quad (3.16)$$

En esta expresión, $\vec{u} \cdot \vec{v}$ indica el producto punto entre los vectores, y $\|\vec{u}\|$ y $\|\vec{v}\|$ son las magnitudes respectivas. A partir de este ángulo, se define la métrica de similaridad angular como:

$$s(\theta) = 1 - \frac{\theta}{\pi}, \quad (3.17)$$

donde un valor de $s(\theta)$ cercano a 1 indica que los vectores están muy alineados, es decir, que las señales tienen una alta similaridad.

Este enfoque resulta útil para identificar patrones, ya que permite distinguir con precisión pequeñas diferencias en la forma de las señales. En la Fig. 3.7 se puede observar un ejemplo donde varias señales convertidas en vectores, que se representan con flechas, se comparan contra una referencia (flecha negra), desta-

cando que aquellas con ángulos más pequeños entre sus vectores presentan una mayor similaridad.

3.2.1.3. Clasificación de la señal

Una vez obtenidas las representaciones vectoriales de las señales, el siguiente paso del algoritmo consiste en identificar el valor físico asociado a una señal de prueba. En el contexto de inteligencia artificial, la tarea de clasificación se basa en asignar a cada muestra una etiqueta de clase que describa su categoría o condición. En este caso particular, las clases no representan categorías discretas convencionales, sino los posibles valores del parámetro físico que se desea medir. Por ello, la base de datos se construye con señales de referencia previamente adquiridas, cada una vinculada a un valor específico del parámetro monitoreado.

En la segunda fase, se toma una señal de prueba y se transforma también en un vector. A continuación, este vector es comparado con todos los vectores de la base de datos mediante el cálculo de la similaridad angular. Cuanto menor sea el ángulo, mayor es la similaridad entre las señales.

Finalmente, se determina cuál de las señales de referencia es la más parecida a la señal de prueba, es decir, aquella cuyo vector presenta la menor separación angular. Este resultado permite identificar a qué clase pertenece la señal de entrada, facilitando así la tarea de reconocimiento de patrones.

El procedimiento completo se describe en el Algoritmo 1.

3.3. Procesamiento de señales con el ARP

La técnica de ARP se implementa en esta sección al análisis de señales provenientes de SIFO. El objetivo principal es validar su capacidad para identificar de manera precisa las condiciones físicas medidas por distintos tipos de sensores. Para ello, se presenta un estudio dividido en dos escenarios: sensores puntuales y sensores multipunto. En ambos casos, se evalúa el rendimiento del ARP al clasificar señales bajo condiciones experimentales reales, con distintas configuraciones y tecnologías de sensado.

Algoritmo 1: Reconocimiento de Patrones con Base en Vectores (V-PRA)

Input: Base de datos de señales: $DB = \{x_i(\lambda)\}_{i=1}^N$

1 Señal de prueba: $x_{Test}(\lambda)$

2 Conjunto de clases posibles: $C = c_1, c_2, \dots, c_{NC}$

Output: Clase predicha $y \in C$

3 Inicializar base vectorial: $\widehat{DB} \leftarrow \emptyset$

4 Inicializar conjunto de similitudes: $S \leftarrow \emptyset$

5 **foreach** $x \in DB$ **do**

6 Convertir señal a vector: $\vec{x} = \varphi(x)$

7 Agregar a DB vectorial: $\widehat{DB} \leftarrow \widehat{DB} \cup \vec{x}$

8 Convertir señal de prueba: $\vec{x}_{Test} = \varphi(x_{Test})$

9 **foreach** $\vec{x} \in \widehat{DB}$ **do**

10 Calcular ángulo: $\theta = \arccos \left(\frac{\vec{x}_{Test} \cdot \vec{x}}{\|\vec{x}_{Test}\| \|\vec{x}\|} \right)$

11 Calcular similaridad: $s(\theta) = 1 - (\theta/\pi)$

12 Agregar a conjunto de similitudes: $S \leftarrow S \cup s(\theta)$

13 Determinar índice de mayor similaridad: $\text{ind} = \underset{i}{\arg \max} \{s_i \in S\}$

14 Asignar clase correspondiente: $y = c_{\text{ind}}$

3.3.1. Sensores puntuales

Para evaluar el desempeño del ARP en sensores puntuales, se diseñaron y ejecutaron distintos experimentos en colaboración con varias instituciones. Estos experimentos abarcan distintas variables físicas: índice de refracción, temperatura, deformación (strain) y curvatura. Para cada una de ellas, se emplearon distintos sensores y configuraciones de fibra óptica, lo que permite comprobar la robustez del algoritmo frente a señales de naturaleza diversa.

En cada experimento, se construye una base de datos con señales de referencia que abarcan el rango de medición del parámetro correspondiente. Posteriormente, se emplean señales de prueba para evaluar la capacidad del ARP de identificar correctamente la condición física medida. Este enfoque permite validar el algoritmo no solo con un único tipo de sensor, sino también con una variedad de

tecnologías y diseños de fibra, fortaleciendo la evidencia de su aplicabilidad en contextos reales y heterogéneos.

3.3.2. Sensores multipunto

En el caso del sensado multipunto, se propone utilizar dos sensores tipo Fabry-Pérot, cada uno conformado por dos cavidades interferométricas. Este enfoque tiene como objetivo ampliar el rango de medición mediante el batimiento de las señales generadas por las cavidades de cada sensor, lo cual da lugar a una señal envolvente con un período más largo. Al seguir el comportamiento de esta envolvente, es posible extender el rango de medición sin modificar el material base del sensor. Sin embargo, al combinar señales provenientes de sensores con respuestas similares, la identificación de la señal correspondiente a cada sensor se vuelve difícil cuando se emplean métodos tradicionales como la transformada de Fourier.

El uso del ARP en este contexto busca resolver dicha esta problemática mediante el análisis vectorial de las señales. Gracias a su enfoque basado en similitud angular, el algoritmo permite distinguir entre señales que presentan una alta correlación espectral, facilitando la identificación correcta de cada sensor dentro del sistema multipunto. Esto abre la posibilidad de ampliar el rango de operación sin comprometer la fiabilidad del proceso de identificación.

3.4. Conclusión del capítulo

En este capítulo se presentó una técnica integral para ampliar el rango de medición en sensores interferométricos FP, junto con el desarrollo de un algoritmo de reconocimiento de patrones diseñado para la clasificación de señales provenientes de este tipo de sensores. Se abordó desde el modelado teórico y la simulación de la técnica de ampliación de rango, hasta la fabricación de sensores con cavidades diseñadas específicamente para este propósito.

Asimismo, se expuso detalladamente el funcionamiento del ARP, destacando su capacidad para transformar señales interferométricas en vectores y clasificarlas

mediante una medida de similaridad angular con una base de datos compuesta por los posibles valores del parámetro medido.

La combinación de una técnica para extender el rango de medición y un algoritmo de reconocimiento de patrones robusto constituye una propuesta prometedora en el campo de SIFO.

4

Experimentación y resultados

En este capítulo se presentan los experimentos realizados y los resultados obtenidos en relación con los tres ejes principales del proyecto. En primer lugar, se expone la validación experimental de la técnica propuesta para la ampliación del rango de medición en SIFO. En segundo lugar, se analiza el desempeño del algoritmo de reconocimiento de patrones, evaluado con señales provenientes de distintas configuraciones de sensores, incluyendo casos con múltiples parámetros de medición. Finalmente, se presentan los resultados de simulación en un sistema multipunto, en el que se integran tanto la técnica de ampliación como el algoritmo propuesto para la correcta identificación de sensores, junto con resultados experimentales obtenidos a partir de dos sensores fabricados.

4.1. Experimentos para la ampliación del rango

El montaje experimental utilizado para verificar el modelo propuesto y los resultados de la simulación se muestra en la Fig. 4.1.

Como fuente de luz se empleó una fuente de espectro amplio (BBS), la cual emite un espectro con un ancho aproximado de 40 nm centrado alrededor de los 1550 nm. La luz generada por la BBS se acopla a través de un circulador de fibra óptica y posteriormente se divide mediante un acoplador de fibra 50/50, antes de incidir en las dos cavidades que conforman el sensor de fibra. La luz reflejada por ambas cavidades es detectada mediante un analizador de espectro óptico (OSA), como se observa en la Fig.4.1.

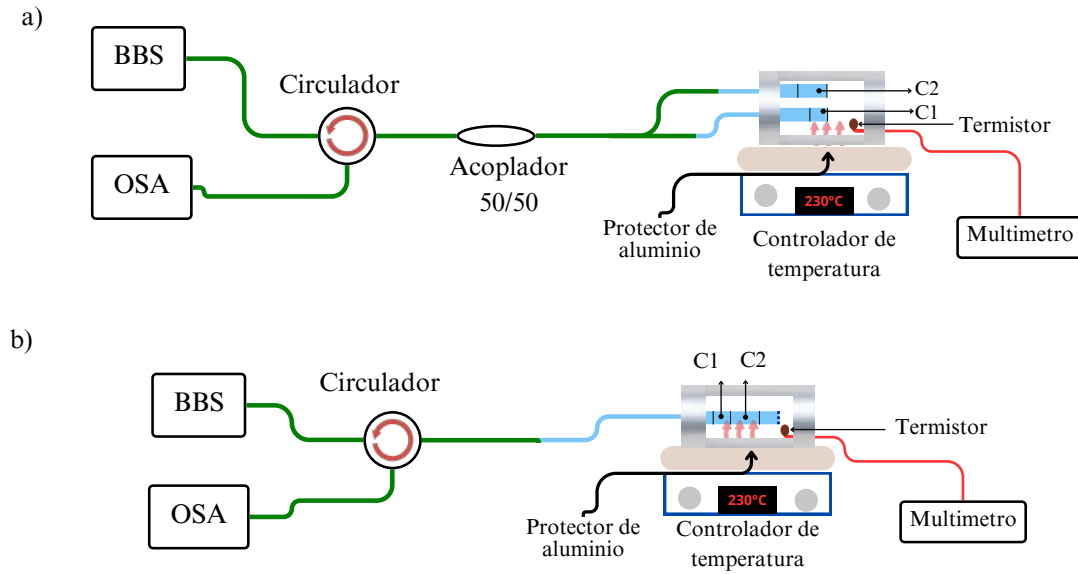


Figura 4.1: Arreglo experimental a) Sensor dividido en 2 brazos; b) Sensor compacto

Además, en la Fig.4.1 se presentan los arreglos experimentales implementados para los dos sensores construidos para la prueba de concepto: la Fig.4.1a muestra el montaje para la versión con dos brazos independientes, mientras que la Fig. 4.1b ilustra el arreglo experimental para la versión compacta del sensor. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para ambos casos.

4.1.1. Sensor dividido

Para el caso del sensor dividido en dos brazos independientes, se utilizó una plancha de temperatura para inducir los cambios de temperatura, como se muestra en la Fig. 4.1a. Con el fin de mantener la estabilidad térmica durante la prueba, ambas cavidades se cubrieron con una estructura de aluminio y se colocaron sobre la plancha de temperatura. Dentro de esta cubierta de aluminio, se ubicó un termistor cerca de las cavidades para obtener una medición de temperatura de referencia. Este termistor se conectó a un multímetro para monitorear su respuesta en tiempo real, tal como se aprecia en la Fig. 4.1a. Durante la experimentación, se aplicaron cambios de temperatura en un rango de 40 a 300 °C

en pasos de 30 °C.

Este rango de temperatura se eligió de acuerdo con la capacidad de la plancha de temperatura utilizada. En la prueba, primero se elevó la temperatura hasta alcanzar los 300 °C; posteriormente, se apagó la plancha y se tomaron las mediciones conforme el sistema se enfriaba, utilizando las lecturas del termistor conectado al multímetro. Al igual que en la simulación, las longitudes de las cavidades utilizadas fueron de 3.1 mm y 3.3 mm, por lo que se espera observar un factor de mejora de 15 veces.

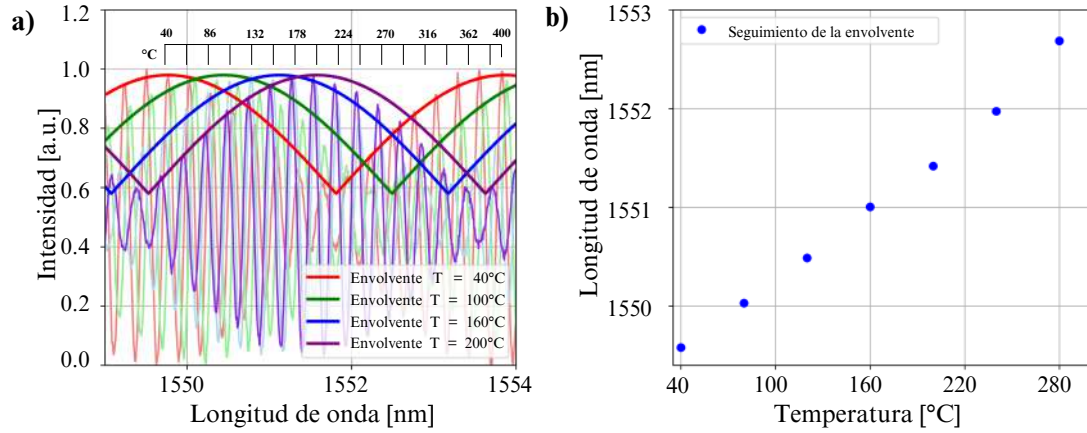


Figura 4.2: Resultados de la técnica de aplicación de rango a) Señal de la envolvente con diferentes temperaturas; b) Respuesta lineal del seguimiento del máximo de la envolvente.

Los resultados obtenidos de estos experimentos se muestran en la Fig.4.2. En primer lugar, en la Fig.4.2a se observa la envolvente generada por el batimiento de las cavidades fabricadas, lo cual evidencia el aumento en el rango de medición alcanzado. Por su parte, la Fig. 4.2b presenta el desplazamiento del punto máximo de la envolvente registrado conforme se aplicaron variaciones de temperatura al sensor de fibra. Estos resultados respaldan la validez de la de la técnica propuesta donde se comprueba que el rango fue aumentado en aproximadamente 15 veces con una respuesta lineal.

4.1.2. Sensor versión compacta

Para validar la versión compacta del sensor propuesto, se siguió la misma metodología experimental que en la versión dividida, utilizando la plancha térmica como elemento de control de temperatura. En esta etapa, la temperatura se incrementó gradualmente hasta alcanzar un máximo de 300°C, límite determinado por la capacidad de la plancha empleada. A diferencia de la versión anterior, en esta ocasión se diseñaron y fabricaron cavidades con longitudes de 2,9 mm y 3,2 mm, cuidadosamente seleccionadas para generar una envolvente óptica con un periodo extendido que permitiera aumentar el rango de medición sin necesidad de incorporar nuevos materiales ni técnicas adicionales, como regillas de Bragg u otros componentes externos.

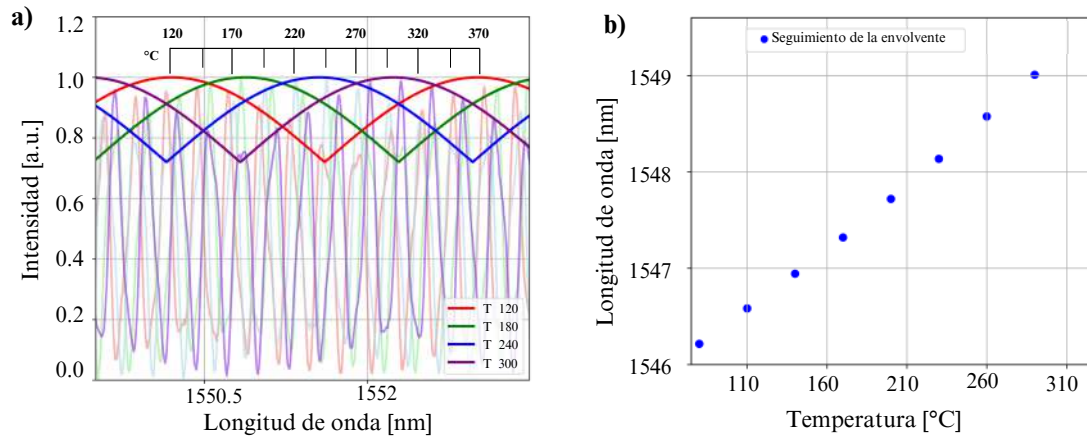


Figura 4.3: Resultados de la técnica de aplicación de rango a) Señal envolvente con diferentes temperaturas; b) Respuesta lineal del seguimiento del máximo de la envolvente.

Con esta configuración, se logró ampliar el rango de medición en un factor cercano a 10 veces respecto a un sensor Fabry-Pérot convencional de una sola cavidad. Durante las pruebas, se realizaron mediciones cada 30 grados Celsius para registrar la respuesta espectral a distintas temperaturas. Los resultados experimentales muestran una respuesta estable y lineal a lo largo de todo el rango evaluado, lo que confirma la efectividad del diseño de cavidades optimizado para la versión compacta. Esta validación experimental respalda la viabilidad de inte-

grar esta técnica en aplicaciones prácticas donde se requiera un sensor robusto, compacto y de amplio rango de operación. Los resultados se ilustran en la Fig. 4.3.

4.2. Algoritmo de reconocimiento de patrones

Para la validación del algoritmo ARP propuesto, se generaron diversas señales interferométricas utilizando diferentes tipos de fibra óptica y configuraciones experimentales desarrolladas en distintos laboratorios. El objetivo fue poner a prueba y evaluar el desempeño del algoritmo frente a diferentes tipos de señales. Cada configuración experimental se diseñó para medir un parámetro físico específico, como índice de refracción, curvatura direccional, deformación o temperatura. Un esquema general del montaje experimental empleado se muestra en la Fig. 4.4, donde se observa el uso de una BBS capaz de emitir luz en un rango de varias decenas de nanómetros.

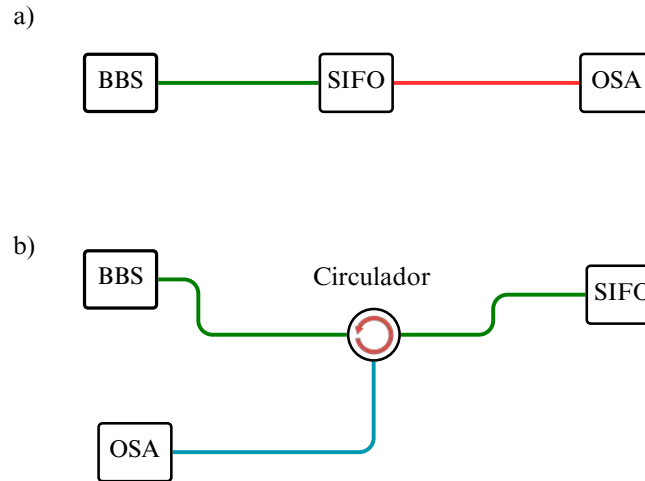


Figura 4.4: Arreglo experimental a) Para los sensores con medición en transmitancia; b) Para los sensores con medición en reflectancia

La luz proveniente de BBS es dirigida hacia el sensor interferométrico de fibra óptica, el cual es interrogado mediante un OSA. El tipo de sensor interferométrico implementado define si la medición de la señal se realiza en modo transmitancia, como se muestra en la Fig. 4.4a, o reflectancia, como se muestra en la Fig. 4.4b.

El algoritmo ARP propuesto, diseñado para clasificar señales interferométricas, fue probado en escenarios con sensores puntuales, sensores multiparametricos y sensado multipunto. En cada escenario se emplearon señales interferométricas para medir distintos parámetros, incluyendo índice de refracción (IR) —considerando muestras con valores de IR tanto menores como mayores al índice efectivo del modo fundamental de la fibra—, curvatura direccional (magnitud y orientación), deformación mecánica (strain) y temperatura. Es importante destacar que la cantidad de información disponible (las señales interferométricas) varía en cada escenario, lo que hace indispensable contar con un algoritmo robusto y confiable.

4.2.1. Índice de refracción

Como se muestra en la Fig. 4.5, para el sensor interferométrico de fibra utilizado en la medición de índice de refracción se emplearon dos cavidades Fabry-Pérot en cascada, hechas con SMF. Este interferómetro se conformó mediante tres reflectores: dos espejos internos de fibra con baja reflectividad y la reflexión generada en la punta de la fibra.

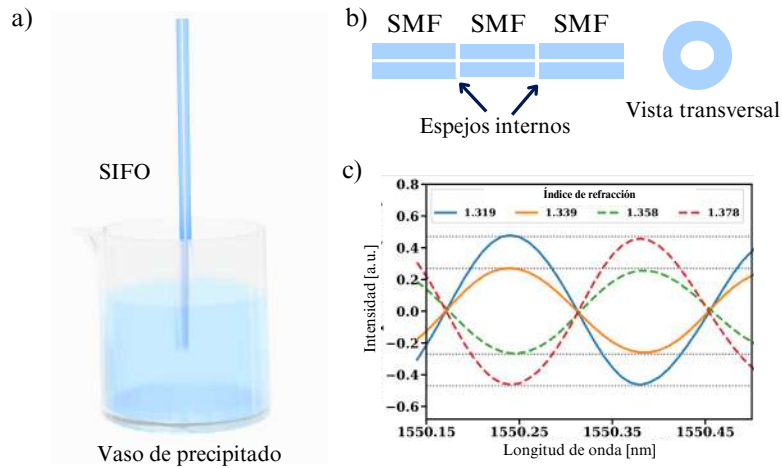


Figura 4.5: Índice de refracción; a) Arreglo experimental; b) Configuración del sensor; c) Señales del SIFO.

La estructura resultante produce un espectro de interferencia compuesto por tres componentes de interferencia, como se ilustra en la misma figura. Para validar

el método propuesto, se emplearon diez líquidos de índice de refracción calibrados, adquiridos en Cargille Laboratories.

Estos líquidos de calibración de Cargille corresponden a las series A, AA y AAA, y presentan valores de índice de refracción que varían desde 1.315 hasta 1.58, medidos a una longitud de onda de 1550 nm y a una temperatura de 20°C.

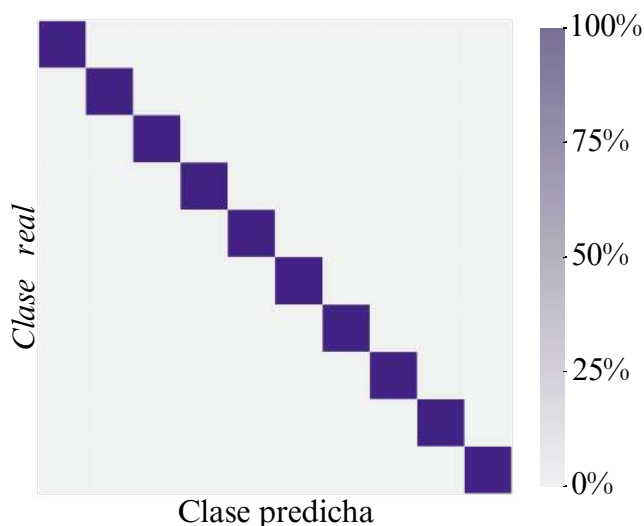


Figura 4.6: Matriz de confusión de la clasificación de valores de índice de refracción.

En este caso, se realizó la medición del índice de refracción evaluando 10 líquidos diferentes, seleccionados para cubrir un rango amplio de valores, tanto por debajo como por encima del índice de refracción efectivo del modo fundamental de la fibra. Además, como se muestra en la Fig. 4.6, correspondiente a la matriz de confusión, se obtuvo un 100 % de aciertos en la clasificación de los líquidos, lo que confirma la efectividad del método propuesto.

4.2.2. Temperatura

En la experimentación con temperatura para el sensor de fibra interferométrico se utilizó una fibra óptica especial denominada fibra de siete núcleos fuertemente acoplados, conocida también como fibra multicore (MCF por sus siglas en inglés). Este dispositivo opera mediante la excitación y recombinación de dos supermodos

dentro de la MCF Flores-Bravo et al. (2021). El acoplamiento de estos supermodos se manifiesta en el espectro de reflexión del interferómetro, el cual muestra máximos y mínimos periódicos bien definidos que se desplazan cuando el sensor se somete a variaciones de temperatura.

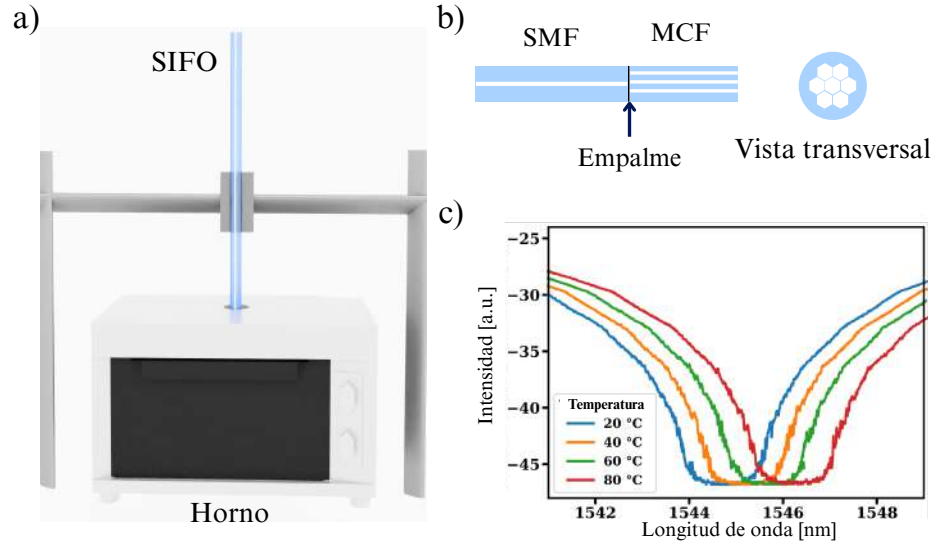


Figura 4.7: Temperatura; a)Arreglo experimental; b)Configuración del sensor; c)Señales del SIFO.

El acoplamiento entre supermodos se observa en el espectro de reflexión del sensor, el cual presenta máximos y mínimos periódicos bien definidos que se modifican cuando el sensor se expone a cambios de temperatura. La estructura del dispositivo y los espectros resultantes se muestran en la Fig. 4.7.

En este experimento, la temperatura aplicada al sensor de fibra se varió desde 20 hasta 90 grados Celsius, realizando incrementos de 10 grados en cada medición.

En el caso del monitoreo de temperatura, los resultados mostrados en la Fig. 4.12 evidencian que las 8 temperaturas diferentes consideradas en el experimento fueron clasificadas correctamente en cada clase correspondiente, sin presentar errores de asignación.

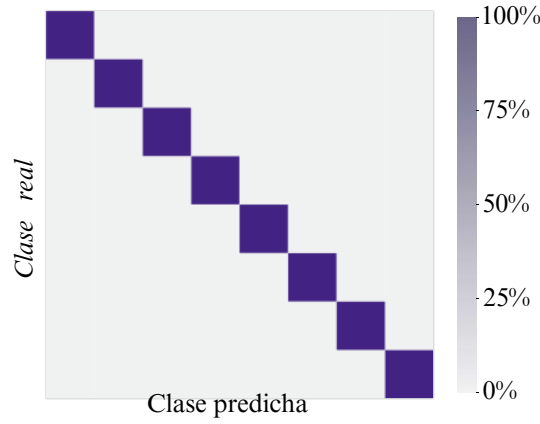


Figura 4.8: Matriz de confusión de la clasificación de valores de temperatura

4.2.3. Deformación mecánica

En el sensor de deformación mecánica, mostrado en la Fig. 4.9, se empleó la estructura conocida como single mode-multimode-single mode (SMS) para la medición de deformación, registrando el espectro en modo de transmisión. En este caso, se utilizó una fibra sin núcleo (NC por sus siglas en inglés) como fibra multimodo.

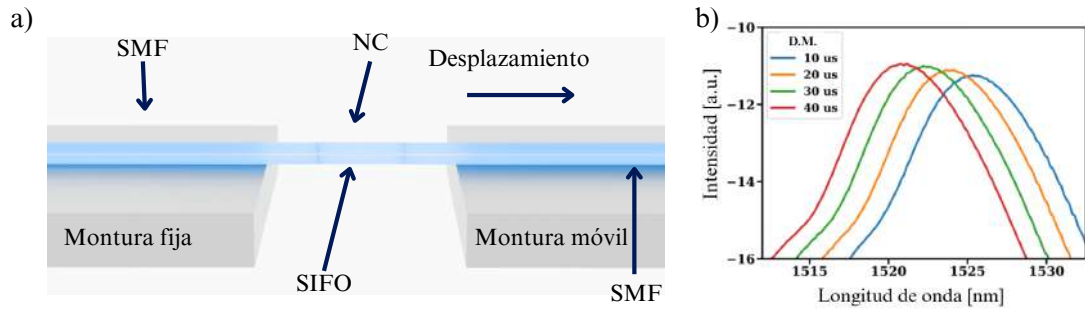


Figura 4.9: Deformación mecánica; a) Arreglo experimental; b) Señales del SIFO

La interferencia multimodo genera un espectro característico con múltiples máximos y mínimos locales. Para esta prueba, se aplicó una deformación longitudinal a la fibra, variando desde 0 hasta $60\mu\varepsilon$, con incrementos de $1\mu\varepsilon$.

En este caso, se registraron 61 niveles de deformación mecánica, con incrementos de un microstrain entre cada nivel. Además, para cada nivel de deformación se

realizaron diez repeticiones, obteniendo un total de 610 señales interferométricas. De este conjunto, se seleccionaron 61 señales —una por cada nivel de deformación— para conformar la base de datos de referencia. Las 549 señales restantes se utilizaron para evaluar el desempeño del algoritmo V-PRA propuesto.

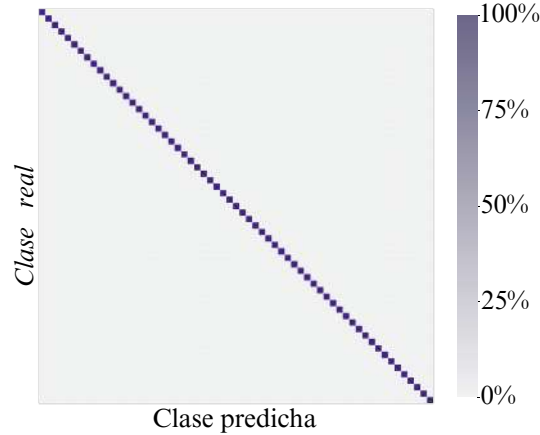


Figura 4.10: Matriz de confusión clasificación de valores de deformación mecánica.

Independientemente de la señal de prueba seleccionada, el mayor valor de similitud se obtuvo de forma consistente con la señal de referencia correspondiente como se puede observar en la Fig.4.6. Además, este resultado fue independiente de la repetición específica de la señal evaluada, lo que demuestra la solidez y confiabilidad del algoritmo propuesto.

4.2.4. Señales multiparamétricas

Para mediciones multiparamétricas se escogió un experimento de curvatura y dirección de la curvatura, este es mostrado en la Fig. 4.11, en donde se utilizó una fibra multimodo con núcleo elíptico (ECF) como sensor interferométrico, operando en modo de reflexión para la detección de curvaturas direccionales.

La interferencia de varios modos dentro de la fibra provoca que su espectro presente múltiples máximos y mínimos, así como diferentes periodos, como se ilustra también en la Fig. 4.11. En este caso, el SIFO se fijó a una estructura flexible, y las mediciones abarcaron tres posiciones radiales distintas del extremo libre (magnitud del desplazamiento), evaluadas cada 45 grados respecto a una

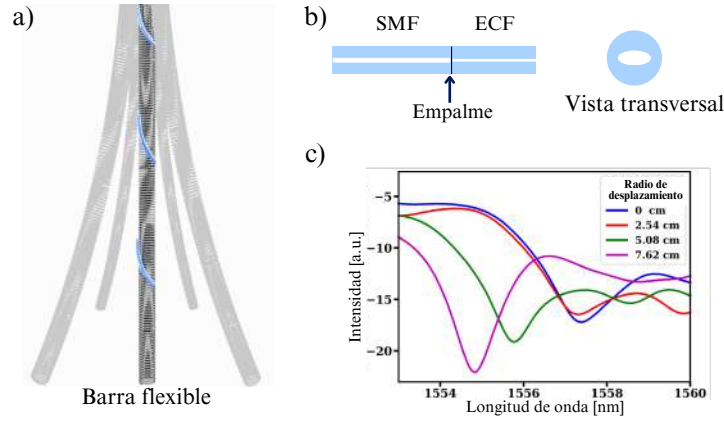


Figura 4.11: Curvatura y dirección; a) Arreglo experimental; b) Configuración del sensor; c) Señales del SIFO.

orientación inicial (dirección). En total se midieron 24 posiciones, además de la posición de reposo.

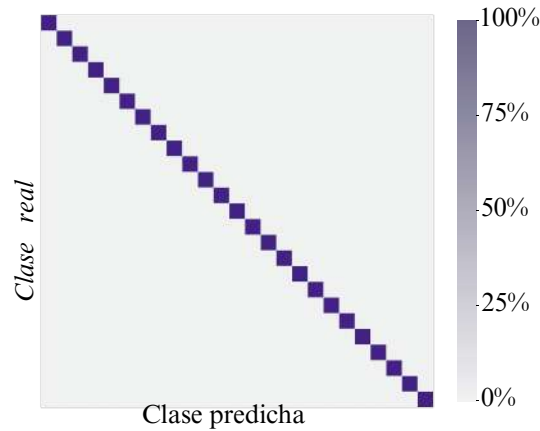


Figura 4.12: Matriz de confusión de la clasificación de valores de magnitud y dirección de curvatura.

En la Fig. 4.12 se presentan los resultados obtenidos para el sensor interferométrico multiparamétrico, donde se comprueba que el algoritmo logra una efectividad del 100 % en la clasificación de las señales correspondientes a 25 posiciones de curvatura diferentes. Este resultado demuestra la capacidad del algoritmo para identificar de forma precisa dos parámetros simultáneamente: el radio de curva-

tura y la dirección de la curvatura. Con ello, se valida la robustez del algoritmo para procesar señales que contienen información de múltiples variables físicas.

4.3. Integración de la técnica de ampliación del rango de medición y el algoritmo ARP con señales multipunto

En esta sección se valida la integración de la técnica de ampliación de rango de medición con el ARP en un sistema multipunto. Primero, se presentan resultados de simulación que demuestran la capacidad del algoritmo para clasificar señales con traslape sin necesidad de demodulación. Después, se describe un experimento de prueba de concepto con señales reales para evaluar su desempeño en condiciones controladas.

Para validar la técnica de ampliación de rango en un escenario multipunto, se llevó a cabo la simulación considerando dos sensores interferométricos Fabry-Pérot independientes, cada uno de ellos tuvo un diseño específico de cavidades en cascada para garantizar la ampliación del rango de medición. El primer sensor se fabricó de acuerdo al diseño con cavidades de 3.1 mm y 3.3 mm, de esta manera el rango de medición se amplió en aproximadamente 15 veces con un rango final de 360°C. Para el segundo sensor se fabricaron cavidades de 2.91 mm y 3.1 mm, con lo cual se alcanzó una extensión de rango de alrededor de 10 veces con un rango final de 250°C.

En esta simulación, se utilizaron los mismos valores de reflectividad y parámetros de fase para ambos sensores. Para construir una base de datos representativa, se definieron intervalos de temperatura para cada sensor en función de su rango de medición: de 0°C a 350°C para el primero y de 0°C a 240°C para el segundo, considerando incrementos de 10°C.

La respuesta de cada sensor se calculó individualmente y posteriormente se combinó mediante una suma ponderada, donde cada sensor aporta el 50 % de la señal total. De esta manera, se obtuvo una base de datos sintética que contiene todas las combinaciones posibles de temperatura entre ambos sensores, dando como resultado un total de 900 señales.

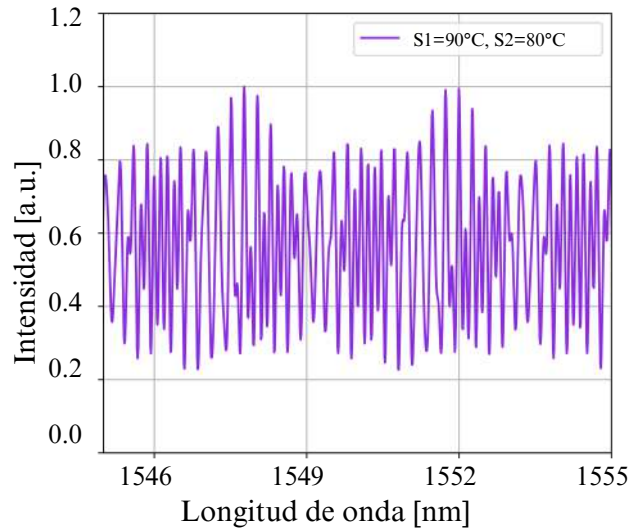


Figura 4.13: Espectro del sistema multipunto (S1 y S2, se refieren a sensor 1 y 2, respectivamente. Cada uno a una temperatura diferente.).

El patrón espectral resultante de esta suma presenta un comportamiento interferométrico complejo, producto del batimiento entre las respuestas de ambos sensores. Este patrón ya no muestra una envolvente bien definida que permita aplicar técnicas tradicionales de seguimiento de máximos y mínimos, lo que evidencia la necesidad de utilizar ARP para identificar de forma confiable las temperaturas a las que están expuestos los sensores.

Un ejemplo ilustrativo de este patrón de interferencia compuesto se presenta en la Fig.4.13, donde se observa claramente la complejidad de la señal generada al traslapar las contribuciones de ambos sensores, demostrando el desafío que implica su análisis mediante métodos convencionales como lo es el seguimiento de mínimos o máximos.

Para validar el desempeño del algoritmo de reconocimiento de patrones en un sistema multipunto, se seleccionaron 20 combinaciones de temperaturas para los dos sensores interferométricos diseñados con la técnica de ampliación de rango. Estos pares de temperatura se eligieron dentro de los rangos establecidos para cada sensor, asegurando así la coherencia con la base de datos previamente generada.

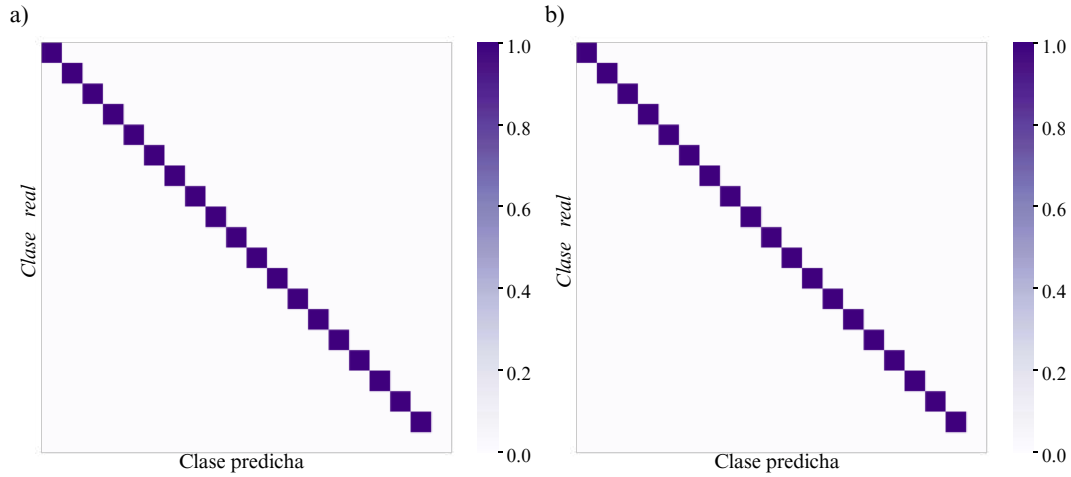


Figura 4.14: Matrices de confusión de cada sensor por separado; a) Clasificación de temperaturas del S1; b) Clasificación de temperaturas del S2.

Con base en ello, se generaron las señales sintéticas de prueba con la suma de cada uno de los sensores con una temperatura específica.

El algoritmo compara cada señal de prueba contra todas las señales almacenadas en la base de datos, evaluando la similaridad y seleccionando como predicción final aquella combinación de temperaturas cuyo patrón presenta la mayor coincidencia, es decir, el mayor valor de similaridad.

Los resultados de esta simulación fueron resumidos en matrices de confusión para cada uno de los sensores, como se observa en la Fig.4.14. En ellas se puede observar cómo el algoritmo clasificó de manera correcta cada una de las temperaturas de cada sensor.

Este resultado demuestra que el algoritmo propuesto es capaz de reconocer los patrones de cada sensor correspondientes a una temperatura diferente, confirmando su potencial para aplicaciones en sistemas multipunto con sensores interferométricos de rango extendido.

Además de la validación a través de las simulaciones, se llevaron a cabo experimentos en el laboratorio con la construcción de los sensores diseñados en simulación para validar el algoritmo ARP en condiciones reales para sistemas multipunto. Para este experimento, se utilizaron 2 planchas térmicas para poder mantener los sensores a diferentes temperaturas cada uno. Este arreglo experi-

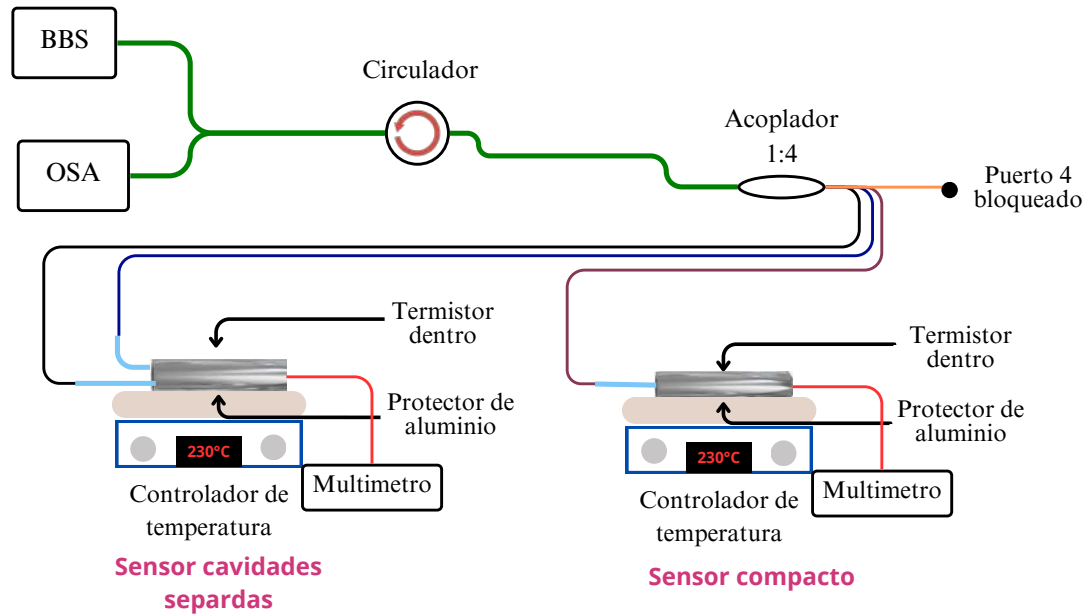


Figura 4.15: Arreglo experimental del sistema multipunto

mental se muestra en la Fig. 4.15. Se utilizó un circulador y un acoplador 1:4; se utilizaron 3 de los puertos, dos de ellos para el sensor dividido y el otro para el sensor compacto. El último puerto se dejó inactivo y se confirmó que no estuviera reflejando luz para evitar efectos no deseados.

Durante el experimento, cada sensor fue expuesto a incrementos de temperatura de aproximadamente 10 grados Celsius. Haciendo uso de un termistor en cada una de las planchas, se pudo confirmar la temperatura para cada sensor. Este sistema generó pares de temperatura diferentes para cada sensor. Debido a la complejidad en el control preciso de la plancha y el termistor, y a la necesidad de mantener la estabilidad de temperatura de cada sensor, se adquirió un conjunto reducido de señales experimentales.

Los resultados de esta validación experimental se presentan en las matrices de confusión mostradas en la Fig. 4.16, en la que se observa que cada par de temperaturas fue identificado correctamente, confirmando el buen desempeño del algoritmo con señales reales y combinadas.

En conjunto, estos resultados experimentales complementan la validación en simulación, demostrando que la técnica de ampliación de rango, combinada con

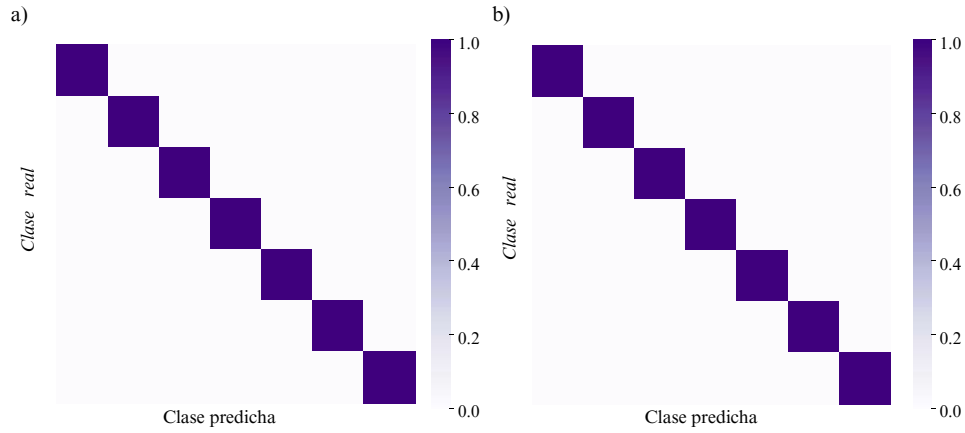


Figura 4.16: Matriz de confusión; a) Clasificación de las temperaturas del sensor 1; b) Clasificación de las temperaturas del sensor 2.

el ARP, es confiable tanto en teoría como en una aplicación práctica.

4.4. Discusión

Los resultados obtenidos en este trabajo confirman las 2 contribuciones propuestas: 1 .Una técnica de extensión del rango de medición en sensores Fabry-Pérot de fibra óptica basada en el batimiento de señales de cavidades con longitudes parecidas, y 2. Un algoritmo de reconocimiento de patrones (ARP) sencillo y robusto para procesar señales interferométricas. Ambas propuestas demostraron un buen desempeño, tanto de manera individual como al ser integradas en un sistema de medición multipunto.

En cuanto a la extensión de rango en sensores tipo FP de fibra óptica, se propuso y validó una técnica novedosa que supera la ambigüedad de 2π en sensores interferométricos. Al diseñar cavidades con longitudes muy parecidas, se obtiene un batimiento de estas señales que genera una envolvente con la cual se puede ampliar el rango de medición, obteniendo factores de mejora de hasta 15 veces en un sensor y 10 veces en otro, sin necesidad de recurrir a materiales especializados o técnicas adicionales como fibras de Bragg.

Por otro lado, el ARP desarrollado se destaca por su simplicidad y bajo requerimiento computacional, ya que no requiere de grandes cantidades de señales

para lograr un entrenamiento eficaz como los algoritmos tradicionales con base en redes neuronales. En su lugar, el algoritmo vectoriza las señales interferométricas y las compara mediante producto punto, asignando una medida de similitud donde valores cercanos a 1 indican una clasificación correcta.

En la validación con señales sintéticas, el ARP logró una eficacia del 100 % para la correcta clasificación de cada una de las señales generadas con todas las posibles combinaciones de ambos sensores, incluso cuando los patrones interferométricos combinados carecían de una envolvente claramente distinguible. Este punto resulta relevante en el trabajo, ya que, por ejemplo, las técnicas clásicas, como el seguimiento de mínimos o máximos, no son necesarias para el correcto reconocimiento de las señales.

La integración de ambas propuestas resulta ser robusta y eficaz, una propuesta innovadora en sensores de fibra óptica. El algoritmo propuesto ARP demostró su efectividad para la clasificación de señales interferométricas puntuales, multiparamétricas y multipunto, lo que abre nuevas posibilidades en los sistemas de medición óptica en donde se requiera precisión, robustez y capacidad de multiplexación.

Cabe destacar que estos resultados han sido previamente compartidos con la comunidad científica a través de presentaciones en congresos especializados y publicaciones en revistas del área, lo que ha permitido validar y difundir el enfoque propuesto en entornos académicos y técnicos.

5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

El trabajo propuesto ha demostrado optimizaciones en los sistemas de sensado de fibra óptica: la ambigüedad del rango de medición en sensores Fabry-Pérot dada por el OPD definido por la longitud del interferómetro y la interpretación robusta de señales complejas en diferentes configuraciones de sensores. Los resultados obtenidos en el trabajo demuestran la viabilidad y el potencial para aplicar las propuestas.

La técnica de ampliación de rango, con base en el diseño específico de cavidades interferométricas con longitudes muy similares, ha demostrado ser una solución efectiva para extender el rango de medición de los sensores tipo Fabry-Pérot sin recurrir a componentes adicionales o alguna modificación en el material de la fibra. Los factores de mejora alcanzados —hasta 10 y 15 veces en las configuraciones desarrolladas— significan una optimización en el rango de medición en los interferómetros Fabry-Pérot: la ambigüedad de fase en mediciones al alcanzar un desplazamiento de fase de 2π . Los resultados experimentales confirman que la técnica propuesta funciona con diferentes diseños de cavidades, validando la técnica para futura exploración de diferentes cavidades, como Michelson, Sagnac, etc. Así como con cavidades fabricadas con diferentes fibras especiales.

Por otro lado, ARP desarrollado ha demostrado ser una alternativa robusta y confiable ante métodos tradicionales para la demodulación de señales. Su capacidad para clasificar correctamente las señales provenientes de parámetros físicos

-incluso en escenarios multiparamétricos y multipunto- mediante una comparación vectorial y medidas de similitud angular, resalta su efectividad y bajo costo computacional. La exactitud del 100 % obtenida en las pruebas sintéticas valida su efectividad, y la adaptabilidad a diferentes entornos de medición y diferentes configuraciones de sensores permiten corroborar que el ARP propuesto en este trabajo puede ser empleado en diferentes aplicaciones sin requerir de una gran cantidad de información para el entrenamiento.

La integración de ambas contribuciones —extensión de rango y procesamiento inteligente de señales— representa una propuesta novedosa para el sensado interferométrico de fibra óptica. A diferencia de soluciones con base en un algoritmo especializado y complejo de machine learning que requieren gran cantidad de información, esta propuesta ofrece un enfoque optimizado, donde la física del sensor y el procesamiento de señales se complementan para lograr eficacia y simplicidad.

Esta investigación propone una alternativa innovadora que optimiza tanto el rango de medición como el procesamiento de señales en sensores de fibra óptica, sentando bases para futuros avances en este campo.

5.2. Recomendaciones

Con base en el desarrollo y los resultados que se obtuvieron en la técnica propuesta y el algoritmo ARP, se identifican varias líneas de mejora que se sugieren para fortalecer y ampliar el alcance del trabajo desarrollado:

Puntos de mejora ARP: Se recomienda explorar métodos para mejorar computacionalmente el algoritmo, por ejemplo, mediante la reducción de dimensionalidad de los vectores de señales. Además, resulta conveniente que en futuras versiones el algoritmo integre una capa de validación del entorno de medición, esto podría resolverse con una base de datos sintética. Esto permitiría detectar condiciones no ideales, entornos más agresivos, que pudieran afectar la confiabilidad de las señales en la base de datos debido a efectos no deseados al momento de adquirir las señales que conforman la base de datos. De este modo, el sistema podría discriminar mediciones poco fiables.

Ensayos en entornos reales: Aunque el sistema mostró resultados prometedores en pruebas de laboratorio y simulación, se sugiere ampliar la validación a

entornos experimentales reales, donde se presenten variaciones térmicas, vibraciones, movimientos no controlados y factores externos que pongan a prueba la robustez del algoritmo.

Interfaz de usuario y visualización de datos: Finalmente, se aconseja el desarrollo de una interfaz amigable para el usuario final, que permita visualizar en tiempo real la clasificación de señales.

En conjunto, la implementación de estas recomendaciones contribuirá a consolidar la técnica de aplicación de rango de medición y el ARP como soluciones prácticas, versátiles y confiables para sistemas de sensado avanzados.

Referencias

- Adane Nega Tarekegna, Mario Giacobini, K. M. (2021). A review of methods for imbalanced multi-label classification. *Pattern recognition*, 118:12. 15
- Chen, Z.-h., Tong, R.-j., Xing, B., Wu, S.-c., and Zheng, H.-n. (2024). Fabry-perot parallel type high sensitivity fiber optic temperature sensor based on vernier effect beyond free spectral range measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 370:115241. 4
- Chen Zhu, J. H. (2022). Machine learning boosts performance of optical fiber sensors: a case study for vector bending sensing. *Optics express*, 30(14):24553–24564. 24
- Elsherif, M., Salih, A. E., Muñoz, M. G., Alam, F., AlQattan, B., Antonysamy, D. S., Zaki, M. F., Yetisen, A. K., Park, S., Wilkinson, T. D., et al. (2022). Optical fiber sensors: Working principle, applications, and limitations. *Advanced Photonics Research*, 3(11):2100371. 1, 11
- Esquivel-Hernández, J., Martínez-Manuel, R., Maldonado-Hurtado, D., Valentín-Coronado, L. M., Barrera, D., and Sales, S. (2024). Interferometric temperature fiber sensor based on hilbert transform. *IEEE Photonics Technology Letters*. 30
- Flores-Bravo, J. A., Fernández, R., Lopez, E. A., Zubia, J., Schülzgen, A., Correa, R. A., and Villatoro, J. (2021). Simultaneous sensing of refractive index and temperature with supermode interference. *Journal of Lightwave Technology*, 39(22):7351–7357. 51
- Grattan, K. T. and Meggitt, B. T. (1995). *Optical fiber sensor technology*, volume 1. Springer. 16
- Gui, J., Chen, T., Zhang, J., Cao, Q., Sun, Z., Luo, H., and Tao, D. (2024). A survey on self-supervised learning: Algorithms, applications, and future trends. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 14, 15

- Guzman-Chavez, A. D., Vargas-Rodriguez, E., Vargas-Rodriguez, B. L., and Garcia-Ramirez, M. A. (2022). Viability of artificial neural networks for widen the measurement range of interferometric sensors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 34(17):915–918. vi, 20, 21, 22
- Islam, M. R., Ali, M. M., Lai, M.-H., Lim, K.-S., and Ahmad, H. (2014). Chronology of fabry-perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review. *Sensors*, 14(4):7451–7488. 16, 17
- Koustav Dey, Vangety Nikhil, S. R. (2023). Machine learning approach with higher accuracy for simultaneous measurement of the dual parameter by msm fiber structure. *Measurement*, 221(113426). 23, 24
- Lee, B. H., Kim, Y. H., Park, K. S., Eom, J. B., Kim, M. J., Rho, B. S., and Choi, H. Y. (2012). Interferometric fiber optic sensors. *Sensors*, 12(3):2467–2486. 15
- Li, W., Yuan, Y., Yang, J., and Yuan, L. (2021). Review of optical fiber sensor network technology based on white light interferometry. *Photonic Sensors*, 11:31–44. 3
- Liu, Q., Wang, C., Liu, W., Zhang, R., Gao, H., Wang, X., and Qiao, X. (2022). Large-range and high-sensitivity fiber optic temperature sensor based on fabry-pérot interferometer combined with fbg. *Optical fiber technology*, 68:102794. 4
- Liu, T., Jiang, J., Liu, K., Wang, S., Zhang, X., Hu, H., Ding, Z., Guo, H., Li, Y., and Zhang, W. (2021a). Review of fiber mechanical and thermal multi-parameter measurement technologies and instrumentation. *Journal of Lightwave Technology*, 39(12):3724–3739. 18, 19
- Liu, Y., Li, X., Zhang, Y.-n., and Zhao, Y. (2021b). Fiber-optic sensors based on vernier effect. *Measurement*, 167:108451. 5
- Martínez-Manuel, R. and Esquivel-Hernández, J. (2021). Fiber cavities design for a multipoint fiber refractometer. *IEEE Sensors Journal*, 21(20):22767–22774. 28, 34
- Martínez-Manuel, R., Esquivel-Hernández, J., Valentín-Coronado, L. M., and LaRochelle, S. (2023). Fiber-optic sensor for directional bending monitoring based on a pattern recognition algorithm. *IEEE Sensors Journal*, 23(5):4819–4824. 4
- Martínez-Manuel, R., Valentín-Coronado, L. M., Esquivel-Hernández, J., Monga, K. J.-J., and LaRochelle, S. (2022). Machine learning implementation for unambiguous

- refractive index measurement using a self-referenced fiber refractometer. *IEEE Sensors Journal*, 22(14):14134–14141. 4
- Milou, A. (2021). In-fiber interferometric-based sensors: Overview and recent advances. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 1(1):1–31. vi, 3, 11, 12
- Nikolai A. Ushakov, Aleksandr A. Markvart, L. B. L. (2020). Pulse wave velocity measurement with multiplexed fiber optic fabry–perot interferometric sensors. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 20(19):11302–11312. 17
- Nikolai Ushakov, A. M. and Lioku, L. (2022). Singlemode-multimode- singlemode fiber-optic interferometer signal demodulation using music algorithm and machine learning. *Photonics 2022*, 9:16. 2
- Perez-Herrera, R. A., Bravo, M., Leandro, D., Novais, S., Pradas, J., and Lopez-Amo, M. (2021). Multiparameter sensor based on a multi-interferometric serial configuration for temperature and strain measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27(6):1–4. 19
- Pin Wang, En Fan, P. W. (2021). Comparative analysis of image classification algorithms based on traditional machine learning and deep learning. *Pattern Recognition Letters*, 141:61–67. 13, 15
- Simon Pevec, D. D. (2019). Multiparameter fiber-optic sensors: a review. *Optical Engineering*, 58(7). 18, 19
- Tao Zhu, Di Wu, M. L. and Duan, D.-W. (2012). In-line fiber optic interferometric sensors in single-mode fibers. *Sensors*, 12(12):10430–10449. 16, 17
- Venketeswaran, A., Lalam, N., Wuenschell, J., Ohodnicki Jr, P. R., Badar, M., Chen, K. P., Lu, P., Duan, Y., Chorpening, B., and Buric, M. (2022). Recent advances in machine learning for fiber optic sensor applications. *Advanced Intelligent Systems*, 4(1):2100067. 3, 4
- Wang, Y.-n., Qin, L., Yuan, Z., Li, J., and Meng, F. (2025). Development of a novel humidity sensor for breath pattern recognition using large dislocation hollow core fiber infused with nano-carbon quantum water gel microfiber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 422:136644. 20, 22
- Wen, Z., Guan, Z., Dong, J., Li, H., Cai, Y., and Gao, S. (2022). A review of sensitivity enhancement in interferometer-based fiber sensors. *Sensors*, 22(7):2506. 11

- Wu, Y., Xia, L., Wu, N., Wang, Z., and Zuo, G. (2021). Optimized feedforward neural network for multiplexed extrinsic fabry-perot sensors demodulation. *Journal of Lightwave Technology*, 39(13):4564–4569. 22
- Xie, L., Nguyen, L. V., Ebendorff-Heidepriem, H., and Warren-Smith, S. (2019). Multiplexed optical fiber biochemical sensing using cascaded c-shaped fabry-perot interferometers. *IEEE Sensors Journal*, 19(22):10425–10431. 17
- Xu, H., Chen, S., Ren, S., Hou, X., Wang, G., and Shen, C. (2023). Dual-parameter demodulation of fbg-fpi cascade sensors via sparse samples: A deep learning-based perspective. *IEEE Sensors Journal*, 23(19):23903–23915. 23, 24
- Zhang, X., Cao, H., He, J., Wang, L., Li, Y., Kang, J., Ma, J., and Jiang, Z. (2025). Optical fiber multimode interference sensors using spatial multiplexing. *Optics Communications*, 577:131383. 23
- Zhang, X.-Y., Liu, C.-L., and Suen, C. Y. (2020). Towards robust pattern recognition: A review. *Proceedings of the IEEE*, 108(6):895–922. 13, 15
- Zhaobing Tian, S. S.-H. Y. (2009). Cin-line single-mode optical fiber interferometric refractive index sensors. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 27(13):2296–3206. 17
- Zhou, Y., Zhang, Y.-n., Yu, Q., Ren, L., Liu, Q., and Zhao, Y. (2024). Application of machine learning in optical fiber sensors. *Measurement*, page 114391. 21, 22

Declaración

Por la presente declaro que he elaborado este documento sin la ayuda prohibida de terceros y sin hacer uso de ayudas distintas de las especificadas; nociones asumidas directamente o indirectamente de otras fuentes se han identificado como tales. Este documento no ha sido previamente presentado en forma idéntica o similar de algún otro examen nacional o extranjero.

El trabajo de tesis se llevó a cabo de **Septiembre de 2023** a **Julio de 2025** bajo la supervisión del **Dr. Rodolfo Martínez Manuel** (Director de Tesis) y del **Dr. Luis M. Valentín Coronado** (Co-Director de Tesis).

Aguascalientes, Ags., 28 de Julio de 2025.