



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A. C.

INSTRUMENTACIÓN DE SENSORES INTERFEROMÉTRICOS DE FIBRA ÓPTICA PARA MONITOREO DE MÚLTIPLES PARÁMETROS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

**DOCTORA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA Y DISEÑO
MECÁNICO**

PRESENTA

Monserrat del Carmen Alonso Murias

DIRECTOR: Dr. David Monzón Hernández

CODIRECTOR: Dr. Joel Villatoro Bernardo

VERSION DEFINITIVA



CIENCIA Y TECNOLOGIA



Director de Posgrado
PICYT – CIO
León

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la alumna **MONSERRAT DEL CARMEN ALONSO MURIAS**, una vez leída y revisada la Tesis titulada **“INSTRUMENTACIÓN DE SENSORES INTERFEROMÉTRICOS DE FIBRA ÓPTICA PARA MONITOREO DE MÚLTIPLES PARÁMETROS”**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna(o) para aspirar al grado de **Doctorado en Ciencia y Tecnología en Mecatrónica y Diseño Mecánico** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los **14** días del mes de **FEBRERO** del año dos mil **24**.

DR. DAVID MONZÓN
HERNÁNDEZ
Director de Tesis

Firmado digitalmente
por AGUSTÍN JOEL
VILLATORO BERNARDO
-79438109L
Fecha: 2024.02.20
08:46:12 +01'00'

DR. JOEL VILLATORO
BERNARDO
Codirector de Tesis

DR. GEMINIANO DONACIANO
MARTÍNEZ PONCE
Asesor de Tesis

DR. EDEN MORALES
NARVÁEZ
Asesor de Tesis



Director de Posgrado
PICYT – CIO
León

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado de la alumna **MONSERRAT DEL CARMEN ALONSO MURIAS**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**INSTRUMENTACIÓN DE SENSORES INTERFEROMÉTRICOS DE FIBRA ÓPTICA PARA MONITOREO DE MÚLTIPLES PARÁMETROS**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna(o) para aspirar al grado de **Doctorado en Ciencia y Tecnología en Mecatrónica y Diseño Mecánico** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los **14** días del mes de **FEBRERO** del año dos mil **24**.

DRA. DANIELA DÍAZ
ALONSO
Presidente

DR. AMADO M. VELÁZQUEZ
BENÍTEZ
Secretario

DR. DAVID MONZÓN
HERNÁNDEZ
Vocal 1

DRA. GLORIA VERÓNICA
VÁZQUEZ GARCÍA
Vocal 2

DR. OLIVIER JEAN MICHEL
POTTIEZ
Vocal 3

Resumen

Las fibras ópticas es una tecnología madura y reconocida; además de las telecomunicaciones, en el campo de los sensores ópticos. Entre los sensores de fibra óptica (SFO) más populares, por su desempeño, y confiables se encuentran aquellos basados en rejillas de Bragg o que explotan el fenómeno óptico de la interferencia, por lo que son conocidos como Interferómetros de Fibra Óptica (IFO). En este trabajo de investigación se estableció como objetivo principal desarrollar sensores novedosos basados en Interferómetros de Fibra Óptica con buena sensibilidad y resolución para la detección de parámetros físicos. Para esto se desarrollaron metodologías de fabricación de IFOs en configuración del interferómetro Fabry-Perot y el interferómetro supermodal. Para mejorar su desempeño se toma ventaja de las características tanto de la fibra óptica convencional, utilizada para las telecomunicaciones, como de las fibras ópticas con múltiples núcleos fuertemente acoplados. Los interferómetros diseñados y fabricados son propuestos como SFOs de distancia y fuerza y se evalúa la sensibilidad, resolución y rango dinámico que los caracteriza. Además, en este trabajo se aprovechan las capacidades de los SFOs desarrollados para demostrar su factibilidad en aplicaciones puntuales. En este trabajo se abordan los aspectos importantes que permitieron el desarrollo de estos sensores interferométricos de fibra óptica; el diseño, la fabricación, la caracterización y la instrumentación. Este último aspecto es importante destacar, ya que nos permitió demostrar que es posible que un usuario poco experimentado pueda utilizar los IFO desarrollados para realizar de forma simple y práctica mediciones en tiempo real.

Agradecimientos

Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de dificultades como el desarrollo de una tesis doctoral es inevitable que te asalte un humano egocéntrico que te lleva a concentrar la mayor parte del mérito en el aporte que has hecho. Sin embargo, el análisis objetivo te muestra inmediatamente que la magnitud de ese aporte hubiese sido imposible sin la participación de personas e instituciones que han facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término. Por ello es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para ser justo y consecuente con ellas, expresándoles mis agradecimientos.

En primera instancia agradezco a CONAHCYT por el financiamiento otorgado a través de la beca doctoral. Al Centro de Investigaciones en Óptica por otorgarme las facilidades para usar su infraestructura para realizar este proyecto doctoral. Al Instituto de Innovación, Ciencia y Emprendimiento para la Competitividad del Estado de Guanajuato (México) por el apoyo otorgado a través del proyecto CIN006 para el financiamiento de la estancia internacional realizada en la Escuela de Ingeniería de la Universidad del País Vasco (Bilbao, España).

Al Dr. David Monzón quién ha fungido como mi asesor en este proyecto. Pero sobre todo por ser mi referente en lo profesional y en lo personal. Quien me ha enseñado a confiar más en mí, a demostrar las habilidades que poseo y afrontar los retos que se me presenten. La confianza, la paciencia, el respeto, la generosidad y el apoyo mutuo han sido una de las cosas que han contribuido para crear una extraordinaria relación de trabajo que ha influido en la culminación de este proyecto doctoral de forma satisfactoria.

A mi co-asesor el Dr. Joel Villatoro por su generosidad al brindarnos de recursos y conocimientos que permitieron explorar una línea de investigación nueva y novedosa dentro del Grupo de Sensores de Fibra Óptica (GSOM).

Al Dr. Geminiano Martínez Ponce y al Dr. Eden Morales Narvaéz, miembros de mi comité tutorial, por tomarse el tiempo necesario para brindarme sus comentarios y recomendaciones los cuales aportaron enormemente al proyecto doctoral plasmado en este documento.

A los doctores: Dra. Daniela Alonso, Dra. Gloria Verónica, Dr. Olivier Potiez, y Dr. Amado Velázquez, miembros de mi comité de evaluación, por el tiempo dedicado para leer este documento y contribuyendo a través de sus observaciones.

A mis amigos con quienes compartí gratos momentos durante mi doctorado, de quienes recibí un gran apoyo e influyeron en mi persona. A Nani mi mejor amiga, por cuidarme, procurarme, apoyarme en todo momento y animarme para seguir hasta el final. A Karlita, Dani L., Luis A., Sara, Valeria, Carlitos, y Mane por ser personas tan bonitas que me han cuidado y procurado desde el día que nos conocimos, por hacer de nuestra amistad un lugar tan especial, seguro, alegre e incondicional.

A mis hermanos del alma Mariela, Edgar, Aritzai y Chente por siempre estar para mí, por cuidarme, apoyarme aún en la distancia, y procurar de mí en todo momento. Y a todas aquellas personas que aún en la distancia no se han olvidado de mí y me han tendido una mano cuando más lo he necesitado.

A mis sobrinos, hermanos, y abuelitos. Principalmente, a mi mamá Lucy y mi papá Andrés que hoy en día tengo la dicha de compartir de estos momentos especiales con ellos, quienes me han dado todo su apoyo, esfuerzo, amor para cumplir cada reto, quienes de una u otra forma me han hecho saber que nos estoy sola y cuento con ellos.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Definición del Problema	2
1.3	Justificación	3
1.4	Objetivos	3
1.4.1	General	3
1.4.2	Específicos	4
1.5	Hipótesis	4
2	Estado del Arte y Marco Teórico	5
2.1	Fibra Óptica Monomodo	7
2.2	Fibra Multinúcleo: Núcleos Fuertemente Acoplados	12
2.2.1	Sistema de $N = 2$ Núcleos	13
2.2.2	Sistema con $N > 2$ Núcleos	19
2.3	Sensores de Fibra Óptica	21
2.3.1	Interferómetros de Fibra Óptica	24
2.3.2	Fibras con Rejillas de Bragg	48
3.	Método o Procedimiento de Investigación	52
3.1	Simulación	52
3.1.1	Análisis modal: 2D	53
3.1.2	Propagación del campo modal: 3D	55
3.2	Diseño del DFOS	57
3.2.1	Dispositivo en Punta: SMF-MCF ₇	59
3.2.2	Dispositivo Híbrido en Reflexión: ISPM (MCF ₃) + FBG	61
3.2.3	Dispositivo Híbrido en Punta: ISPM (MCF ₂ + FBG)	64
3.3	Fabricación de DFOS diseñados	66
3.3.1	Fabricación del Dispositivo en Punta	66
3.3.2	Fabricación del Dispositivo Híbrido en Reflexión	69
3.3.3	Fabricación del Dispositivo Híbrido en Punta con FBG Inscrita	70
3.4	Caracterización de los SFOs	71

3.4.1 SFO Basado en un ISPM en Punta (MCF ₇)	72
3.4.2 SFO Basado en un ISPM (MCF ₃) +FBG	84
3.4.3. SFO Basado en una FBG Inscrita en un ISPM (MCF ₂)	90
3.5 Instrumentación de los SFOs	93
3.5.1 Instrumentación de un MicronOptics sm125: Análisis en el Dominio de Fourier	94
3.5.2 Instrumentación de un Hyperion siX55: Análisis en el Dominio de Fourier	96
3.5.3 Instrumentación de un Hyperion siX55: Análisis en el Dominio de Óptico	99
3.5.4 Instrumentación de un Calibrador FLUKE 9103: Control de la Temperatura	102
4. Resultados	105
4.1 Fibra multinúcleo (7 núcleos)	105
4.1.1 Distancia	105
4.1.2 Nanodesplazamiento	109
4.1.3 Perfilometría	117
4.1.4. Detección de Deflexiones de micro-cantiléver	120
4.1.5 Caracterización de Muestras de Vidrio	123
4.1.6 Medición del Δn en Guías de Onda	126
4.2 Fibra multinúcleo (3 núcleos)	130
4.2.1 Fuerza	130
4.2.2 Temperatura	134
4.2.3 Detección de Impacto	136
4.2.4 Detección de Contacto con Sentido de Dirección	137
4.3 Fibra multinúcleo (2 núcleos)	139
4.3.1 Doblamiento	139
4.3.2 Temperatura	141
Contribuciones, Conclusiones y Recomendaciones	143
Referencias	151
Anexos	165
Anexo A	165
Anexo B	167
Anexo C	169

Anexo D	171
Declaración	175

Índice de figuras

Figura 1. Representación de una fibra monomodo de perfil escalonado.	7
Figura 2. Simulación de una fibra monomodo: Distribución normalizada de la intensidad del campo modal del modo fundamental en (a) 2D y (b) 3D.	12
Figura 3. Representación de una MCF de dos núcleos y sus parámetros de diseño ...	13
Figura 4. Simulación de una MCF de dos núcleos obteniendo los modos normales del sistema: Distribución de la intensidad del campo E del (a) $SP1$, y (b) $SP2$	16
Figura 5. (a) Representación de una MCF de dos núcleos en 3D. (b) Distribución normalizada de la intensidad en función de $LMCF$, vista de sección en el plano y, z de una MCF.	18
Figura 6. Representación de la sección transversal de una MCF con: (a) 3 núcleos y (b) 7 núcleos.	19
Figura 7. Simulación de una MCF de tres núcleos: Distribución normalizada de la intensidad de campo E del (a) $SP1$, (b) $SP2$ y (c) $SP3$	20
Figura 8. Simulación de una MCF de siete núcleos: Distribución normalizada de la intensidad de campo E del (a) $SP1$, (b) $SP2$, (c) $SP3$, (d) $SP4$, (e) $SP5$, (f) $SP6$ y (g) $SP7$	20
Figura 9. Sistema de un sensor de fibra óptica, (a) intrínseco y (b) extrínseco, compuesto por: (1) fuente de luz, (2) circulador/acoplador de fibra, (3) dispositivo de fibra óptica sensible, (4) detector.	22
Figura 10. (a) Representación de un IFPF-E. (b)-(d) Múltiples haces transmitidos y reflejados en el IFPF-E.....	26
Figura 11. Espectros ópticos de la reflectancia de un IFPF-E variando: (a) $Lcav$, y (b) $ncav$	29
Figura 12. (a) Representación de un IFPF con dos cavidades en serie. (b)-(d) Múltiples haces transmitidos y reflejados en dos cavidades del IFPF.	31
Figura 13. Espectro reflejado simulado de un IFPF de dos cavidades.	33
Figura 14. Espectro de Fourier de un IFPF-2C, con las tres componentes en términos de la longitud de camino óptico	34
Figura 15. Espectro reflejado de un (a) IFPF ₁ y (b) IFPF ₂ con LCOs cercanos entre sí. (c) Espectro reflejado de un IFPF-2C en la condición de efecto Vernier.	36
Figura 16. Espectro reflejado de un IFPF-2C cuando $LCOcav2$ disminuye respecto a $LCOcav1$, teniendo una ΔLCO de (a) 20 μm , (b) 35 μm , y (c) 65 μm	37

Figura 17. Comparación del desplazamiento del (a) patrón de interferencia del IFPF _{sen} y (b) la envolvente formada con una cavidad de referencia fija en el IFPF-2C, cuando se modifica la LCO _{sen} tanto del IFPF _{sen} como de la cav _{sen} ; respectivamente.....	38
Figura 18. (a)-(c) Representación del esquema para la excitación de dos supermodos en una MCF con N=2, 3, y 7 núcleos a $\lambda=1550$ nm.	40
Figura 19. (a) Representación de un ISPM basado en MCF ₂ y la propagación de la luz vista 2D sobre su sección lateral. (b) Variación de la potencia en la salida del ISPM para diferentes valores de L _{MCF} a $\lambda=1550$ nm.....	41
Figura 20. Espectro de transmisión de un ISPM con un sistema de N=2 núcleos.....	43
Figura 21. Representación del ISPM con un esquema SMF-MCF-SMF con terminación en reflexión.....	45
Figura 22. Espectros ópticos de un ISPM cuando cambia (a) la L _{MCF} y (b) el índice de refracción de los núcleos.	46
Figura 23. (a) Representación de una rejilla de Bragg inscrita en el núcleo de una SMF. (b) Espectro de reflexión de una FBG.....	49
Figura 24. Diagrama de la metodología de investigación.....	52
Figura 25. Interfaz gráfica del software MODE LUMERICAL con el solucionador FDE.	54
Figura 26. Interfaz gráfica del software MODE LUMERICAL con el solucionador EME.	57
Figura 27. Simulación en MODE LUMERICAL usando EME solver para el modelado de un interferómetro supermodal.	58
Figura 28. (a) Foto de la sección transversal de la MCF ₇ . (b) Representación del interferómetro supermodal en punta: SMF-MCF ₇	59
Figura 29. Análisis de la propagación de la luz, distribución de la energía en los núcleos y espectro óptico simulado (señal transmitida en la condición de $2 \cdot L_{MCF}$) del dispositivo en punta para una L _{MCF} de (a) 5.2 mm y (b) 9.2 mm.	61
Figura 30. (a) Foto de la sección transversal de la MCF ₃ . (b) Representación del dispositivo híbrido en reflexión formado por un interferómetro supermodal y una fibra con rejilla de Bragg conectada con la MCF ₃	62
Figura 31. Espectros reflejados de un ISPM variando la fase respecto a la señal de referencia $P\phi$, y la ubicación del punto Q.	63
Figura 32. Espectros de reflexión individuales de: una FBG con λ_B ubicada en la pendiente del espectro de un ISPM (MCF ₃).	64
Figura 33. (a) Foto de la sección transversal de la MCF ₂ . (b) Representación del dispositivo híbrido en punta basado en un ISPM con rejillas de Bragg inscritas en el núcleo de una MCF ₂	65

Figura 34. Espectros de reflexión de una FBG inscrita en los núcleos de la MCF ₂ de un ISPM con λ_B ubicada en la pendiente del espectro.	65
Figura 35. Proceso de fabricación de los DFOS en punta: (a) Posición de la SMF en la cortadora en un punto de referencia, (b) corte de la SMF, (c) empalme de la SMF con una MCF, (d) colocación de la SMF en el punto de referencia nuevamente, (e) desplazamiento de las fibras empalmadas a una distancia d_L respecto al punto de referencia, y (f) corte de la sección de MCF para tener una punta SMF-MCF con una $L_{MCF}=d_L$	68
Figura 36. Proceso de fabricación del DFOS híbrido en reflexión: (a) Dispositivo en punta basado en una MCF ₃ , (b) empalme del dispositivo en punta con una FBG inscrita en una SMF, y (c) dispositivo final en reflexión.....	69
Figura 37. Proceso de fabricación del DFOS híbrido en punta: (a) Dispositivo en punta basado en una MCF ₂ , (b) empalme del dispositivo en punta con una SMF ₂ , (c) dispositivo en transmisión, (d) Inscripción de la FBG en los núcleos de la MCF ₂ , y (e) dispositivo híbrido en punta.	71
Figura 38. Arreglo experimental de un SFO para la medición de distancia basado en un IFPF-E: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas con ejes X y XYZ; respectivamente, (4) controlador de motores, (5) DFOS.....	73
Figura 39. Arreglo experimental de un SFO para la detección de nanodesplazamiento basado en un IFPF-2C: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas con ejes X y XYZ, respectivamente, (4) controlador de motores, (5) DFOS.....	75
Figura 40. Arreglo experimental de un SFO basado en un IFPF-E para evaluar superficies: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas de con ejes X y XYZ, (4) controlador de motores, (5) DFOS.	77
Figura 41. Arreglo experimental de un SFO basado en IFPF-E para la detección de deflexiones de estructuras de micro-cantiléver funcionalizados:(1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas con ejes X y XYZ, (4) controlador de motores, (5) DFOS.....	79
Figura 42. Arreglo experimental de un SFO para la medición de espesor e índice de refracción simultáneamente: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2) montura con eje XY formada por dos monturas colocadas en vertical y horizontal, (3) montura de desplazamiento mecánicas XYZ, (4) controlador de motores, (5) DFOS.	81

Figura 43. Arreglo experimental de un SFO para la medición del Δn de guías de ondas basado en un IFPF-2C: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2) montura de desplazamiento mecánicas de tres ejes, (3) sujetador magnético para fibra óptica, (4) DFOS.	83
Figura 44. Arreglo experimental de un SFO para la medición de fuerza: (1) Interrogador espectral I-MON USB, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas de tres ejes, (4) Montura de sujeción de fibra óptica con rotación, (5) sujetador de fibra óptica, y (6) DFOS. Sección derecha: Orientación de los núcleos del ISPM.	85
Figura 45. Arreglo experimental de un SFO para la medición de temperatura: (1) interrogador espectral I-MON 512, (2) estructura en puente para sujeción de una fibra óptica en vertical, (3) calibrador-horno en seco, y (4) DFOS.	87
Figura 46. (a) Arreglo experimental del SFO de fuerza para la detección de impacto. (b) Representación de las pruebas de impacto en el SFO.	89
Figura 47. (a) Arreglo experimental del SFO para la detección de una fuerza de contacto. (b) Representación para la prueba de contacto aplicado en distinto sentido.	90
Figura 48. Arreglo experimental de un SFO para la medición de doblamiento: (1) Interrogador espectral Hyperion si255, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas de tres ejes, (4) sujetador de fibra óptica con rotación, (5) base con sujetador de un tubo de acero, y (6) DFOS.	92
Figura 49. Arreglo experimental de un SFO para la medición de temperatura: (1) interrogador espectral Hyperion si255, (2) estructura en arco para sujeción de una fibra óptica en vertical, (3) calibrador-horno en seco, y (4) DFOS.	93
Figura 50. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para la adquisición de la señal del interrogador MicronOptics sm125 y su análisis en el dominio de Fourier.	94
Figura 51. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para la adquisición de la señal del interrogador Hyperion six55 y su análisis en el dominio de Fourier.	97
Figura 52. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para la adquisición de la señal del interrogador Hyperion six55 y su análisis en el dominio óptico.	100
Figura 53. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para el control de un horno de temperatura: FLUKE 9103.	103
Figura 54. Espectros de reflexión de una ISPM en punta y del IFPF-E con $L_{aire} = 1.5$ mm con L_{MCF} (a) 9.2 mm y (b) 5.2 mm.	106
Figura 55. (a) Espectros ópticos reflejados del IFPF-E para diferentes distancias y (b) su análisis en el dominio de Fourier; escala logarítmica.	107
Figura 56. Medición de la longitud del camino óptico con el IFPF-E en función de la distancia: L_{aire}	108

Figura 57. Espectros de Fourier obtenidos de la variación mínima de la distancia; L_{aire} .	109
Figura 58. (a) Espectros de reflexión de referencia del IFPF-2C cuando $LCO_{aire} = LCO_{vidrio}$. (b)-(d) Espectros de reflexión para tres distintos valores de $LCO_{aire} > LCO_{vidrio}$, (e) espectros de Fourier correspondientes a los espectros ópticos de (a)-(d).	111
Figura 59. Espectros ópticos ($I_{vernier}$) obtenidos con las envolventes inferiores para (a) ρ_1 , (b) ρ_2 , y (c) ρ_3 .	113
Figura 60. (a) Espectros ópticos modulados por una señal envolvente (resaltando su envolvente inferior) a desplazamientos de $0.1 \mu m$ inducidos en el SFO cuando $LCO_{aire} = LCO_{vidrio} + \rho_1$. (b) Curva característica del SFO con un ajuste lineal.	114
Figura 61. (a)-(b) Espectros ópticos modulados por una señal envolvente (resaltando su envolvente inferior) a desplazamientos de $0.1 \mu m$ cuando $LCO_{aire} = LCO_{vidrio} + \rho_2$ y $LCO_{aire} = LCO_{vidrio} + \rho_3$, respectivamente. (c)-(d) curva característica del SFO con un ajuste lineal obtenidos de (a) y (b) respectivamente.	115
Figura 62. Patrones de interferencia del IFPF-2C en un rango estrecho de longitudes de onda para desplazamientos de $0.1 \mu m$, y su curva de calibración.	116
Figura 63. Perfil de una superficie con patrón escalonado evaluado con un ISPM en punta a una distancia de (a) $100 \mu m$, (b) $200 \mu m$ y (c) $400 \mu m$.	118
Figura 64. Perfil de una superficie con patrón escalonado evaluado con una SMF en punta a una distancia de $100 \mu m$.	119
Figura 65. Espectros reflejados normalizados obtenidos a desplazamientos de $\delta = 0.1 \mu m$. El recuadro es la curva de caracterización del SFO basado en una cavidad inmersa en PBS para el mecanismo de biodetección.	121
Figura 66. Desplazamiento del patrón de interferencia por la deflexión del microcantiléver cuando se encuentra inmerso en anti-BSA a una concentración de (a) $75 \mu g/ml$ y (b) $300 \mu g/ml$.	122
Figura 67. Espectros de Fourier de la señal óptica obtenida en el punto de referencia (línea naranja) y en la muestra H de vidrio (línea verde).	124
Figura 68. Valor promedio del (a) espesor e (b) índice de refracción de cada una de las muestras analizadas en 10 repeticiones.	125
Figura 69. Espectros ópticos obtenidos de la luz reflejada desde el (a) núcleo de la GO inscrita a $100 \mu m/s$, desde el revestimiento de la GO inscrita a (b) $30 \mu m$ y (c) $40 \mu m$ fuera del núcleo. (d)-(f) Espectros de Fourier de cada uno de los espectros ópticos, respectivamente.	127

Figura 70. Espectros ópticos obtenidos de la luz reflejada desde el (a) núcleo y el (b) revestimiento de la SMF-28; 50 μm fuera del núcleo. (c)-(d) Espectros de Fourier de cada uno de los espectros ópticos, respectivamente.....	129
Figura 71. Espectro reflejado del ISPM en punta basado en una MCF_3 en serie con una FBG.	131
Figura 72. Espectros reflejados del SFO en respuesta a la dirección de la (a) F^+ y (b) F^- aplicados, cuando los núcleos se encuentran a 90° . (c) Curva de calibración del SFO de acuerdo a la dirección de la fuerza aplicada.	133
Figura 73. Relación de la sensibilidad del SFO cuando se aplica la fuerza de acuerdo a la orientación de los núcleos.	134
Figura 74. (a) Espectros reflejados del SFO a cambios de temperatura. (b) Respuesta en longitud de onda del SFO sobre el tiempo. (c) Relación entre la temperatura y el desplazamiento de la λ_B	135
Figura 75. (a)-(c) Variación en el voltaje sobre el tiempo a diferentes valores de energía de impacto. (d) Cambio en el voltaje a diferentes valores de energías de impacto (valor promedio y desviación estándar obtenidos de 10 repeticiones).	137
Figura 76. Variación del voltaje en la detección de una fuerza de contacto distinguiendo el sentido en el que se aplica.	138
Figura 77. Espectros reflejados del SFO sometido a doblamiento cuando los núcleos son orientados a (a) 90° y (c) 270° . (b), (d) Curvas de calibración del SFO relacionando los cambios en la potencia (normalizada) y el doblamiento aplicado de (a) y (c) respectivamente.	139
Figura 78. Relación entre el cambio de la potencia reflejada (normalizada) y el ángulo de doblamiento inducido en la entrada del SFO.	141
Figura 79. Espectros reflejados del SFO a cambios de temperatura. (b) Respuesta en longitud de onda del SFO sobre el tiempo. (c) Relación entre la temperatura y el desplazamiento de la λ_B	142

Índices de tablas

Tabla 1. Parámetros de una fibra monomodo para el análisis numérico	11
Tabla 2. Parámetros de una MCF de N=2 núcleos para el análisis numérico.....	16
Tabla 3. Sensores IFPFs basados en el efecto Vernier para la medición de parámetros físicos y químicos.....	39
Tabla 4. Sensores de fibra óptica basados en FBGs para la medición de parámetros físicos.	51
Tabla 5. Datos del espesor e índice de refracción obtenidos con su desviación estándar de cada una de las muestras	125
Tabla 6. Índice de refracción relativo obtenido para cada una de las guías de onda inscritas a diferentes velocidades de barrido del láser.	128

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La investigación respecto al desarrollo de sensores de fibra óptica (SFO), para la medición de diversos parámetros es muy activa en estos momentos. Uno de los aspectos que mayor interés despierta es la generación de nuevas estructuras, con mejor sensibilidad, mayor rango dinámico y con mejor resolución. Entre los más sensibles, para medición de magnitudes físicas, se encuentran los sensores basados en la interferencia óptica. Diversos esquemas interferométricos han sido propuestos y desarrollados basándose en el uso de fibras ópticas convencionales monomodo y multimodo. No obstante, también se pueden encontrar interferómetros basados en fibras óptica especiales. Algunos de estos SFO, a diferencia de aquellos formados por las fibras convencionales, presentan en su estructura interna dos o más núcleos distribuidos de forma simétrica/asimétrica respecto al eje central de la fibra óptica. A este tipo de fibra se le conoce como multinúcleo (MCF: *Multicore fiber*) y a través de su arreglo interno se pueden obtener propiedades ópticas que no son alcanzadas con las fibras ópticas convencionales. En las MCF la distribución de la luz genera diferentes patrones dependiendo de condiciones iniciales de la luz incidente, y que en la literatura son conocidas también como supermodos. Estos modos especiales en las MCF se han aprovechado para el desarrollo de dispositivos novedosos sensibles a las perturbaciones externas, ya que en estas estructuras toma lugar el fenómeno de interferencia de supermodos. En la literatura se pueden encontrar varios ejemplos de sensores basados en MCF, que han demostrado propiedades ideales para la detección de temperatura (Amorebieta et al., 2019), curvatura (Amorebieta et al., 2021; Arrizabalaga et al., 2020; Villatoro et al., 2020), y vibración (Amorebieta et al., 2020; Villatoro et al., 2017). Hasta ahora estos dispositivos presentan mejor respuesta que los sensores basados en fibras de cristal fotónico (Gong et al., 2013) o fibras con rejillas de Bragg (Di Palma et al., 2021).

Este proyecto de investigación aprovecha la experiencia acumulada en el Grupo de Sensores Ópticos y Microdispositivos (GSOM) del CIO, ya que durante los 10 últimos años la investigación se ha centrado en el desarrollo de dispositivos de fibra óptica en donde es posible reproducir de manera controlada el fenómeno de la interferencia. Estos dispositivos han sido propuestos como sensores de múltiples parámetros (Hernández-Romano et al., 2016; Monzón-Hernández et al., 2009; Monzon-Hernandez et al., 2011; Salceda-Delgado et al., 1974; Starodumov et al., 1997), principalmente, para la detección de magnitudes físicas. Para el desarrollo del proyecto, se ha aprovechado la experiencia del grupo de investigación en el análisis teórico de estos dispositivos usando software comercial para la simulación. El laboratorio del grupo cuenta con los equipos y materiales necesarios para la fabricación de los dispositivos interferométricos. Por otro lado, en el proyecto se cuenta con la co-asesoría del Dr. Joel Villatoro, *Profesor Investigador Ikerbasque* adscrito a la Universidad del País Vasco, quien ha colaborado con el GSOM durante 15 años y que tiene una amplia experiencia en el desarrollo de sensores de fibra óptica (Jha et al., 2009; Villatoro et al., 2007, 2009, 2016). Además, es pionero en la investigación de las MCF para su uso en el desarrollo de interferómetros para la medición de parámetros físicos. El laboratorio del Grupo de Fotónica Aplicada en la Universidad de País Vasco, al que pertenece el Dr. Villatoro, es uno de los más completos para diseñar y fabricar interferómetros basados en fibras ópticas especiales.

1.2 Definición del Problema

La tecnología de las fibras ópticas, en combinación con fenómenos físicos como la interferencia, está tomando un rol cada vez más importante en el desarrollo de sensores para la medición de múltiples parámetros. Bajo esta premisa, la investigación de este proyecto doctoral va dirigida al desarrollo de estructuras de fibra óptica como plataformas en las que sea posible generar la interferencia óptica de manera controlada para la detección selectiva de perturbaciones externas. Aunque existen en el mercado equipos eficientes para analizar el espectro de longitudes de onda de la luz transmitida por una fibra óptica, estos son de propósito muy general. El desarrollo de esquemas de medición optimizados, dirigidos a aplicaciones puntuales, pueden resultar más eficientes y atractivos. En este proyecto, además de la construcción de los dispositivos de fibra óptica, se trabajó en el desarrollo de la instrumentación de sistemas con los

cuales es posible interrogar el fenómeno de interferencia para la medición de múltiples parámetros en tiempo real.

1.3 Justificación

La generación controlada de fenómenos ópticos, como la interferencia, en el núcleo de una fibra óptica abrió una ventana de oportunidad para el desarrollo de nuevos sensores altamente eficientes para la medición de parámetros físicos. Los sensores de fibra óptica resultan ser una plataforma única para mediciones in situ, en tiempo real, en ambientes poco accesibles y con buena sensibilidad y resolución. Aunque en la actualidad el desarrollo de estos dispositivos está bastante avanzado, aún existe la posibilidad de contribuir al campo mediante el desarrollo de estructuras nuevas y con mejores características que los esquemas reportados hasta el momento. Pero donde se tiene una oportunidad mayor es en la instrumentación de los sensores de fibra óptica para tener sistemas de medición orientadas a aplicaciones puntuales y que sean de fácil manejo para usuarios poco experimentados. En este proyecto se trabajó para desarrollar sensores especializados en la medición de varias magnitudes física, a través de la detección de los cambios producidos en dos magnitudes principalmente, la distancia entre la fibra óptica y el objeto bajo estudio, así como el doblamiento (deformación física) de un dispositivo de fibra óptica.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Diseñar dispositivos de fibra óptica sensibles a cambios en el medio externo basados en el fenómeno de la interferencia óptica, y proponer la instrumentación del sistema de interrogación adecuado para su uso en aplicaciones puntuales.

1.4.2 Específicos

- a) Simular la transmisión de la luz en diferentes tipos de fibra óptica.
- b) Simular el fenómeno de interferencia en fibra óptica.
- c) Desarrollar una metodología para la fabricación de dispositivos de fibra óptica en los que se produzca la interferencia.
- d) Diseñar y fabricar sensores de fibra óptica para el monitoreo de magnitudes físicas.
- e) Evaluar el desempeño de los sensores desarrollados en muestras sintéticas a nivel laboratorio.
- f) Instrumentar sistemas de detección basados en fibra óptica para su aplicación en el monitoreo de múltiples parámetros en tiempo real.

1.5 Hipótesis

Combinar el fenómeno óptico altamente sensible, como la interferencia, con las propiedades únicas de las fibras ópticas permiten desarrollar sensores de fibra óptica capaces de medir cambios de la variable a detectar, con una resolución en el orden requerido para aplicaciones industriales o científicas. Con una adecuada instrumentación para la interrogación de los dispositivos de fibra óptica se puede disponer de sistemas accesibles, con un entorno amigable al usuario, y una medición eficiente y rápida.

2 Estado del Arte y Marco Teórico

Las tecnologías modernas de fabricación han permitido generar estructuras con resolución micrométrica potencialmente útiles en diversas áreas de la óptica. Uno de estos desarrollos que ha sido ampliamente explotado, desde su primera aproximación en 1970, son las fibras ópticas ya que han sido fundamentales en los grandes avances logrados en las comunicaciones ópticas, así como en el desarrollo de nuevos tipos de láseres e instrumentos ópticos y la revolución en el campo de los sensores (T. H. Kim, 2023).

Las fibras ópticas de sílice (SiO_2) son guías de ondas cilíndricas concebidas para mejorar las comunicaciones (Ghatak & Thyagarajan, 1998), constituida por dos regiones internas. La región central interna es conocida como núcleo y está rodeada por el revestimiento. Ambas regiones garantizan las condiciones para el confinamiento y propagación eficiente de la luz. En una fibra óptica estándar el núcleo y el revestimiento son cilindros sólidos y concéntricos. Entre ambas regiones hay una diferencia en el índice de refracción (RI: *refractive index*), siendo el índice de refracción del núcleo (n_o) mayor al del revestimiento (n_r). En las fibras ópticas de SiO_2 , para lograr esta diferencia en los índices de refracción se usan dopantes como por ejemplo el óxido de boro (B_2O_3) y fluor (F), para disminuir el RI del revestimiento, o el dióxido de germanio (GeO_2) para aumentar el RI del núcleo. La diferencia de RI del núcleo y el revestimiento se define como $\Delta = \frac{n_o^2 - n_r^2}{2n_o^2} \approx \frac{n_o - n_r}{n_o}$. Otro de los parámetros que caracteriza las fibras ópticas es la frecuencia normalizada V ,

$$V = k_0 \alpha \sqrt{n_o^2 - n_r^2} \quad (1)$$

Que permite determinar el número de modos soportados por el núcleo. Para una fibra óptica diseñada con $V < 2.405$, se soporta un único modo y son las conocidas como fibra monomodo (SMF: *Single mode fiber*). Por lo tanto, para un $V \geq 2.405$ la fibra óptica será considerada como multimodal. $k_0 = 2\pi/\lambda$ es el número de onda, λ es

la longitud de onda, y α es el radio del núcleo. Cuando el diámetro del núcleo es del orden de la longitud de onda de la luz que propaga, el efecto de difracción se disminuye y la luz está confinada espacialmente sobre la trayectoria del eje. Estas fibras ópticas han sido un pilar para los sistemas de comunicaciones, donde la transmisión de información se realiza a altas velocidades sobre distancias largas, con pérdidas de ~ 0.2 dB/Km y con anchos de banda de varios THz; comparado a las comunicaciones por cable donde los anchos de banda son de GHz y son altamente susceptibles a la interferencia del medio externo (Kumar & Deen, 2014).

Por otro lado, existe otro tipo de fibras ópticas, catalogadas como especiales ya que en algunas de ellas la región del núcleo está conformada por múltiples cilindros, sólidos o huecos, en arreglos con geometría 2D (H. Liu et al., 2023), o bien microestructuras con figuras geométricas particulares (Xue et al., 2023). Las estructuras internas de estas fibras ópticas dan lugar a características especiales en la propagación y distribución de la luz. Estas fibras ópticas han sido desarrolladas con el fin de mejorar, entre otros aspectos, la transmisión de datos alcanzada con las fibras ópticas convencionales. Otras de las llamadas fibras óptica especiales son las fibras ópticas multinúcleo, las cuales están conformadas por dos o más núcleos sólidos individuales incorporados y distribuidos en torno al eje de la fibra óptica. Se puede considerar que estas fibras ópticas son un conjunto de SMF en un mismo revestimiento. La separación entre los centros de cada uno de los núcleos influye en las características de propagación de la luz.

En este trabajo, el estudio se centró principalmente en las MCF con núcleos fuertemente acoplados en las que la separación entre sus centros es menor a $30 \mu\text{m}$ hasta una distancia igual al diámetro de los núcleos. En adelante se referirá a las fibras multinúcleo con núcleos fuertemente acoplados simplemente como MCF. Con el objetivo de proveer el marco de referencia teórico necesario para el entendimiento de los subsecuentes capítulos, dedicamos este segundo capítulo a describir los fundamentos teóricos de las MCF. Para entender más a fondo la propagación de la luz en una MCF, primero partiremos del estudio de la propagación de la luz en una SMF para dar paso al estudio del acoplamiento de la luz que ocurre en una fibra óptica de varios núcleos. También se discutirán las condiciones necesarias para aprovechar las características de una MCF en el desarrollo de dispositivos interferométricos dirigidos a la medición de diferentes parámetros físicos. En este sentido, la interferencia también será un tema discutido en este capítulo, pero centrándose en el interferómetro supermodal y la estructura Fabry-Perot de fibra óptica.

2.1 Fibra Óptica Monomodo

El análisis de la propagación de la luz en una fibra óptica desde el punto de vista de la teoría electromagnética, y no de trazado de rayos, resulta adecuada para entender sus propiedades modales. Como inicio, considérese una fibra óptica con un núcleo de radio α y un perfil escalón en los índices de refracción del núcleo (n_0) y revestimiento (n_r), como se muestra en la Fig. 1.

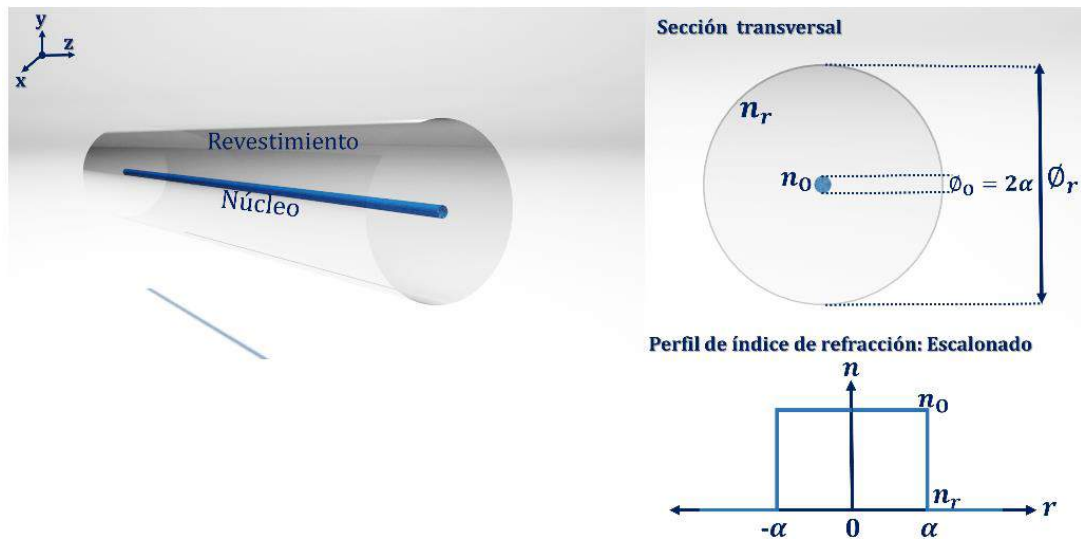


Figura 1. Representación de una fibra monomodo de perfil escalonado.

El perfil escalón del RI se describe como:

$$\begin{aligned} n(r) &= n_0 \quad 0 < r \leq a \quad \text{núcleo} \\ n(r) &= n_r \quad r > a \quad \text{revestimiento} \end{aligned} \quad (2)$$

Las fibras ópticas con un $\Delta \ll 1$ son conocidas como fibras de guiado débil. Una fibra monomodo convencional, para las comunicaciones, tiene un valor de $\Delta \approx 0.003$. En este sentido, para el análisis de la propagación de la luz en una fibra óptica se puede usar la aproximación de onda escalar o también conocido como aproximación de

guiado débil. En esta aproximación, las componentes del campo eléctrico E satisfacen la ecuación de onda escalar derivada de las ecuaciones de Maxwell (Agrawal, 2012):

$$\nabla^2 E - \mu_0 \varepsilon_0 n^2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

La propagación de la onda ocurre a lo largo del eje z , y se confina en el plano formado por las direcciones X y Y . Aprovechando la geometría de la fibra óptica es conveniente hacer el análisis en coordenadas cilíndricas. Considerando únicamente las coordenadas transversales (r, ϕ) , el campo eléctrico se puede definir:

$$E(r, \phi, z, t) = E_z(r, \phi) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (4)$$

Donde ω es la frecuencia angular y β es la constante de propagación que describe las características de propagación de la onda. Sustituyendo la Ec. 4, en la Ec. 3 el resultado se puede expresar como:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + [k_0^2 n^2(r) - \beta^2] E_0 = 0 \quad (5)$$

La expresión anterior es conocida como la ecuación de Helmholtz, y considerando el método de separación de variables donde $E_z(r, \phi) = R(r)\Phi(\phi)$, se obtiene:

$$\frac{r^2}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + r^2 [n^2(r) k_0^2 - \beta^2] = -\frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} = l^2 \quad (6)$$

Siendo l una constante ($l = 0, 1, 2, \dots$). Mientras la parte radial de Ec. 6 es descrita por:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + \{[n^2(r) k_0^2 - \beta^2] r^2 - l^2\} R = 0 \quad (7)$$

Para la solución de la Ec.7, existen dos casos particulares de β^2 . Para fines prácticos, nos enfocaremos únicamente en el caso donde $k_0^2 n_r^2 < \beta^2 < k_0^2 n_0^2$, rango en el cual $R(r)$, que representa los campos, oscila en el núcleo y decae en el revestimiento, siendo β valores discretos, y a los que se les conoce como modos guiados. Esto lleva a que, para un valor de l existirán varios modos guiados siendo soluciones a la Ec. 3. Considerando Ec. 2 para $n^2(r)$ en la Ec. 7 se obtiene

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + \left(U^2 \frac{r^2}{a^2} - l^2 \right) R = 0 \quad 0 < r \leq a \quad (8)$$

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} - \left(W^2 \frac{r^2}{a^2} - l^2 \right) R = 0 \quad r > a \quad (9)$$

Siendo $U = a(k_0^2 n_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}$ y $W = a(\beta^2 - k_0^2 n_r^2)^{\frac{1}{2}}$ con valores reales para los modos guiados, donde el parámetro normalizado $V = (U^2 + W^2)^{\frac{1}{2}}$ es definido en la Ec. 1. Las Ec. 8 y 9 representan las ecuaciones de Bessel en su forma estándar (Ghatak & Thyagarajan, 1998). Cuyas soluciones para $x = U r/a$ y $\hat{x} = W r/a$ son:

$$R(r) = C_1 J_l(x) + C_2 Y_l(x) \quad r < a \quad (10)$$

$$R(r) = D_1 K_l(\hat{x}) + D_2 I_l(\hat{x}) \quad r \geq a \quad (11)$$

Donde $J_l(x)$ y $Y_l(x)$ representan las soluciones radiales, y son funciones ordinarias de Bessel de primer orden y segundo orden. Mientras que $K_l(\hat{x})$ y $I_l(\hat{x})$ son funciones modificadas de Bessel. De la Ec. 10 se desestima $Y_l(x)$ ya que tiende a $-\infty$ conforme $r \rightarrow 0$, y de Ec. 11 se desestima $I_l(\hat{x})$ que tiende a infinito conforme $r \rightarrow \infty$.

Considerando que el RI es finito se prueba la continuidad de $R(r)$ y dR/dr en la interfaz núcleo-revestimiento; por lo tanto, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$C_1 J_l(U) = D_1 K_l(W) \quad (12)$$

$$C_1 U J'_l(U) = D_1 W K'_l(W) \quad (13)$$

Dividiendo la Ec. 13 entre la Ec. 12, se obtiene la ecuación de valor propio:

$$U \frac{J'_l(U)}{J_l(U)} = W \frac{K'_l(W)}{K_l(W)} \quad (14)$$

De la Ec. 14, la constante de propagación β es un parámetro que no se conoce. La solución es obtenida de tal forma que se evita la diferenciación. Aplicando las propiedades adecuadas, la Ec. 14 puede expresarse como:

$$U \frac{J_{l-1}(U)}{J_l(U)} = -W \frac{K_{l-1}(W)}{K_l(W)} \quad (15)$$

Con la solución de la Ec. 15, se obtiene β en el intervalo de $[k_0 n_r, k_0 n_0]$. Pero es conveniente definir la constante de propagación de forma normalizada, siendo:

$$b = \frac{\beta^2 / k_0^2 - n_r^2}{n_0^2 - n_r^2} \quad (16)$$

La solución de la Ec. 15, da curvas universales conocidas como dispersión, las cuales describen la dependencia de b , esto considerando los parámetros de diseño expresados por el parámetro V . Las curvas se grafican en función de b , la constante de propagación normalizada considerando tanto el lado izquierdo y derecho de la Ec. 15. De esta manera la constante de propagación normalizada b , del modo soportado por una fibra óptica, corresponde al punto de intersección de las curvas graficadas. Cuando únicamente existe una intersección, la fibra es conocida como monomodo.

Cabe mencionar que los modos polarizados linealmente son establecidos como LP_{lm} los cuales bajo la aproximación de guiado débil corresponde ya sea a un modo polarizado- y o polarizado- x . La interpretación física de l y m se establece sobre el patrón de intensidad del modo. Siendo $m \geq 1$, con valores enteros, el número de los máximos de intensidad que ocurren sobre el radio. Mientras que el valor de l es igual a la mitad del número de máximos azimutal en el patrón de intensidad (H. Liu et al., 2023). El modo soportado por una fibra monomodo es el fundamental LP_{01} en una

estructura de perfil escalonado. En este caso el modo LP_{01} presenta una distribución de su intensidad como un máximo sobre el eje de la fibra óptica, es decir, en $r = 0$, y sin variación azimutal.

Hoy en día, existen herramientas computacionales, simuladores, especializadas en fibra óptica que son una alternativa para la solución de los modos soportados en dicha fibra óptica. Además del análisis de una fibra óptica estándar, un simulador brinda la oportunidad de analizar estructuras complejas. Estos tipos de software aplican métodos numéricos ya sea de diferencias finitas o elementos finitos (Chiang, 1994). Ambos métodos exigen la división en subregiones de la sección transversal de la fibra óptica, y las ecuaciones de Maxwell son formuladas como un problema de valor propio. Con los parámetros de la Tabla 1, se realiza una simulación de una fibra monomodo con el software *LUMERICAL* para una $\lambda=1550$ nm. En la Fig. 2 se muestra la sección transversal de una fibra monomodo y la distribución del campo modal del modo fundamental. De este análisis se obtiene, para el modo fundamental, un índice efectivo (n_{ef}) igual a 1.4476 del cual se puede obtener la constante de propagación mediante la relación:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{ef} \quad (17)$$

Tabla 1. Parámetros de una fibra monomodo para el análisis numérico

	Φ_r (μm)	Φ_0 (μm)	n_r	n_0	λ (nm)
SMF	125	9	1.4447	1.4504	1550

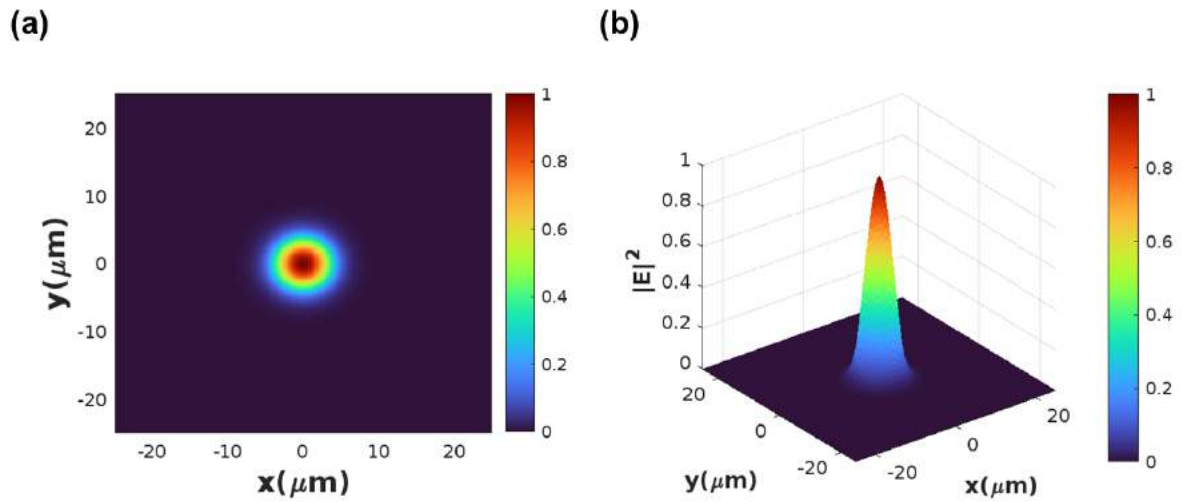


Figura 2. Simulación de una fibra monomodo: Distribución normalizada de la intensidad del campo modal del modo fundamental en (a) 2D y (b) 3D.

2.2 Fibra Multinúcleo: Núcleos Fuertemente Acoplados

Es indispensable entender las características de propagación que nos permitan apreciar el potencial de las MCF, para su aplicación en el desarrollo de dispositivos ópticos, tales como los sensores. Aquí nos limitaremos únicamente al estudio de las MCF fuertemente acopladas. Las MCF poseen en su estructura interna un arreglo de dos o más canales monomodales. Los núcleos tienen geometrías y características idénticas que permiten soportar la propagación de un único modo de forma individual, con una constante de propagación β_0 . Esto lleva a considerar un diámetro de los núcleos (\varnothing_0) menor a $10 \mu m$ en su estructura sólida con un índice de refracción $n_0 > n_r$. Del número total de núcleos (N) uno de ellos se encuentra posicionado en el centro de la estructura del revestimiento con un diámetro (\varnothing_0) de $125 \mu m$. Los núcleos restantes, $N - 1$, se distribuyen alrededor del núcleo central ya sea de forma simétrica, o bien asimétrica. La representación de una MCF con las características internas y una distribución simple de dos núcleos puede verse en la Fig. 3. La separación (Λ), de un núcleo a otro, es un parámetro que se debe considerar pues determina cuando el

fenómeno de acoplamiento de modos puede ocurrir, es decir, cuando Λ es $< 30 \mu m$ (Saitoh, 2022).

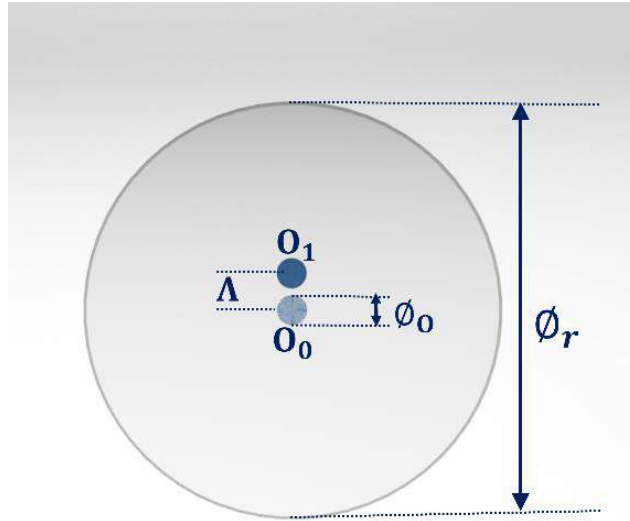


Figura 3. Representación de una MCF de dos núcleos y sus parámetros de diseño

2.2.1 Sistema de $N = 2$ Núcleos

2.2.1.1 Acoplamiento de Modos

La teoría de modos acoplados es una aproximación simple que permite describir la interacción de la propagación de la onda electromagnética en un arreglo de núcleos cercanos entre sí, donde el campo del modo (f) de un núcleo (j) converge lentamente hacia el campo del (de los) núcleo(s) vecino (k), esto se describe por (Saitoh, 2022):

$$\frac{da_f^{(j)}}{dz} + j\beta_f^{(j)}a_f^{(j)} = i \sum_{k \neq j} C^{(j)(k)} a_f^{(k)} \quad (18)$$

Para entender el acoplamiento de modos, partiremos de una estructura MCF simple. Considerando dos núcleos (O_0 y O_1) idénticos, monomodales, cercanos entre sí y donde O_0 se encuentra en el centro, véase la sección transversal en la Fig. 3. De la Ec. 18, se obtiene dos ecuaciones que describen al sistema:

$$\begin{aligned} \frac{da_f^{(0)}}{dz} + i\beta_f^{(0)}a_f^{(0)} &= iC^{(0)(1)}a_f^{(1)} \\ \frac{da_f^{(1)}}{dz} + i\beta_f^{(1)}a_f^{(1)} &= iC^{(1)(0)}a_f^{(0)} \end{aligned} \quad (19)$$

Donde $a_f^{(0)}$ y $a_f^{(1)}$ son las amplitudes de los modos individuales con constantes de propagación $\beta_f^{(0)}$ y $\beta_f^{(1)}$, para los núcleos O_0 y O_1 , respectivamente. Mientras que $C^{(0)(1)}$ y $C^{(1)(0)}$ denota los coeficientes de acoplamiento, siendo $C^{(0)(1)} = C^{(1)(0)}$ independiente de z . El sistema de ecuaciones puede escribirse en forma de matricial:

$$\frac{d}{dz} \mathbf{A} = -i\bar{\mathbf{M}}\mathbf{A} \quad (20)$$

Siendo

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \bar{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} \beta_f^{(0)} & C^{(0)(1)} \\ C^{(0)(1)} & \beta_f^{(1)} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Un **modo normal** (acoplado) satisface las condiciones de frontera del sistema formado por los núcleos, y una manera de encontrarlo es diagonalizando la matriz de acoplamiento $\bar{\mathbf{M}}$ por una matriz unitaria tal que $Q^{-1}\bar{\mathbf{M}}Q = \mathbf{B}$, siendo la matriz diagonal:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_{s_1} & 0 \\ 0 & \beta_{s_2} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Donde β_{s_1} y β_{s_2} son las constantes de propagación de los modos acoplados que surgen de la superposición de los modos individuales. Bajo este entendido, estos modos acoplados son también conocidos como **supermodos** (SP). C , el coeficiente de acoplamiento, es un término que mide la fuerza de interacción entre los dos núcleos. Bajo la aproximación de guiado débil, el coeficiente de acoplamiento en forma general es definido como (Feit & Fleck, 1981):

$$C = \sqrt{\frac{n_{0,1}^2 - n_r^2}{n_{0,1}^2}} * \frac{1}{a} * \frac{U^2}{V^3} * \frac{K_0(W(\Lambda/r))}{K_1^2(W)} \quad (23)$$

Después de obtener el coeficiente de acoplamiento, los modos normales pueden ser solucionados como modos únicos. Las constantes de propagación de los supermodos también pueden ser obtenidos numéricamente como la solución de un problema de valor exacto en el sistema de acoplamiento. Conociendo ambas constantes de propagación, el coeficiente de acoplamiento puede ser expresado también como (Shou Huang & Chang, 1990):

$$C = \frac{1}{2}(\beta_{s_1} - \beta_{s_2}) = \frac{\pi(n_{s_1} - n_{s_2})}{\lambda} \quad (24)$$

Donde n_{s_1} y n_{s_2} son los índices efectivos de SP_1 y SP_2 . En la Fig. 4, se muestra la simulación computacional de una MCF con dos núcleos acoplados donde dos supermodos son excitados. Para este análisis se toman los parámetros de diseño de la Tabla 2. Cada supermodo presenta una distribución de la intensidad de su campo eléctrico que surgen de las condiciones del acoplamiento entre los modos individuales. Los índices efectivos, de SP_1 y SP_2 , calculados son 1.447997 y 1.447845, respectivamente, y cuyas constantes de propagación pueden ser obtenidas de la relación de la Ec. 17.

Tabla 2. Parámetros de una MCF de $N=2$ núcleos para el análisis numérico

	Φ_r (μm)	$\Phi_{O_{0,1}}$ (μm)	n_r	$n_{O_{0,1}}$	λ (nm)	Λ (μm)
MCF ₂	125	9	1.444	1.451	1550	12

El índice efectivo de los supermodos es un parámetro que describe las características del medio de propagación. En este caso en la MCF, este parámetro depende de los índices de refracción del revestimiento y los núcleos, el tamaño y la separación de ambos núcleos, así como de la longitud de onda de excitación. De acuerdo a la Ec. 24, un cambio en las características de la MCF que produzca un cambio en el índice de refracción efectivo de uno o de los dos SP, inducirá un cambio en C . En el Anexo A, se puede ver el análisis del coeficiente de acoplamiento para el diseño de la MCF con los valores de la Tabla 2, evaluando a diferentes valores de λ y de Λ . De este análisis se aprecia que conforme la separación de los núcleos aumenta, C disminuye su valor. Por otro lado, C es mayor para longitudes de onda largas.

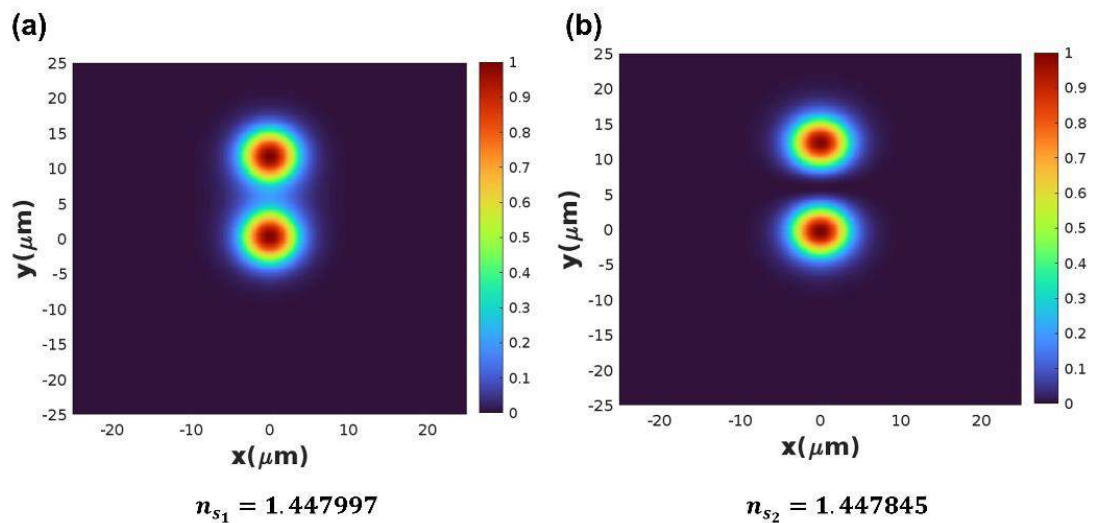


Figura 4. Simulación de una MCF de dos núcleos obteniendo los modos normales del sistema: Distribución de la intensidad del campo E del (a) SP_1 , y (b) SP_2 .

2.2.1.2 Transferencia de la Energía: Abatimiento de Supermodos

Consideremos una MCF de dos núcleos con longitud L_{MCF} , tal como se muestra en la Fig. 5 (a), donde un haz incide en el núcleo central O_0 con una potencia, $P(z)$ en $z = 0$. La energía inicial se transfiere totalmente de un núcleo al otro después de propagarse en la dirección z a la distancia determinada por el coeficiente de acoplamiento. Esta transferencia ocurre de forma periódica cuando los modos individuales cumplen con una coincidencia de fase, $\phi_f^{(0)} = \phi_f^{(1)}$, y por tanto, la diferencia de fase descrita por (McIntyre & Snyder, 1973)

$$\Delta\phi_f = \phi_f^{(0)} - \phi_f^{(1)} \quad (25)$$

Es $\Delta\phi_f = 0$. Al simular la propagación de la luz en una MCF con una $L_{MCF} = 10$ mm y con los mismos valores de la Tabla 2, se aprecia en la Fig. 5 (b) dicha transferencia periódica a lo largo de la trayectoria de $L_{MCF}(z)$. La cantidad máxima de energía se encuentra concentrada en la región del núcleo central, cada vez que z es igual a:

$$z = 0, \frac{\pi}{C}, \frac{2\pi}{C} \dots = m \frac{\pi}{C}; \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (26)$$

Mientras que la máxima transferencia de energía al segundo núcleo (ver Fig. 5 (b)) ubicado en $y = \Lambda$, ocurre cuando:

$$z = \frac{\pi}{2C}, \frac{3\pi}{2C}, \frac{5\pi}{2C} \dots = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{C}; \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (27)$$

La máxima transferencia de energía se puede definir también como resultado del abatimiento de los supermodos simétricos/asimétricos, considerando que $\beta_{s_1} \neq \beta_{s_2}$. El abatimiento se genera cuando la diferencia de fase ($\Delta\phi_{SP}$) inicial de los supermodos es

reconstruida a una determinada longitud de L_{MCF} . La longitud a la que ocurre esta condición se conoce como la longitud de abatimiento (L_B). Por lo tanto, la longitud de acoplamiento (L_C) es igual a la mitad de la longitud de abatimiento de los supermodos (Huang, 1994), y se puede expresar como

$$L_C = \frac{L_B}{2} = \frac{\pi}{\beta_{s_1} - \beta_{s_2}} = \frac{\lambda}{2(n_{s_1} - n_{s_2})} \quad (28)$$

Siendo la potencia inicial, P_i , que entra en el núcleo central en $z = 0$, entonces a lo largo de $L_{MCF}(z)$, la potencia en los núcleos será:

$$\begin{aligned} P_0(z) &= P_i \cos^2(Cz) \\ P_1(z) &= P_i \sin^2(Cz) \end{aligned} \quad (29)$$

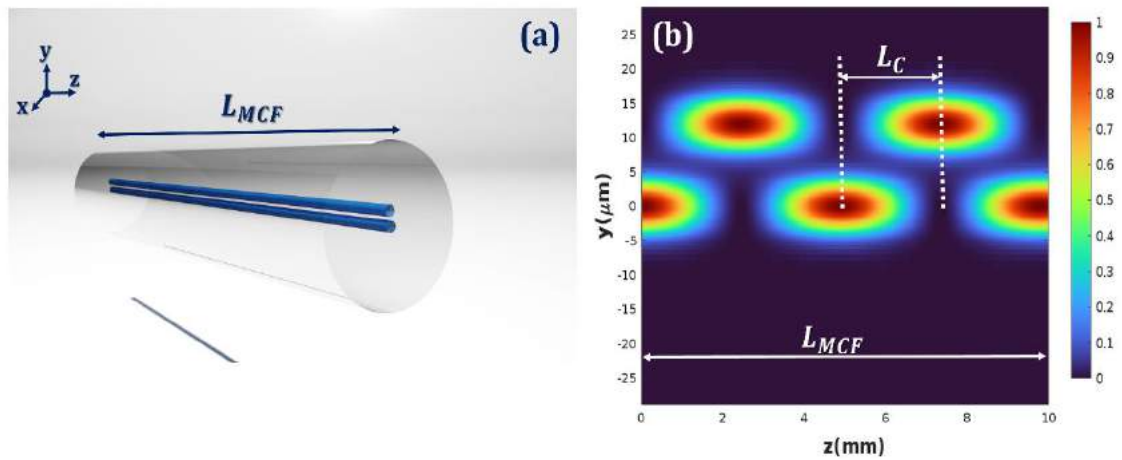


Figura 5. (a) Representación de una MCF de dos núcleos en 3D. (b) Distribución normalizada de la intensidad en función de L_{MCF} , vista de sección en el plano y, z de una MCF.

2.2.2 Sistema con $N > 2$ Núcleos

Para una MCF con $N > 2$ núcleos iguales, y donde $N - 1$ núcleos se encuentran distribuidos alrededor de un núcleo central, separados a un determinado Λ , el análisis de la sección anterior, de los supermodos y la transferencia de la energía en un sistema de $N = 2$ núcleos, es válido también para este tipo de sistemas. Considérese una MCF con los casos particulares de $N = 3$ y $N = 7$, véase en la Fig. 6 una representación de estos sistemas.

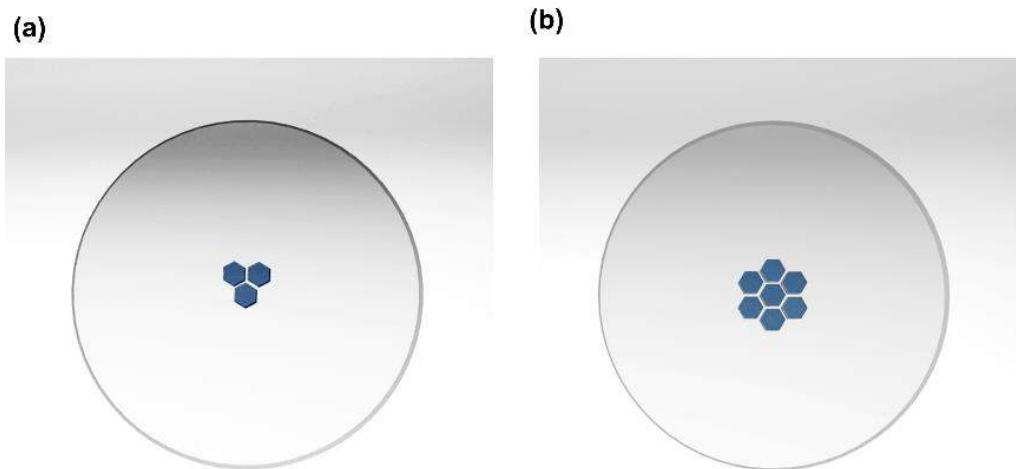


Figura 6. Representación de la sección transversal de una MCF con: (a) 3 núcleos y (b) 7 núcleos.

Al simular el sistema de $N=3$ núcleos con los valores de los parámetros de diseño de la Tabla 2 pero con una Λ de $11 \mu\text{m}$, el número de supermodos excitados corresponde al número de núcleos totales. En la Fig. 7, se presentan los tres supermodos obtenidos en una MCF con $N = 3$ núcleos, y de los cuales SP_1 y SP_2 son los únicos dos modos que tienen fuerte intensidad en el núcleo central. Independiente de los N -núcleos individuales, la ecuación que describe el acoplamiento, de los modos individuales, se reduce a un sistema de dos ecuaciones. Esta simplificación se hace ya que de los posibles N supermodos excitados en la MCF, únicamente dos de estos modos tienen en su distribución del campo modal la mayor energía concentrada en la región del núcleo central (Snyder, 1972).

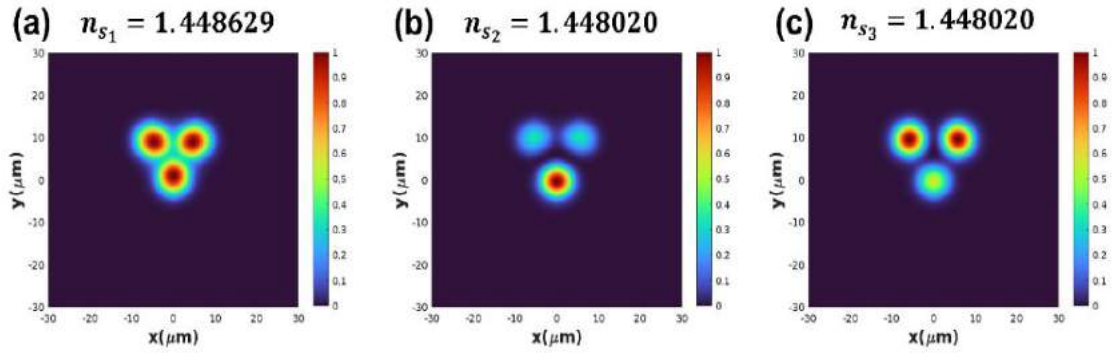


Figura 7. Simulación de una MCF de tres núcleos: Distribución normalizada de la intensidad de campo E del (a) SP_1 , (b) SP_2 y (c) SP_3 .

En la simulación de una MCF con $N=7$ núcleos, vista en la Fig. 8, con los valores de la Tabla 2 con una Λ de $11.5 \mu\text{m}$, se aprecia un total de siete supermodos excitados. De este conjunto, únicamente los modos SP_1 y SP_6 tienen intensidad distinta de cero en el núcleo central. En los sistemas $N>2$ núcleos, la máxima transferencia de energía acontece por la presencia de estos dos supermodos, considerando que $\beta_{s_1} \neq \beta_{s_2}$, que de acuerdo a la longitud de acoplamiento de la Ec. 28 la energía concentrada en el núcleo central se transfiere proporcionalmente entre los $N-1$ núcleos restantes del sistema.

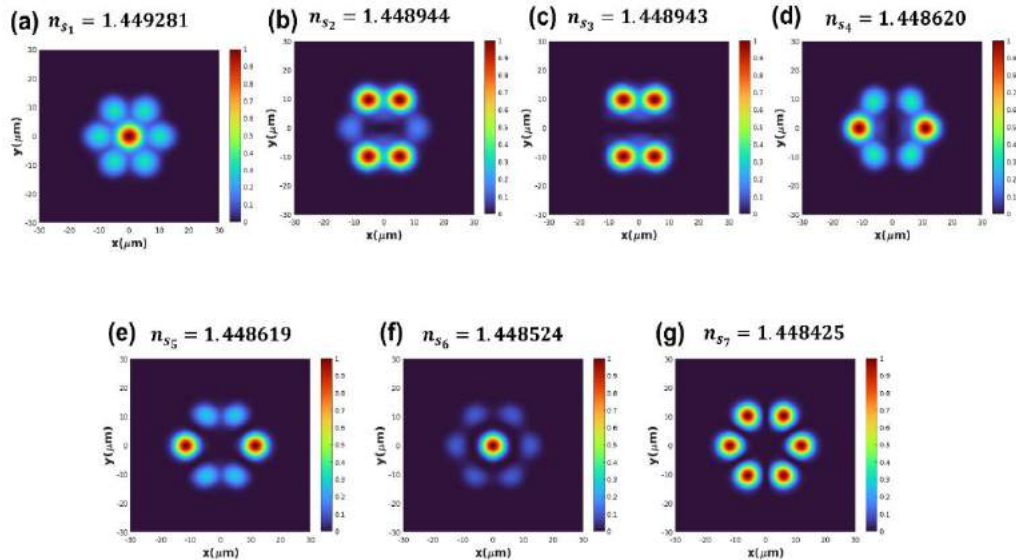


Figura 8. Simulación de una MCF de siete núcleos: Distribución normalizada de la intensidad de campo E del (a) SP_1 , (b) SP_2 , (c) SP_3 , (d) SP_4 , (e) SP_5 , (f) SP_6 y (g) SP_7 .

2.3 Sensores de Fibra Óptica

Las investigaciones realizadas respecto de las tecnologías de las fibras ópticas se han enfocado también en el desarrollo de sensores, los cuales se han posicionado como un referente para la medición de algunos parámetros físicos, químicos y biológicos. Las características de las fibras ópticas permiten disponer de un sistema de medición a través de dispositivos micrométricos de bajo costo, ligeros, inmunes a la interferencia electromagnética del medio externo, operados remotamente, y fáciles de incorporar en ambientes poco accesibles (Di Palma et al., 2021; Y. Zhao, Lin, et al., 2023; W. Zhu et al., 2017). Un sensor de fibra óptica (SFO) es un sistema que registra los cambios en la señal óptica de acuerdo al evento/cambio que ocurre en el medio circundante. Los cambios generados en los SFOs por el medio externo inducen un cambio en las propiedades de la luz sea en: intensidad, polarización, fase, o longitud de onda. Los SFOs se han posicionado como una tecnología versátil que ofrece la posibilidad de realizar mediciones puntuales o distribuidas confiables, de manera fácil y rápida en áreas como biomedicina, aeronáutica, manufactura, en las industrias de automotriz, y de exploración y extracción de hidrocarburos, entre otros (Floris et al., 2021; Habel & Kriebber, 2011; Leng & Asundi, n.d.; H. N. Li et al., 2004; Rong & Qiao, 2019).

Un SFO se conforma principalmente de (1) una fuente de luz, (2) componentes de fibra óptica, (3) un dispositivo de fibra óptica sensible (DFOS), (4) un detector, y (5) la técnica de análisis de la señal para estimar la medición del parámetro a monitorear, como se muestra en la Fig. 9 (b). El elemento (3) en el SFO es el núcleo del sistema de monitoreo, siendo la región sensible en donde es posible modular la luz guiada en función del parámetro a detectar. En el DFOS la modulación de la señal puede ser de forma (i) intrínseca o (ii) extrínseca. Esto quiere decir que, en el DFOS tipo (i), la luz se propaga a través de la fibra óptica desde una fuente de luz hasta el detector. En esta misma línea de transmisión, una sección de fibra óptica se adapta como elemento sensible a los cambios del medio externo, tal como se muestra en la Fig. 9 (a), donde la luz interacciona en forma de una onda evanescente, o bien la luz experimenta una modificación en el camino óptico debido al cambio en las características internas de la fibra óptica. Mientras que en el DFOS tipo (ii), la fibra óptica funciona como elemento para guiar la luz hasta un determinado punto, donde emerge al exterior o interacciona con un material depositado en el extremo de la fibra óptica sufriendo en ambos casos una perturbación, y se acopla nuevamente a una fibra óptica que lleva la señal hasta el

detector, a través de un (2) acoplador/circulador de fibra, como se muestra en la Fig. 9 (b).

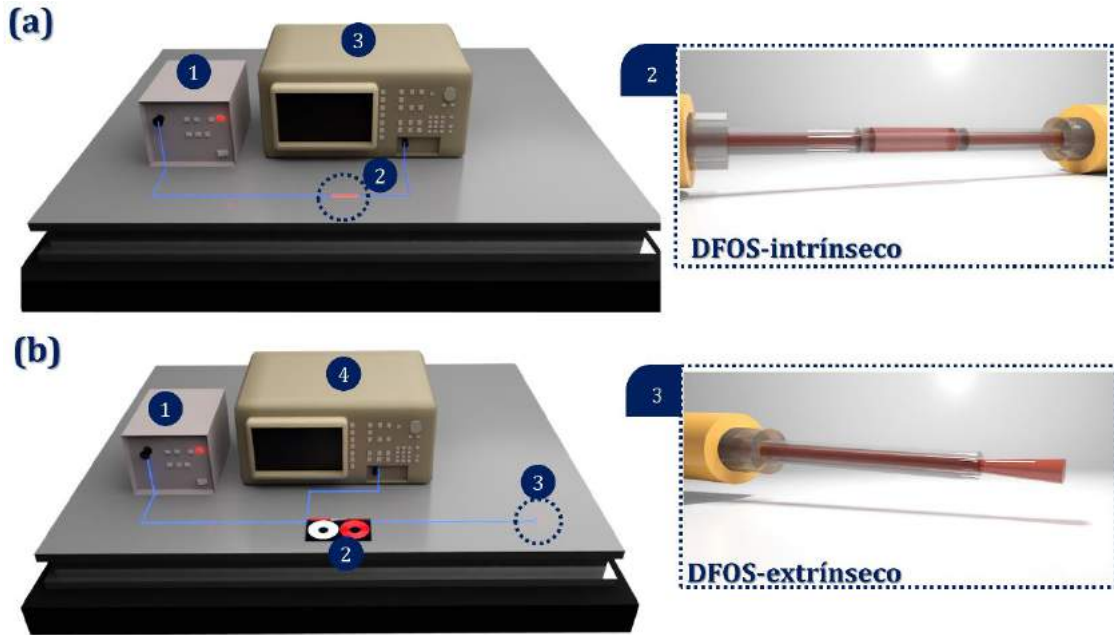


Figura 9. Sistema de un sensor de fibra óptica, (a) intrínseco y (b) extrínseco, compuesto por: (1) fuente de luz, (2) circulador/acoplador de fibra, (3) dispositivo de fibra óptica sensible, (4) detector.

Cuando la luz, que proviene de (1), se propaga hasta (3) pasando a través del DFOS (2), tal como se muestra en la Fig. 9 (a), se considera que el SFO opera en transmisión. De otro modo, el SFO opera en reflexión ya que la luz llega a la sección del DFOS, que generalmente termina en punta, y se refleja, tal como se muestra en la Fig. 9 (b). Los SFOs en reflexión son también conocidos como sondas. Las técnicas implementadas para el análisis de la respuesta de los SFOs, operando en transmisión o reflexión, se basan en el cambio de las propiedades de la luz previamente mencionadas. Para aplicaciones donde el monitoreo de uno o más parámetros se realiza de forma puntual, las técnicas basadas en longitud de onda e intensidad son las opciones más adecuadas para implementar. La primera técnica es ideal cuando se requiere analizar las características de la señal sobre un rango de longitudes de onda. En este tipo de esquemas se requiere que el elemento (3), sea un analizador de espectros óptico (OSA: *Optical spectrum analyzer*), espectrómetro o dispositivos de escaneo por

longitud de onda. La segunda técnica permite analizar las variaciones en la amplitud de la señal, y en este caso el elemento (4) está conformado por un fotodetector (PD: *Photodetector*). Esta última técnica se caracteriza por ser fácil de implementar y los elementos requeridos son de menor costo que los sistemas de longitud de onda. Además, mediante esta técnica se puede tener una adquisición de datos en el orden de los ~MHz, superando la tasa de adquisición de los espectrómetros de ~kHz (L.-K. Cheng et al., 2019).

Las fibras ópticas han aprovechado otras tecnologías desarrolladas, como la fotoimpresión láser, para crear DFOSs intrínsecos como las rejillas de Bragg (FBG: *Fiber Bragg grating*). También se ha conseguido que en el núcleo de una fibra óptica se produzcan fenómenos ópticos altamente sensibles, como la interferencia óptica. Los DFOSs basados en este fenómeno óptico son comúnmente referidos como interferómetros de fibra óptica (IFO), que brindan en los SFOs mecanismos de medición altamente sensibles. Hoy en día los SFOs, basados en FBG e IFO, poseen una madurez tecnológica que los posiciona dentro del mercado compitiendo con otras tecnologías de medición. No obstante, la investigación en el desarrollo de las FBGs y los IFOs se mantiene activa buscando nuevas metodologías de fabricación, estrategias para combinarse con otras tecnologías para producir mecanismos de medición novedosos, así como la implementación de nuevas técnicas de análisis y acondicionamiento de la señal.

En las siguientes subsecciones se aborda el principio de funcionamiento de los SFOs apoyados de la interferencia óptica, los cuales son la base de este trabajo. Además, se presentan las bases del efecto Vernier, que es una técnica óptica aplicada para la mejora en el rendimiento de los SFOs basados en la interferencia óptica. Una de las características particulares de los SFOs, respecto a otros esquemas de medición, es la capacidad para disponer de una medición multiparamétrica. Dicha medición se puede llevar a cabo a través de un mismo DFOS, o bien configurando más de dos DFOSs con mismo o distinto principio de operación. En este sentido analizamos el principio de funcionamiento de las FBGs combinado con IFOs para conseguir esquemas de monitoreo multiparamétricos.

2.3.1 Interferómetros de Fibra Óptica

La interferencia óptica, tras su descubrimiento de forma experimental en 1801 por el físico inglés Thomas Young, ha sido utilizada como técnica de medición en dinámica de fluidos, detección de ondas gravitacionales, perfilómetro de superficie, y biodetección, por mencionar algunas (Bogris et al., 2022; Davé, 2009; Freise & Strain, 2010; McClelland et al., 2011; Monnier, 2003; Slangen et al., 2010; Y. Wang et al., 2017). La popularidad de los interferómetros se centra en la sensibilidad que presenta ante los cambios mínimos generados en el medio externo. De esta forma, en el campo de los SFOs se ha buscado generar la interferencia configurando las fibras ópticas de forma análoga a algunas versiones ópticas de bulto. El principio de operación de los interferómetros de fibra óptica se basa en la superposición de dos haces (modos), con la misma frecuencia, que se propagan por distintos caminos ópticos lo que genera una diferencia de fase entre ellos. La diferencia de fase entre dos haces es visualizada como cambios de intensidad en el patrón de interferencia. Cuando el desfase de ambos haces resulta en múltiplos de $2m\pi$, se dice que la interferencia es constructiva resultando en una intensidad mayor a las intensidades individuales de ambos haces. Mientras que una interferencia destructiva, con una intensidad cero, es obtenida cuando el desfase entre ambos haces es de $(2m + 1)\pi$, en donde m es un número entero.

Las fibras ópticas convencionales, particularmente las SMFs, se utilizan en los interferómetros de fibra óptica en lugar de fibra óptica multimodo, ya que la función de transferencia de los interferómetros de fibra monomodo es muy similar a la de los interferómetros convencionales. Los IFOs han logrado hacer de un fenómeno físico un éxito comercial principalmente porque el fenómeno ofrece excelente desempeño en términos de sensibilidad y resolución pero además porque ofrecen ventajas sobre los de bulto: son compactos y ligeros, pueden usarse en ambientes demandantes (altas temperaturas, corrosivos, alto voltaje, altas corrientes), no requiere partes móviles lo que reduce los problemas de alineación, flexibilidad para adaptarse a diferentes aplicaciones, y permiten la codificación en intensidad, longitud de onda o fase. Los interferómetros son esquemas relevantes en el campo de los SFOs porque han demostrado alta sensibilidad en la detección de parámetros físicos, tales como temperatura, deformación, vibración, presión, rotación, aceleración, campos magnético y eléctrico, (Y. Chen et al., 2022; M. Deng et al., 2021; Fan et al., 2020; Leal-Junior et al., 2021; J. Ma et al., 2021; X. Ma et al., 2023; Paixão et al., 2019; Shuhao et al., 2022). Entre los interferómetros de fibra óptica más populares se encuentran los esquemas

Mach-Zehnder (IMZ) (Noman et al., 2022), Michelson (IMC) (H. Wang et al., 2022), y Sagnac (Arianfard et al., 2023). Además, la versatilidad que poseen las SMFs ha permitido que puedan adaptarse, a través del proceso de fusión, con fibras ópticas especiales. Las técnicas modernas han impulsado particularmente el desarrollo de interferómetros de un solo brazo como los Fabry-Perot o los interferómetros modales. Con estos dos últimos esquemas se puede disponer de dispositivos de dimensiones micrométricas con el mismo rendimiento de los interferómetros de dos brazos para mediciones puntuales. El interés por realizar mediciones puntuales de magnitudes físicas usando una punta de fibra óptica, debido a su practicidad ha impulsado los sensores de fibra óptica basados en interferómetros Fabry-Perot e interferómetros modales, de los cuales se discutirá en las siguientes subsecciones el principio físico.

2.3.1.1 Interferómetro Fabry-Perot

En el IMC y el IMZ el haz proveniente de la fuente óptica se divide en dos haces, en el caso ideal, con la misma intensidad que se propagan por dos caminos distintos. De los dos haces uno es considerado como una referencia, y permanece inmune a los cambios medioambientales, mientras que el otro es sometido al ambiente cambiante bajo la influencia del parámetro a detectar. Al final ambos haces se recombinan portando una diferencia de fase entre ellos debido a la diferencia de camino óptico. A diferencia de estos interferómetros en el interferómetro Fabry-Perot de fibra óptica (IFPF), la interferencia se produce por la superposición de múltiples haces generados al interior de la cavidad, que caracteriza a este tipo de interferómetros (Yun-Jiang Rao et al., 2017).

2.3.1.1.1 Fabry-Perot con una Cavidad: Principio de Operación

Para entender el fenómeno de interferencia en un Fabry-Perot, considérese el esquema representado en la Fig. 10 (a), siendo un esquema Fabry-Perot extrínseco (IFPF-E) compuesto por una punta plana SMF, con la superficie (S_{R1}) de su sección

transversal colocada plano-paralela a una superficie reflejante (S_{R2}) externa. Una cavidad de longitud, L_{cav} , se forma entre ambas superficies conteniendo un medio de índice de refracción n_{cav} .

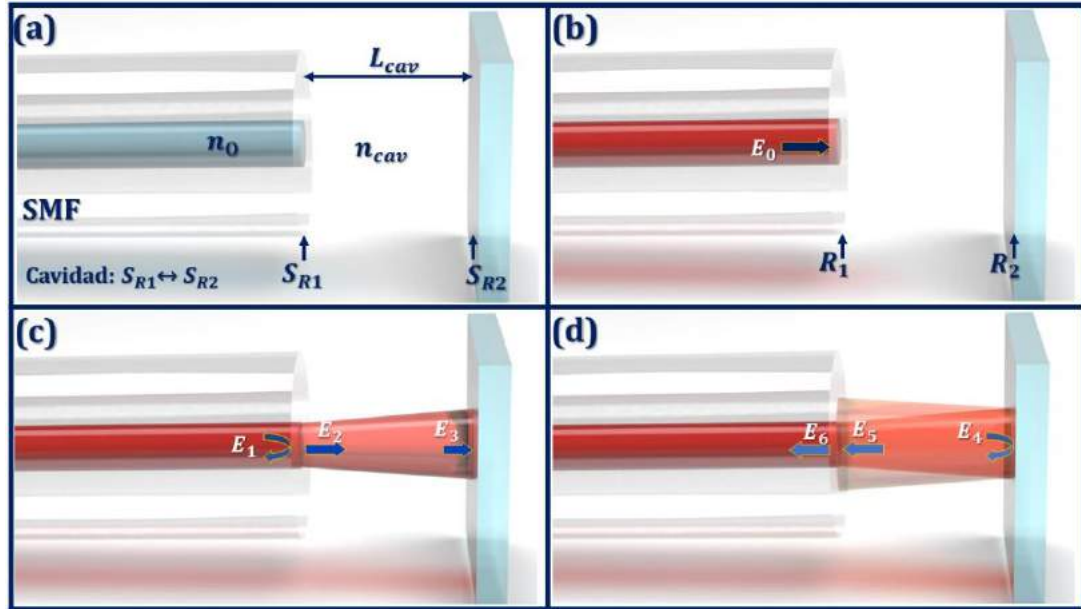


Figura 10. (a) Representación de un IFPF-E. (b)-(d) Múltiples haces transmitidos y reflejados en el IFPF-E.

La interferencia óptica se genera a partir de un haz inicial, con un campo E_0 , que se propaga en el núcleo de la SMF hasta S_{R1} , tal como se ve en la Fig. 10 (b). E_0 incide en S_{R1} donde encuentra una interfaz creada entre medios de distintos índices de refracción, n_0 y n_{cav} , donde una porción se refleja con una magnitud E_1 . Mientras que, la otra porción se refracta, E_2 , hacia la cavidad de $n_{cav}=1$, experimentando un cambio en la fase (ϕ). La amplitud de E_1 y E_2 respecto a E_0 son determinados por los coeficientes de reflexión y transmisión, r_1 y t_1 respectivamente. E_2 se transmite por la cavidad con longitud de camino óptico $LCO = n_{cav} \cdot L_{cav}$, hasta la superficie S_{R2} donde incide el haz, E_3 , como se ve en la Fig. 10 (c). De la incidencia de E_3 en S_{R2} , el haz E_4 se refleja con una atenuación r_2 respecto a E_3 , y se transmite por la cavidad en dirección a S_{R1} . Siendo E_5 el haz que incide en S_{R1} acoplándose al núcleo de la SMF. Finalmente, el haz acoplado, E_6 , se superpone con el haz de referencia E_1 , como se muestra en la Fig. 10 (d). La interferencia generada por la superposición de ambos haces, $E_T = E_1 + E_6$, se aprecia como una variación en la intensidad, $I_{Total} = |E_T|^2$,

de forma cosinusoidal en el dominio óptico. La reflectancia, definida como (I_{Total}/I_0) , de un IFPF se expresa como

$$I_N = R_1 + R_2(1 - R_1)^2\eta_1 + 2(1 - R_1)\sqrt{R_1R_2}\eta_1 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(n_{\text{cav}}L_{\text{cav}})\right) \quad (30)$$

Donde R_1 , R_2 son la reflectancia de S_{R1} y S_{R2} , y η_1 representa la eficiencia de acoplamiento de la luz reflejada de S_{R2} . La reflectancia (R) en una interfaz compuesta por dos medios dieléctricos, puede calcularse de acuerdo a la ecuación de la reflexión de Fresnel

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2 \quad (31)$$

Donde n_1 y n_2 son el índice de refracción del medio 1 y 2. Para una punta de fibra óptica, con un $n_0 = 1.4500$, puesta en aire, el haz con incidencia normal se refleja con $\sim 3.3\%$ (F. Graham Smith et al., 2007). Mientras que la expresión $\frac{4\pi}{\lambda}(n_{\text{cav}}L_{\text{cav}})$ en la Ec. 30 representa la diferencia de fase (ϕ_{IFPF}) entre los haces que interfieren. En el Anexo B, se puede ver a más detalle el análisis de los múltiples haces, reflejados y transmitidos para obtener la Ec. 30.

Las variaciones en la señal reflejada de forma periódica de un IFPF en el rango de las longitudes de onda se pueden apreciar en la Fig. 11, dicha señal es conocida como patrón de interferencia. Este patrón es una señal cosinusoidal que oscila en el rango de las longitudes de onda ($[\lambda_i, \lambda_f]$). Cuando ϕ_{IFPF} es igual a $(2m + 1)\pi$, siendo m un entero, la longitud de onda de un mínimo (λ_{FP}) se localiza en

$$\lambda_{\text{FP}} = \frac{4(n_{\text{cav}} \cdot L_{\text{cav}})}{(2m + 1)} \quad (32)$$

Esto denota que los cambios de ϕ_{IFPF} se pueden apreciar como un corrimiento en longitud de onda ($\Delta\lambda_{\text{FP}}$). De acuerdo a la Ec. 30, el patrón de interferencia depende de las características de la cavidad, tales como $R_{1,2}$, n_{cav} y L_{cav} . Es claro que n_{cav} y L_{cav} afectan directamente la fase, ϕ_{IFPF} , de la señal reflejada. La variación de L_{cav} y/o n_{cav}

lleva a un cambio en la LCO y, en consecuencia, en la fase. Estas variaciones además de relacionarse con un $\Delta\lambda_{FP}$, el patrón de interferencia tiene cambios en su rango espectral libre (FSR: *Free spectral range*)

$$FSR = (\lambda_{FP} - \lambda_{FP\pm 1}) = \frac{\lambda_{FP}^2}{2n_{cav}L_{cav}} \quad (33)$$

Que denota la distancia entre dos picos/depresiones adyacentes. Conforme se aumenta n_{cav} y/o L_{cav} , el FSR disminuye. En el caso particular del n_{cav} , cuando su valor aumenta se induce un cambio tanto en LCO, como en $R_{1,2}$. La variación en estas dos características de la cavidad producen, además del cambio en el FSR, un cambio en la amplitud del patrón de interferencia. En las gráficas de la Fig. 11 se puede observar la modulación del patrón de interferencia variando n_{cav} y L_{cav} de forma independiente. Siendo la cavidad del IFPF un elemento medular en la modulación del patrón de interferencia, los cambios en la fase o intensidad pueden relacionarse con los cambios inducidos en las características de la cavidad por un parámetro físico, químico, o biológico. La razón del cambio de la señal (ΔY) respecto al cambio del parámetro a detectar (ΔP) define una de las características de rendimiento de los SFOs también conocido como sensibilidad ($\Delta Y/\Delta P$).

Aunque la interferencia en un IFPF ha sido explicada desde el punto de vista de una estructura extrínseca, este mismo principio se aplica para los esquemas intrínsecos (IFPF-I). Los IFPF-I son esquemas que se caracterizan en tener una estructura completamente de fibra óptica (Y. Liu et al., 2019), es decir, la cavidad está confinada en la línea de fibra óptica. Para las superficies reflejantes en los IFPF-I, diversas estrategias se han perseguido para generar la reflexión de Fresnel entre dos medios distintos. Entre estas estrategias una tan sencilla como empalmar una sección de fibra especial (o núcleo hueco) a SMFs (Gang et al., 2023; X. Zhao et al., 2022), radiar directamente con láser de femtosegundos (M. qing Chen et al., 2022) una sección de la fibra óptica para modificar el RI del núcleo (X. Yi et al., 2023), o bien recurrir al micro maquinado que permite la ablación del material para realizar micro ranuras en una sección de la fibra óptica (Lee et al., 2020). Es claro que en los IFPF-E se tiene mayor grado de libertad para generar la cavidad usando una superficie externa, S_{R2} . Las estructuras IFPF-E han tomado gran relevancia por su mecanismo de detección, la cual se basa principalmente en los cambios de L_{cav} , es decir, la distancia entre S_{R1} y S_{R2} .

Este parámetro puede ser determinado, a partir del patrón de interferencia y utilizando la expresión de la Ec.33, como

$$L_{cav} = \frac{\lambda_{FP}^2}{2n_{cav}FSR} \quad (34)$$

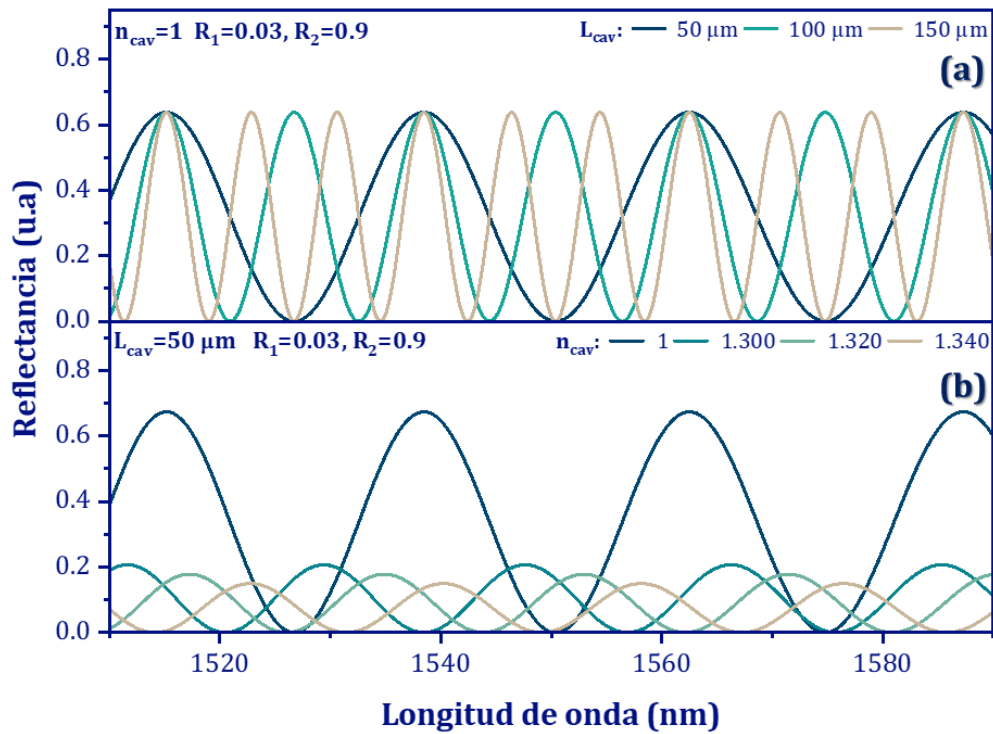


Figura 11. Espectros ópticos de la reflectancia de un IFPF-E variando: (a) L_{cav} , y (b) n_{cav} .

La variación de la distancia en un IFPF-E se produce cuando una de sus superficies se desplaza respecto a la otra por la presencia de una perturbación externa. La posibilidad de medir una magnitud física, a través de la variación en distancia, ha conducido también a realizar diversos planteamientos que permiten esta transducción física. Los esfuerzos se han centrado principalmente en incorporar elementos que modifican la posición de la superficie S_{R2} ante la presencia del parámetro a detectar. Para esto, las tecnologías de micro fabricación y micro impresión 3D (Tian et al., 2023; Xiong, Liao, et al., 2020; Zou et al., 2022), por láser de femtosegundos, han contribuido en gran medida ya que han permitido producir micro estructuras como membranas (Niu

et al., 2023; W. Zhang et al., 2017; Y. Zhao, Song, et al., 2023); o bien, vigas fijas (F. Wang et al., 2023; J. Wang et al., 2023) o en voladizo (cantiléver) (Xiong, Zhou, et al., 2020) ancladas a la superficie de la sección transversal de la fibra óptica para formar micro cavidades. Estas estructuras que forman las micro cavidades por donde se propaga la luz son una analogía a los diafragmas mecánicos. La incidencia de una fuerza, acústica (Wei et al., 2024), presión (L. Zhang et al., 2019), aceleración (S. Li et al., 2020)) sobre la membrana (o cantiléver) conduce a la vibración (o deflexión) de la superficie y, en consecuencia, la modulación de la micro estructura. Estos tipos de IFPF-E tienen un mecanismo de detección de tipo opto-mecánico, y la sensibilidad que poseen estos SFOs dependen de la micro estructura formada. Bajo estos esquemas se pueden disponer de sensores compactos, conocidos también como sondas.

Por otro lado, con los esquemas IFPF-E convencionales, como el de la Fig. 10 (a), se puede hacer mediciones dimensionales, es decir, magnitudes que pueden determinarse mediante la distancia, posición, planitud, o rugosidad (Guo et al., 2020; C. Zhu, Chen, Zhuang, et al., 2017). Así también para la detección de micro desplazamientos (Y. S. Kim et al., 2018), control de movimiento (C. Zhu, Chen, Du, et al., 2017) y posición (Bettahar et al., 2018) en sistemas mecánicos. Además de la alta sensibilidad que exhiben los IFPF-E, la medición sin contacto es uno de los atributos más valorados en pruebas no-invasivas.

2.3.1.1.2 Fabry-Perot Con Dos Cavidades: Efecto Vernier

Previamente se describió el principio de operación de un IFPF en su esquema más simple, es decir, conformado por una cavidad. Sin embargo, las investigaciones en el campo de los SFOs han llevado al desarrollo de IFPFs con más de una cavidad con el objetivo de generar mecanismos de medición que afronten las limitaciones que otras tecnologías de detección presentan. Particularmente, los IFPFs de dos cavidades (IFPF-2C) son esquemas con los cuales es posible hacer mediciones de más de un parámetro de forma simultánea (Bae et al., 2014; Cui et al., 2020; Zheng et al., 2021). Esta capacidad se ha aplicado principalmente para compensar la sensibilidad cruzada de temperatura (C. Wang et al., 2019) que sufren la mayoría de los sensores y que

representa uno de los problemas más importantes a resolver en el campo de los sensores. Por otro lado, con los IFPF-2C se pueden conseguir las condiciones necesarias para mejorar la sensibilidad y la resolución alcanzadas con IFPFs simples (Lin et al., 2023; Z. Li et al., 2019).

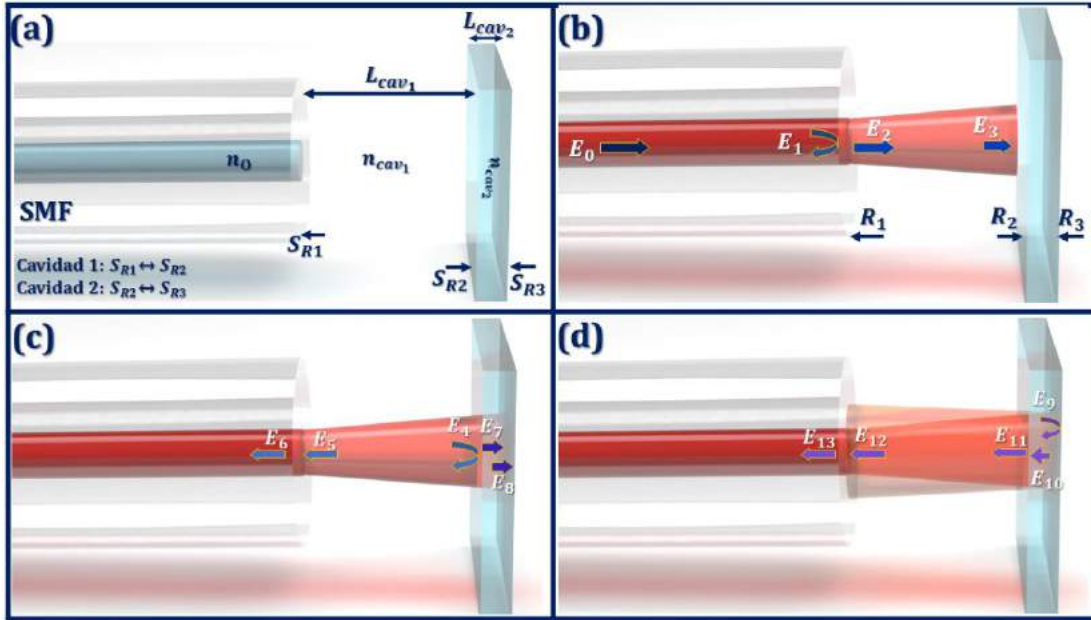


Figura 12. (a) Representación de un IFPF con dos cavidades en serie. (b)-(d) Múltiples haces transmitidos y reflejados en dos cavidades del IFPF.

La versatilidad de los IFPFs permite que las dos cavidades sean configuradas ya sea en forma paralela o en serie. En el primer caso, dos IFPF simples son conectados en forma separada por distintas líneas de fibra óptica, regularmente a la salida de un acoplador de fibra (Mo & Xu, 2016; Yao et al., 2019). Mientras que, la configuración en serie se puede considerar las cavidades físicamente separadas o conectadas entre sí, en una misma línea de fibra óptica (H. Chen et al., 2019). En el caso de dos cavidades en serie en un IFPF, véase la Fig. 12 (a), la estructura está conformada por tres superficies. Partiendo de una primera cavidad (cav_1) del IFPF, descrito en la sección anterior, una superficie S_{R3} es colocada a una distancia L_{cav_2} , respecto a una superficie semi-reflejante, S_{R2} para formar una segunda cavidad (cav_2). Esta estructura toma como base el principio físico del IFPF simple. Continuando con el análisis desde S_{R2} , el haz incidente E_3 (ver. Fig. 12 (b)) se transmite por una $LCO = n_{cav_2} * L_{cav_2}$ que corresponde a la cav_2 (véase Fig. 12 (c)), similar a E_2 en la cav_1 . Mientras que el haz

E_9 reflejado en S_{R3} se transmite hacia S_{R1} , acoplándose al núcleo de la fibra óptica como E_{13} (ver

Fig. 12 (d)). Dentro de la fibra óptica interfieren el haz de referencia y los haces reflejados en cada una de las cavidades; es decir, $E_T = E_1 + E_6 + E_{13}$. La señal reflejada del IFPF de dos cavidades en serie se expresa como:

$$\begin{aligned}
 I_{mW} = & \left[R_1 + R_2(1 - R_1)^2\eta_1 + R_3(1 - R_1)^2(1 - R_2)^2\eta_2 \right. & (35) \\
 & + 2\sqrt{R_1R_2}\eta_1(1 - R_1) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(2n_{cav_1}L_{cav_1})\right) \\
 & + 2(1 - R_1)^2(1 \\
 & - R_2)\sqrt{R_2R_3}\eta_1\eta_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(n_{cav_2}L_{cav_2})\right) + 2(1 \\
 & - R_1)(1 \\
 & \left. - R_2)\sqrt{R_1R_3}\eta_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(n_{cav_1}L_{cav_1} + n_{cav_2}L_{cav_2})\right) \right] * I_0
 \end{aligned}$$

Donde R_1 , R_2 , R_3 son la reflectancia de S_{R1} , S_{R2} , y S_{R3} . Mientras que η_1 y η_2 representan la eficiencia de acoplamiento de la porción de luz reflejada de S_{R2} y S_{R3} . El espectro reflejado, ver Fig. 13, de un IFPF-2C con distintos LCOs exhibe un patrón de interferencia más compleja al de un IFPF-simple debido a la superposición lineal de tres señales cosenoidales con distintas componentes frecuenciales, como se expresa en la Ec. 35. Estas frecuencias corresponden a cav_1 , cav_2 , y la combinación de cav_1 y cav_2 .

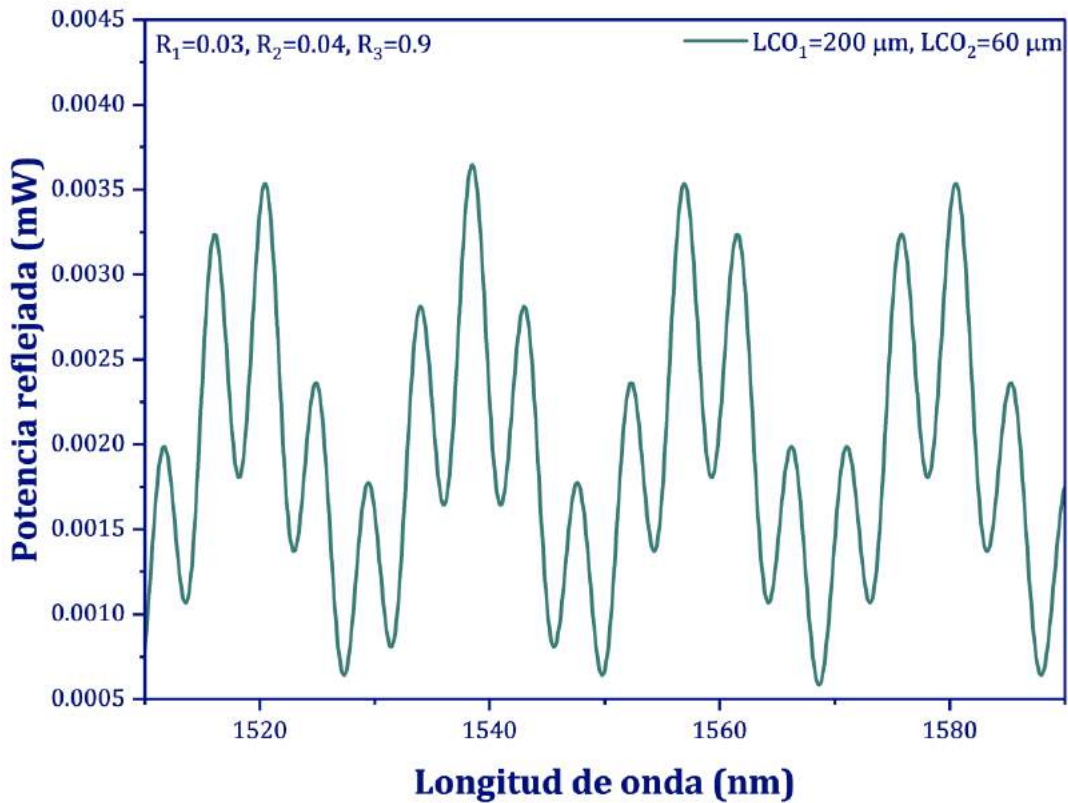


Figura 13. Espectro reflejado simulado de un IFPF de dos cavidades.

Una de las limitaciones del IFPF-2C es el análisis de su señal en el dominio óptico, ya que los métodos de seguimientos en amplitud y/o longitud de onda resultan complicados de analizar para establecer una relación con los cambios en la cavidad de forma individual. Además, las LCOs del IFPF-2C no pueden ser estimadas a partir de la Ec. 34, tal como sucede para el IFPF simple. No obstante, el espectro óptico puede ser analizado por medio de algoritmos como la transformada rápida de Fourier (FFT: *Fast Fourier Transform*) con el fin de separar cada una de las componentes frecuenciales de la señal (Zheng et al., 2021), con sus respectivas amplitudes (A_{FFT}) y fases (Φ_{FFT}). A partir de la descomposición del espectro óptico en sus componentes individuales, las LCOs de las cavidades que conforman al IFPF-2C pueden ser obtenidas (Rodríguez-Quiroz et al., 2019). En la Fig. 14 se tiene el espectro de potencia ($|A_{FFT}|^2$) del patrón de interferencia de la Fig. 13 obtenido de su análisis con la FFT y, donde cada una de las componentes superpuestas en la señal son localizadas en los valores correspondientes a las LCOs de la cav₁, la cav₂, y la suma de ambas cavidades, respectivamente. De esta manera, se tiene tanto la información de las cavidades que conforman al IFPF-2C, así como la posibilidad de analizar los cambios que se generen

en las cavidades del dispositivo de forma individual, a través del seguimiento en la LCO y/o potencia de los picos característicos.

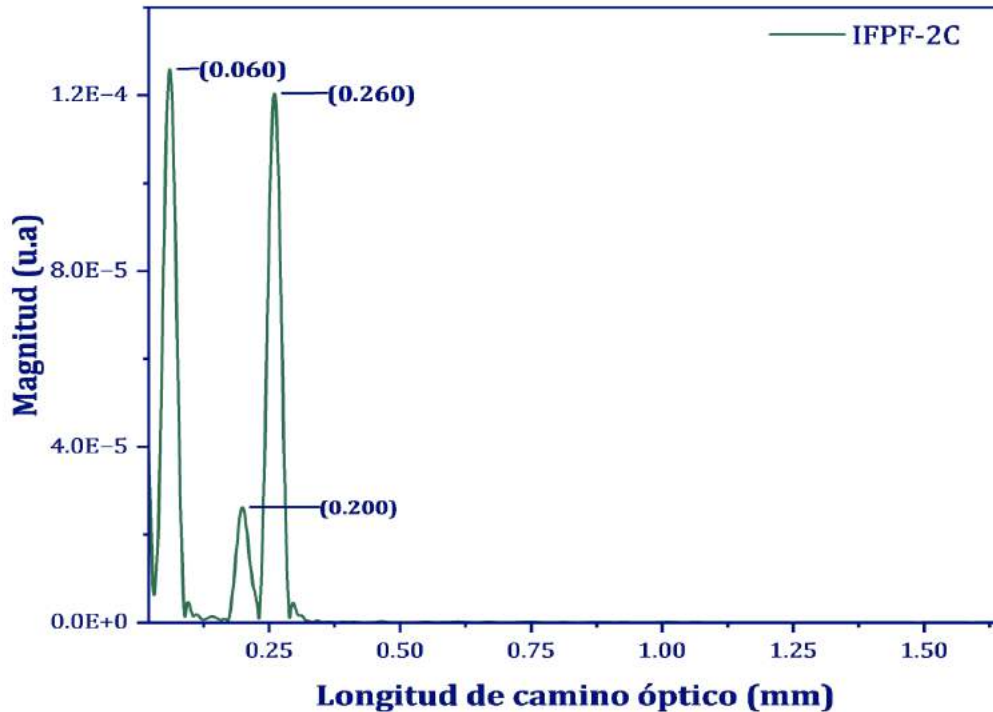


Figura 14. Espectro de Fourier de un IFPF-2C, con las tres componentes en términos de la longitud de camino óptico

Aunque pueda parecer una limitación la complejidad de la señal de un IFPF-2C para ser analizado en el dominio óptico, se tiene la oportunidad también de tomar ventaja de esta característica en particular para generar un mecanismo de medición más simple de analizar, pero que a su vez lleva a la mejora en el rendimiento de los SFOs basados en IFOs. Para esto se recurre a generar el efecto óptico conocido como Vernier, el cual surge como analogía al calibrador Vernier, es decir, un arreglo de dos escalas milimétricas, con separaciones ligeramente distintas, para acceder a mediciones con un orden inferior al de sus escalas principales. En el caso de los IFOs, para generar el efecto Vernier se tiene que contemplar ciertas condiciones: (1) conectar dos IFOs simples en un esquema en paralelo o en serie y, (2) los espectros ópticos de los IFO individuales deben tener FSRs casi similares. Ahora bien, las dos cavidades del IFPF-2C de la Fig. 12 equivalen a tener dos IFPF simples conectados en serie. Bajo esta premisa el IFPF-2C es una plataforma con la cual se puede acceder al efecto Vernier y, cumpliendo la primera condición mencionada. La segunda condición se cumple

cuando las LCO_{cav} de las cavidades son establecidas para ser cercanamente iguales, siendo $LCO_{cav_1} \approx LCO_{cav_2}$, de modo que entre FSR_1 y FSR_2 existe una mínima diferencia. En las Fig.15 (a)-(b) se observa el patrón de interferencia de dos IFPF simples, $IFPF_1$ y $IFPF_2$. Cuando el $IFPF_1$ y $IFPF_2$ se conectan en serie, formando un IFPF-2C, las dos señales generadas de forma individual son superpuestas produciendo una modulación de la respuesta del IFPF-2C en forma de una función periódica, que es conocida también como envolvente. Dentro del espectro óptico existirá una posición donde los picos del patrón de interferencia de ambos interferómetros son superpuestos de tal manera que coinciden uno con otro. En este punto se tiene la mayor amplitud que corresponde al valor máximo (o pico) de la señal envolvente. Mientras que, en las posiciones adyacentes los picos superpuestos dejan de coincidir entre sí y la amplitud decae gradualmente hasta llegar a un valor mínimo (o cresta) de la señal envolvente.

En la Fig. 15 (c) se observa el espectro modulado (línea gris) generado del IFPF-2C cuando cav_1 y cav_2 tienen sus LCO_{cav} igual a la de $IFPF_1$ y $IFPF_2$. La envolvente formada en el patrón de interferencia puede verse resaltada en la parte superior (línea naranja), o bien, en la parte inferior (línea roja) del espectro reflejado. Esta envolvente posee un FSR dependiente de las de los dos interferómetros (o cavidades) configurados, como

$$FSR_{envolvente} = \frac{FSR_1 * FSR_2}{FSR_1 - FSR_2} \quad (36)$$

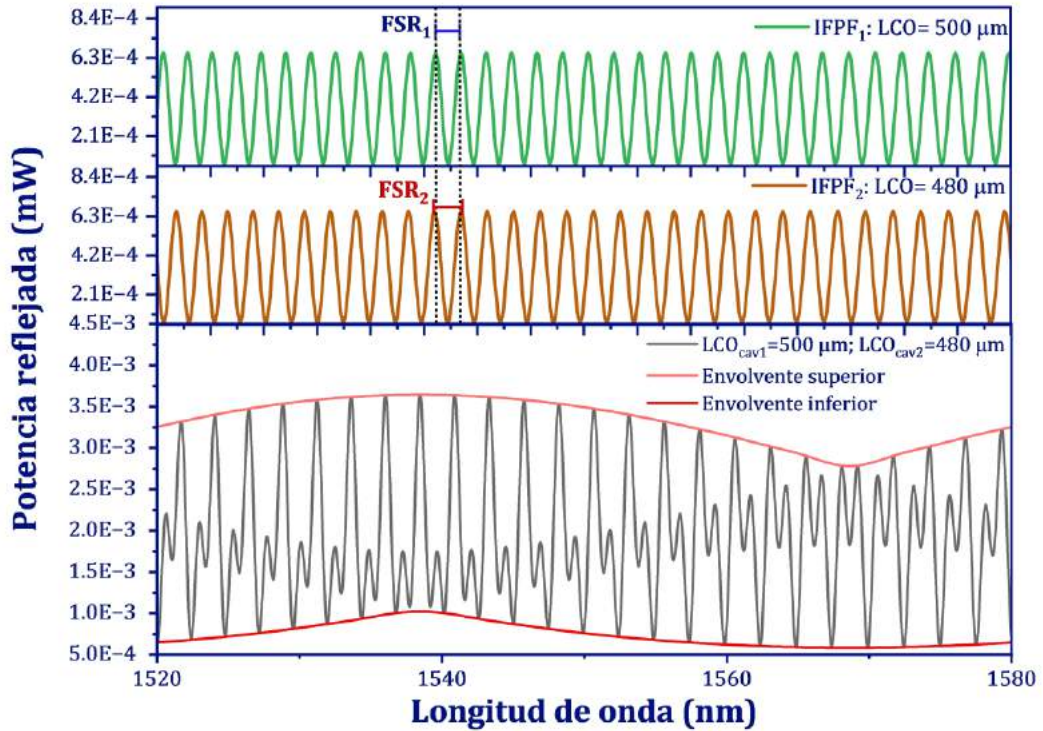


Figura 15. Espectro reflejado de un (a) IFPF₁ y (b) IFPF₂ con LCOs cercanos entre sí. (c) Espectro reflejado de un IFPF-2C en la condición de efecto Vernier.

Análogo al calibrador Vernier, los patrones de interferencia de cav_1 y cav_2 representan las escalas y, en consecuencia, la escala inferior en este caso es la envolvente formada en el espectro óptico. De acuerdo a la Ec. 35, el $FSR_{envolvente}$ es inversamente proporcional a la diferencia de FSR_1 y FSR_2 , de manera que esta diferencia aumenta y el FSR de la envolvente disminuye. Considerando la relación de la Ec. 36, el $FSR_{envolvente}$ resulta inversamente proporcional a la diferencia de las LCOs ($\Delta_{LCO} = LCO_{cav_1} - LCO_{cav_2}$) de las cavidades. En la Fig. 16 se puede observar la evolución del FSR de la envolvente cuando LCO_{cav_2} disminuye respecto a LCO_{cav_1} . Conforme la diferencia entre las LCOs aumenta, el $FSR_{envolvente}$ disminuye.

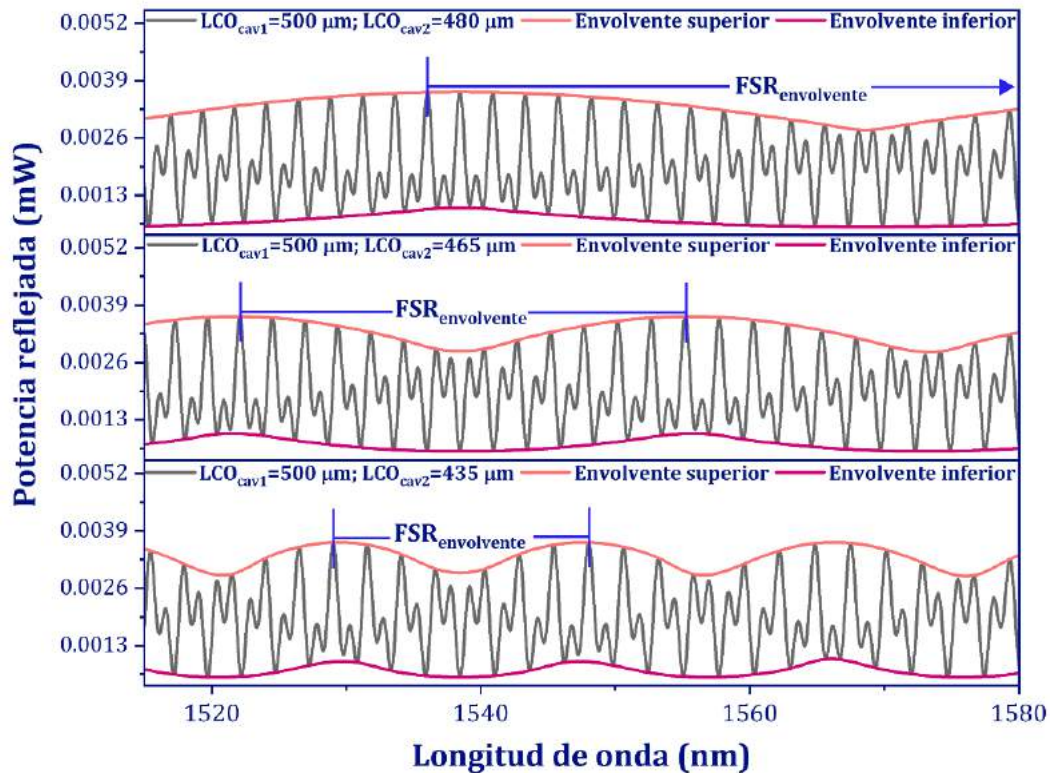


Figura 16. Espectro reflejado de un IFPF-2C cuando LCO_{cav_2} disminuye respecto a LCO_{cav_1} , teniendo una ΔLCO de (a) $20 \mu m$, (b) $35 \mu m$, y (c) $65 \mu m$.

Bajo esta premisa, el efecto Vernier es una técnica que ha permitido mejorar la respuesta de los sensores basados en IFOs. Esta técnica se basa en el seguimiento del desplazamiento en longitud de onda de la envolvente ($\Delta\lambda_{envolvente}$), generada en el espectro óptico, conforme la fase de uno de los patrones de interferencia cambia en relación a la magnitud del parámetro a detectar. Es preciso mencionar que en el esquema para el efecto Vernier, una de las cavidades (o IFO) es considerada como una referencia (cav_{ref}), donde su LCO se mantiene fijo. Mientras que la LCO de la otra cavidad (o IFO) varía en función del cambio producido en la detección, esta cavidad se considera como el dispositivo sensible (cav_{sen}). En la Fig. 17 (a) se puede ver la respuesta de un IFPF cuando se da un cambio en la fase inducido por un cambio mínimo en la LCO. El desplazamiento del patrón de interferencia ($\Delta\lambda_{IFPF}$) del IFO es pequeño, pero el desplazamiento de la envolvente es varias veces mayor, como se muestra en la Fig. 17 (b). En este sentido, las variaciones mínimas producidas en el IFPF pueden ser detectadas con mayor precisión cuando se encuentra configurado bajo la condición de Vernier, contrario al caso de cuando se encuentra interrogado de forma independiente. El factor de aumento que se obtiene con el efecto Vernier depende de la razón entre el

FSR de la envoltente ($FSR_{envoltente}$) y el FSR de la cavidad sensible (FSR_{sen}), descrita por

$$M = \frac{FSR_{envoltente}}{FSR_{sen}} = \left| \frac{FSR_{ref}}{(FSR_{ref} - FSR_{sen})} \right| \quad (37)$$

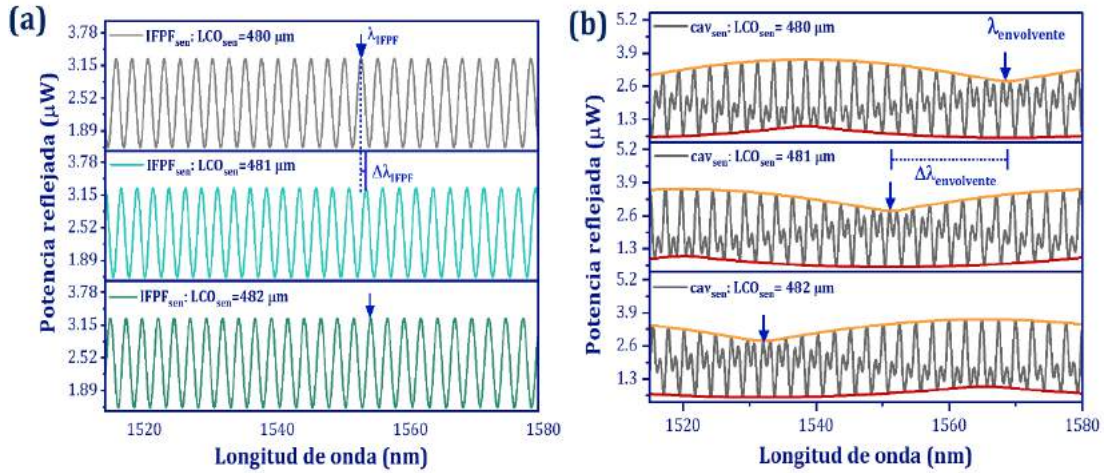


Figura 17. Comparación del desplazamiento del (a) patrón de interferencia del $IFPF_{sen}$ y (b) la envoltente formada con una cavidad de referencia fija en el $IFPF-2C$, cuando se modifica la LCO_{sen} tanto del $IFPF_{sen}$ como de la cav_{sen} ; respectivamente.

Los IFOs son reconocidos por la alta sensibilidad que poseen en la detección de diversos parámetros. Sin embargo, con el efecto Vernier su sensibilidad puede aumentar, con un factor M . Este plus obtenido de esta técnica óptica ha sido de interés en diversos grupos de investigaciones que han propuesto arreglos de dos IFOs bajo el principio de Vernier, con los que se han obtenido sensibilidades difíciles de alcanzar con un único IFO en la detección de parámetros físicos y químicos. En la Tabla 3 se presentan algunos esquemas basados en el efecto Vernier usando dos IFPFs configurados en serie y paralelo para la medición de parámetros físicos y químicos, así como el aumento de la sensibilidad obtenida bajo la configuración de Vernier.

Tabla 3. Sensores IFPFs basados en el efecto Vernier para la medición de parámetros físicos y químicos.

Parámetro (P)	IFPF_{cav} y IFPF_{sen}	Sensibilidad_{Vernier} ($\Delta\lambda_{\text{envolvente}}/\Delta P$)	Factor M	Ref.
Presión	En paralelo	63.67 nm/Mpa	15	(Han et al., 2021)
Campo Magnético	En serie	71.57 nm/Oe	28.6	(P. Zhang et al., 2014)
Flujo de aire	En serie	1.541 nm/(m/s)	9.5	(Y. Zhao et al., 2016)
Temperatura	En serie	17.75 nm/°C	27	(Hou et al., 2019)
Esfuerzo	En serie	28.11 pm/ $\mu\epsilon$	23.8	(J. Deng & Wang, 2019)
Índice de refracción	Paralelo	500 $\mu\text{m}/\text{RIU}$	850	(Gomes et al., 2020)
Distancia	Paralelo	254 nm/ μm	1071	(Robalinho & Frazão, 2021)

2.3.1.2 Interferómetro Supermodal

Las MCF descritas en la sección 2.2 permiten la propagación de tantos modos como núcleos monomodales tiene, es entonces posible que se den las condiciones para que se dé la interferencia entre estos modos, es decir, la interferencia multimodal. En los últimos años el estudio de estas condiciones son las que han acaparado el interés de la comunidad científica, más allá del análisis de los supermodos excitados dentro de su estructura, ya que se tiene interés en aprovecharlas para desarrollar nuevos esquemas de SFOs. En el IFPF descrito previamente, los haces que toman parte en la interferencia surgen de la reflexión de la luz en las superficies de la cavidad formada. Mientras que en un interferómetro multimodal (IMM), los modos se generan dentro la fibra óptica y sus propiedades ópticas están determinadas por las características de la estructura. No obstante, tener más de dos modos en el IMM puede complicar su análisis en el dominio óptico tal como sucede con el IFPF-2C. Teniendo esto en cuenta, las investigaciones

han conducido a la conveniencia de generar las condiciones necesarias que aseguren el fenómeno de interferencia con únicamente dos supermodos. Para esto, una sección de MCF es empalmada a una SMF, de tal manera que el núcleo de la SMF se encuentre alineado con el núcleo central de la MCF, tal como se representa en la Fig. 18 para distintas MCFs. Esto permite que el modo fundamental de la SMF se propague hasta la interfaz, SMF-MCF, donde se acopla a los modos soportados por la MCF y, de acuerdo a la teoría de modos acoplados (visto en la sección 2.2.2), cuando en un sistema de $N \geq 2$ núcleos la luz incide en el núcleo central se establece la existencia de únicamente dos supermodos los cuales cumplen con: “...dos de estos modos tienen en su distribución del campo modal la mayor energía concentrada en la región del núcleo central”.

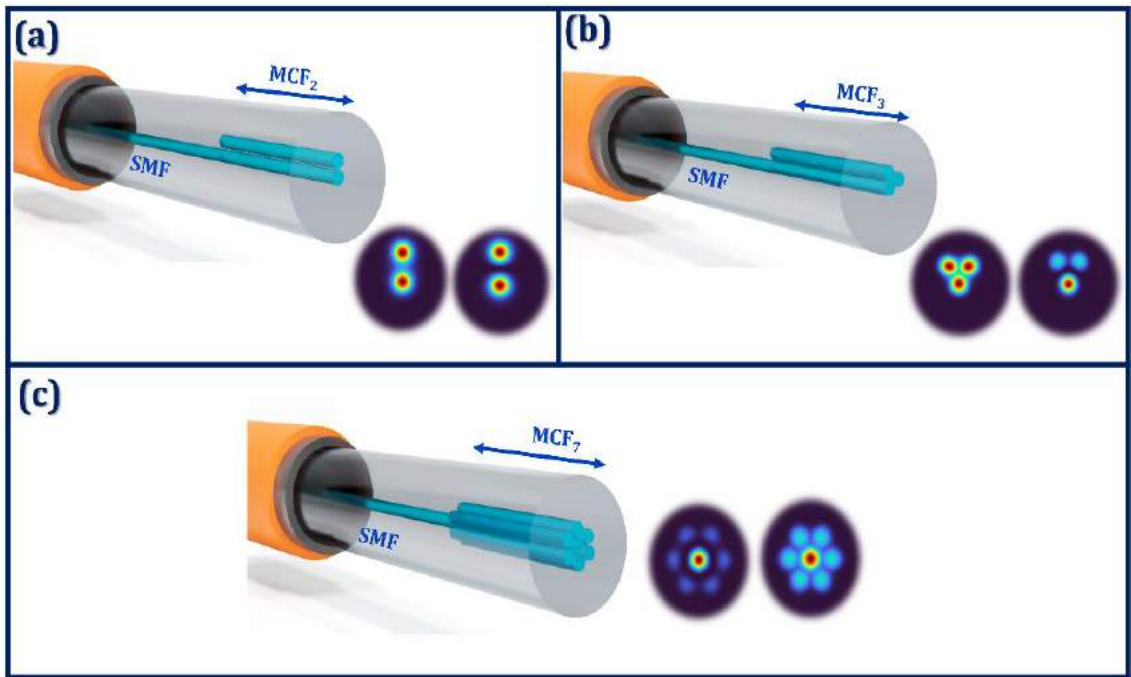


Figura 18. (a)-(c) Representación del esquema para la excitación de dos supermodos en una MCF con $N=2, 3,$ y 7 núcleos a $\lambda=1550$ nm.

Una vez excitados ambos SPs, estos se propagan con distintas constantes de propagación, β_{s_1} y β_{s_2} , sobre la sección de MCF hasta ser reacoplados por una SMF donde toma lugar la interferencia por la superposición entre modos. En la Fig. 19 (a) se representa la estructura del interferómetro supermodal (ISPM) en transmisión y, en una vista lateral se puede ver la propagación de la luz en cada una de las secciones, es decir, (1) la propagación de la luz en una SMF₁ la cual incide en la MCF acoplándose

para excitar dos supermodos, (2) la transferencia de energía del núcleo central al (los) núcleo(s) vecino(s) de forma periódica sobre la sección de MCF (L_{MCF}) y, (3) el reacoplamiento de los supermodos en una SMF₂ donde se superponen.

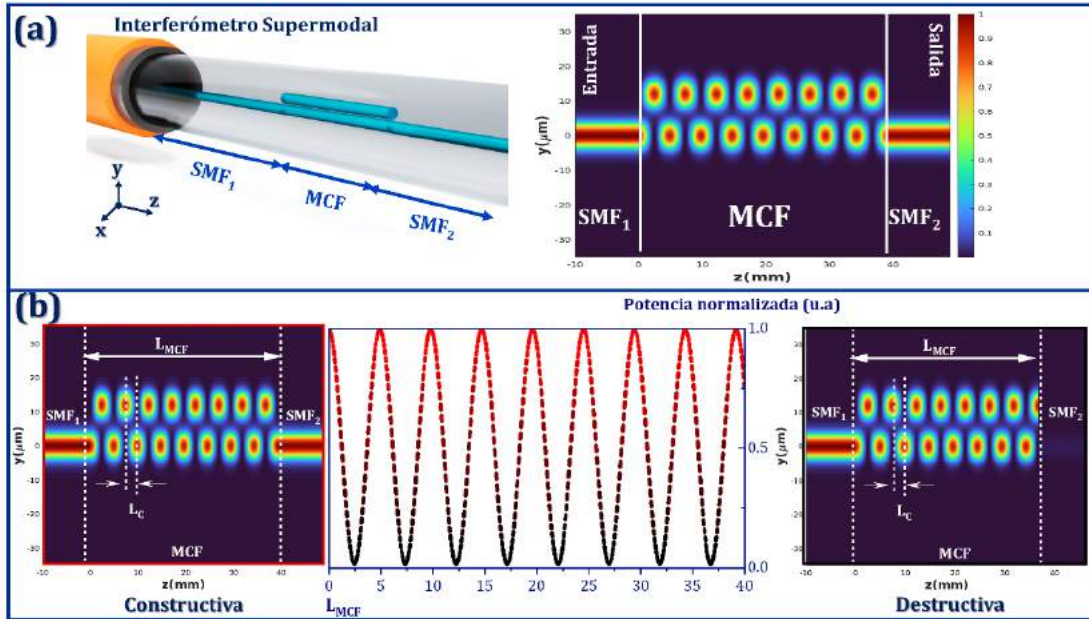


Figura 19. (a) Representación de un ISPM basado en MCF₂ y la propagación de la luz vista 2D sobre su sección lateral. (b) Variación de la potencia en la salida del ISPM para diferentes valores de L_{MCF} a $\lambda=1550$ nm.

Cuando los supermodos son reacoplados en la SMF₂ llegan con una diferencia de fase acumulada definida como

$$\Delta\phi_{SP} = (\beta_{s_1} - \beta_{s_2}) \cdot L_{MCF} = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_s \cdot L_{MCF}) \quad (38)$$

Siendo Δn_s la diferencia de los índices efectivos, n_{s_1} y n_{s_2} , de los SPs. Cuando ambos supermodos se encuentran en fase sobre la sección de MCF, una interferencia constructiva toma lugar en el núcleo central. Por lo tanto, a la salida del ISPM en SMF₂ se tendrá la potencia máxima de la señal. Esta condición se cumple de forma periódica sobre la sección MCF en términos de la longitud de acoplamiento cuando

$$L_{MCF} = 2mL_C = m \frac{\lambda}{(n_{s_1} - n_{s_2})} \quad (39)$$

Siendo m un número entero. Caso contrario, para una longitud de MCF igual a

$$L_{MCF} = (2m + 1)L_C = (m + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{(n_{s_1} - n_{s_2})} \quad (40)$$

La potencia máxima se concentra en el(los) núcleo(s) vecino(s) al núcleo central. Esto da lugar a tener una interferencia destructiva y, obteniendo en la salida del ISPM la mínima potencia. En la Fig. 19(b) se muestra la forma en la que toma lugar la interferencia constructiva/destructiva dentro de la estructura SMF₁-MCF-SMF₂ y sobre la longitud de la MCF, región donde se da la transferencia de energía del núcleo central a un núcleo vecino de forma periódica, partiendo de $z=0$ a $z=L_{MCF}$. En el caso de que la L_{MCF} del ISPM esté dada por la Ec. 39 (o Ec. 40), para una determinada λ , en SMF₂ acontece una interferencia constructiva (o destructiva), captando la potencia máxima (o mínima) de la señal en la salida del ISPM. Por otro lado, cuando la L_{MCF} del ISPM no esté dada por ninguna de estas dos relaciones, la potencia en la salida (P_N) del ISPM oscilará entre el valor máximo y mínimo de la señal. Las condiciones mencionadas se cumplen para una única λ , por lo tanto, la respuesta del ISPM sobre un rango de longitudes de onda se describe por una función de transferencia en transmisión, en el caso para un sistema de $N=2$ núcleos, como (Amorebieta et al., 2022)

$$P_{TN}(\lambda) = \cos(\pi \cdot \Delta n_s \cdot L_{MCF} / \lambda)^2 \quad (41)$$

De acuerdo al análisis de la sección 2.2.1, depende de λ , del RI del núcleo y revestimiento, y la separación entre núcleos Λ . En la Fig. 20, se presenta las variaciones de la potencia normalizada a lo largo de las longitudes de onda, dando como resultado el patrón de interferencia de un ISPM en transmisión. Para esto se considera los parámetros de la Tabla 2 referente a las características físicas y ópticas de una MCF₂ en el ISPM. En el espectro de transmisión, visto en la Fig. 20, se tiene una señal cosenoidal sobre el rango de longitudes de onda, donde la máxima potencia es localizada a la longitud de onda

$$\lambda_{SPM} = \Delta n_s \cdot L_{MCF} / m \quad (42)$$

Esto se cumple cada vez que $\Delta\phi_{SP}$ es igual a un múltiplo de 2π ($2\pi m$).

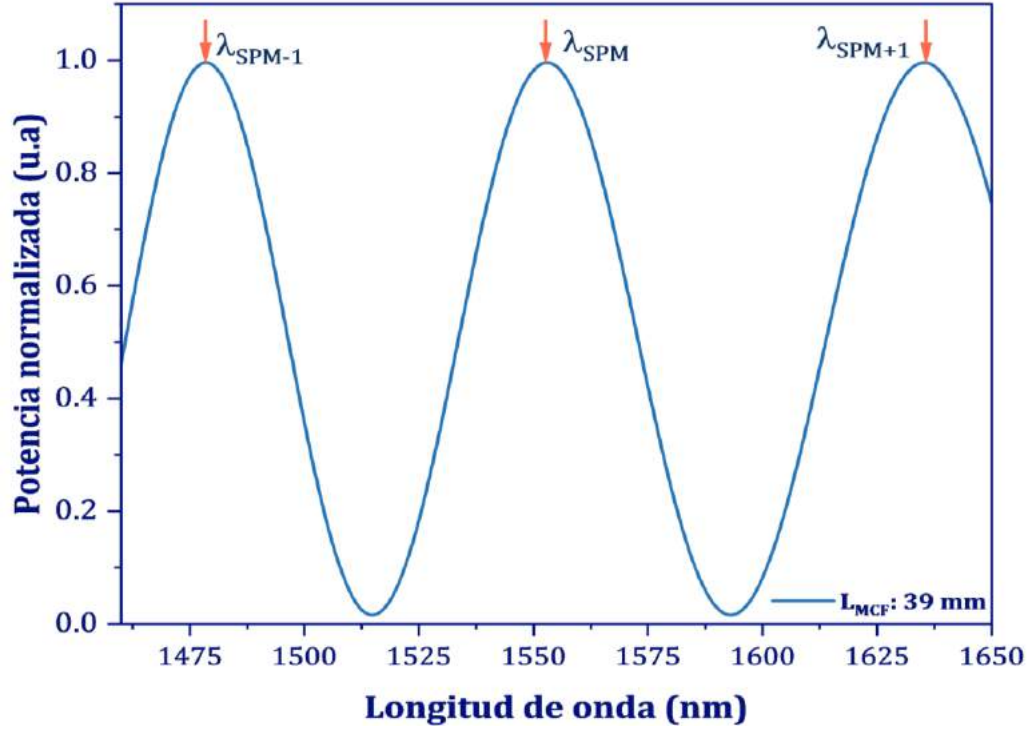


Figura 20. Espectro de transmisión de un ISPM con un sistema de $N=2$ núcleos.

En el caso de un ISPM configurado en punta, siendo su estructura conformada por una SMF-MCF como en la Fig. 18, la SMF opera como elemento tanto de entrada SMF_1 como de salida SMF_2 ; equivalente a la estructura en transmisión. La función de transferencia en reflexión de un ISPM, basado en una MCF_2 , se define como (Amorebieta et al., 2022)

$$P_{RN}(\lambda) = \cos(\pi \cdot \Delta n_s \cdot 2L_{MCF} / \lambda)^2 \quad (43)$$

Donde $2L_{MCF}$ expresa que los SPs viajan dos veces sobre la sección de la MCF; es decir, (1) se transmiten en L_{MCF} hasta el extremo de la MCF incidiendo en su superficie donde se reflejan y, (2) nuevamente se transmiten por L_{MCF} con dirección a la SMF donde son finalmente reacoplados (Amorebieta et al., 2019).

La Ec. 41 y 43 describen la respuesta interferométrica de un ISPM configurados en transmisión y reflexión; respectivamente. Ambas ecuaciones son únicamente válidas para una MCF con un sistema de $N=2$ núcleos. Para el caso de $N>2$ núcleos, es decir, cuando la MCF tiene más de dos núcleos acoplados, la función de transferencia en transmisión normalizada se reduce a (Flores-Bravo et al., 2021)

$$P_{TN}(\lambda) = [I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 + I_2} \cos(2\pi \cdot \Delta n_s \cdot L_{MCF}/\lambda)] \quad (44)$$

Donde representa el perfil de la fuente de luz, I_1 e I_2 son las intensidades de los dos SPs que son excitados en la MCF. Mientras que, para un ISPM en punta basado en $N>2$ núcleos, la función de transferencia se define como (Flores-Bravo et al., 2021)

$$P_{RN}(\lambda) = R_f [I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 + I_2} \cos(4\pi \cdot \Delta n_s \cdot L_{MCF}/\lambda)] \quad (45)$$

Sea R_f el coeficiente de reflexión de Fresnel definida en la Ec. 31. Además de las estructuras del ISPM presentadas previamente, los ISPMs pueden ser configurados bajo una estructura SMF₁-MCF-SMF₂, donde la SMF₂ tiene una terminación en punta con un reflector o espejo en su cara, R_f , como se muestra en la Fig. 21. En este caso, la estructura es considerada como dos estructuras SMF₁-MCF-SMF₂ conectadas en serie, donde su respuesta equivale al producto de su función de transferencia individual (Barrera et al., 2010; Varguez-Flores et al., 2009). Por lo tanto, la función de transferencia en reflexión de esta estructura se expresa como

$$P_{2RN}(\lambda) = [P_{TN}(\lambda)]^2 \quad (46)$$

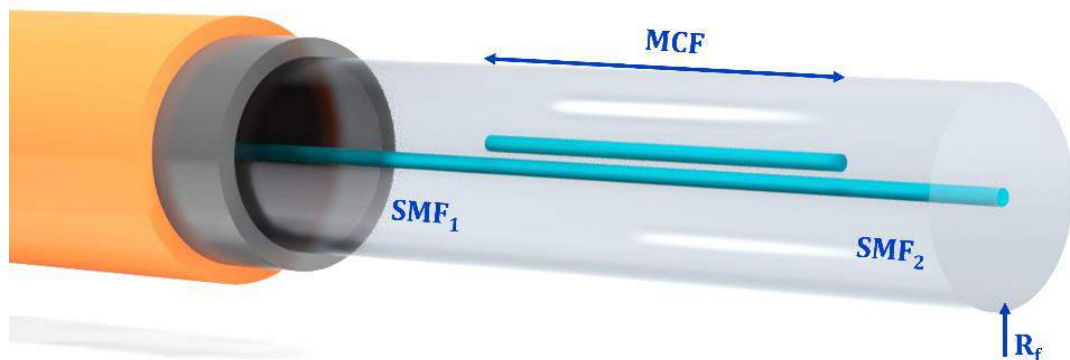


Figura 21. Representación del ISPM con un esquema SMF-MCF-SMF con terminación en reflexión.

En los ISPM, en contraste al IFPF-E, los supermodos que se propagan en la estructura del dispositivo se mantienen confinados dentro de la fibra óptica. Esto implica que su uso como plataforma de detección requiera que el mecanismo de operación se base en el cambio de las características intrínsecas de la MCF inducido por la magnitud del parámetro a detectar. Los cambios en las propiedades físicas y ópticas de la MCF, en L_{MCF} y n_0 , conducen a una variación en el espectro óptico del ISPM. En la Fig. 22 (a) se presenta el comportamiento del patrón de interferencia de un ISPM cuando se genera un cambio en la L_{MCF} . El desplazamiento en longitud de onda se relaciona con el cambio en la fase de la señal periódica, la cual depende de L_{MCF} . Un desplazamiento del máximo ($\Delta\lambda_{SPM}$) se observa, en dirección a las longitudes de onda cortas, conforme L_{MCF} aumenta. Por otro lado, considerar el cambio en el RI de los núcleos, n_0 , conlleva a un cambio en el medio óptico por el que se propagan los SPs. Como consecuencia, la diferencia de los índices efectivos, Δn_s , entre los SPs se ve afectada. En la Fig. 22(b) se muestra el comportamiento del espectro óptico conforme el RI aumenta, teniendo un $\Delta\lambda_{SPM}$ hacia longitudes de onda largas.

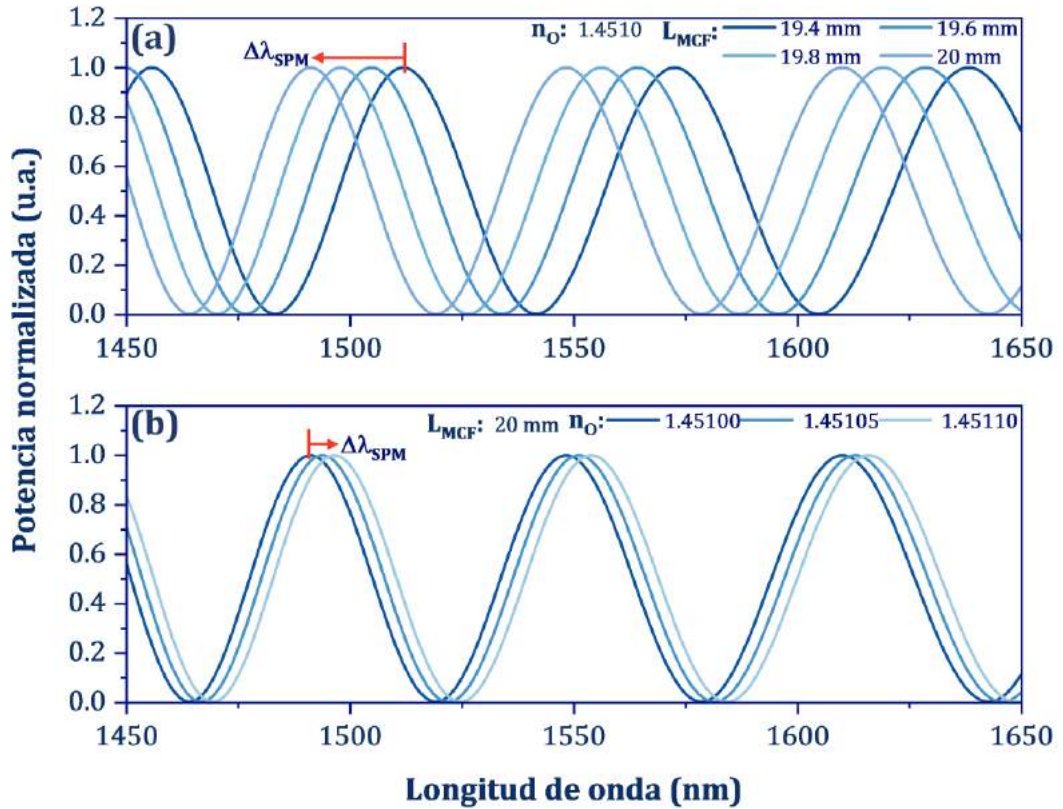


Figura 22. Espectros ópticos de un ISPM cuando cambia (a) la L_{MCF} y (b) el índice de refracción de los núcleos.

El cambio en el índice de refracción de los núcleos y la longitud de la sección MCF es la ruta que diversos grupos de investigación han explorado y aprovechado en el desarrollo de SFO basados en ISPM para la medición de parámetros físicos. Entre estos se encuentran sensores para la medición de temperatura (Amorebieta et al., 2019; Antonio-Lopez et al., 2014; Rugeland & Margulis, 2012) en los cuales se toma ventaja de la sensibilidad térmica de las MCFs. Esta sensibilidad es propia de efectos térmicos que inducen un cambio en el índice de refracción y la longitud de la MCF, conocidos también como termo-óptico (ETO) y termo-expansión (ETE), respectivamente. La porción de cambio en la MCF, por cada $^{\circ}\text{C}$, es definido por el coeficiente termo-óptico y el coeficiente de expansión térmica del material. Para el caso de una fibra óptica de sílice fundida, los coeficientes son, respectivamente, $\sim 9.2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y $\sim 0.5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Hsu et al., 2000). En los ISPM de temperatura, el espectro óptico tiene un desplazamiento a longitudes de onda largas que es generado únicamente por el cambio en el índice de refracción de los núcleos, esto debido a que prevalece la influencia del ETO respecto al ETE (Amorebieta et al., 2019).

Los trabajos se han enfocado también en el desarrollo de ISPM de doblamiento con los cuales se pueden disponer de SFO para la medición de curvatura, vibración, y aceleración (Amorebieta et al., 2020; Villatoro et al., 2017). En este tipo de dispositivos, el doblamiento induce en la sección de MCF un cambio significativo en el índice de refracción de los núcleos. Esto debido a que, en la dirección de doblamiento, respecto al eje neutral (eje del núcleo central), los núcleos vecinos tienden a sufrir una compresión/tensión de su estructura de tal forma que cada núcleo es sometido a diferentes niveles de deformación; por consiguiente, un cambio del índice efectivo de los SPs se induce. Además de la variación en el índice efectivo, la perturbación de la geometría uniforme de la MCF lleva a un cambio del perfil modal, donde las condiciones para la transferencia máxima de energía cambian (Snyder, 1972). En este sentido, el espectro óptico de un ISPM sometido a doblamiento tiende a desplazarse sobre el rango de longitudes de onda; así mismo, se presenta un cambio en la potencia (ΔP_N). Por otra parte, la asimetría que presentan algunas MCF en la distribución de sus núcleos es una característica que le da un plus a los ISPM para el desarrollo de SFOs de doblamiento sensibles a la dirección. De acuerdo, al sentido en el que se aplica el doblamiento respecto a la orientación de los núcleos será el sentido en el que cambia ΔP_N y $\Delta \lambda_{SPM}$ (Amorebieta et al., 2021; Arrizabalaga et al., 2020; Villatoro et al., 2020).

El diseño y la fabricación de una MCF con sus núcleos distribuidos de forma simétrica/asimétrica abren la posibilidad de desarrollar un abanico de DFOS novedosos, los cuales pueden tener funcionalidades superiores a los DFOS basados en SMF. Entre las cualidades que poseen las MCFs, respecto a otro tipo de fibras ópticas especiales, es la compatibilidad que tienen para operar con elementos ópticos basados en SMF estándar debido a que la apertura numérica de los núcleos de la MCF se considera similar al del núcleo de una SMF lo que reduce las pérdidas por inserción provenientes de empalmes por fusión. Así mismo estas fibras ópticas poseen la capacidad para combinarse con otras tecnologías de SFO (Amorebieta et al., 2022) con el fin de obtener esquemas de medición avanzados, multiparamétricos, y prácticos.

2.3.2 Fibras con Rejillas de Bragg

La fotosensibilidad de las fibras ópticas y las técnicas de microfabricación láser han permitido desarrollar DFOS con características únicas de los que se ha tomado ventaja para aprovecharlos tanto en el campo de las comunicaciones por fibra óptica como en el de sensores de fibra óptica, es el caso de las rejillas de Bragg en fibra (FBG). Como su nombre lo indica este dispositivo se basa en una rejilla generada externamente en el núcleo de una SMF, en la Fig. 22 (a) se observa una representación de este dispositivo. La rejilla es en realidad una modificación periódica, con periodo Λ_{FBG} , del índice de refracción de una sección del núcleo de una SMF de una longitud L_{FBG} , la cual puede típicamente tener un tamaño comprendido entre 2-40 mm. En cada uno de los planos de estos dispositivos se satisface la condición de Bragg por lo que el modo propagante en el núcleo de la fibra óptica se acopla a otro modo con igual índice efectivo pero que se propaga en sentido contrario. La luz reflejada en cada una de los planos subsecuentes de la rejilla se adiciona de forma constructiva en dirección contraria para formar una señal reflejada, como se ve en la Fig. 22(b), con un pico centrado en la longitud de Bragg definida como

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda_{FBG} \quad (47)$$

Donde n_{ef} es el índice efectivo del modo fundamental del núcleo y, la longitud física de Λ_{FBG} es de unos cuantos nm, comúnmente, varía entre 0.25 -0.5 μm .

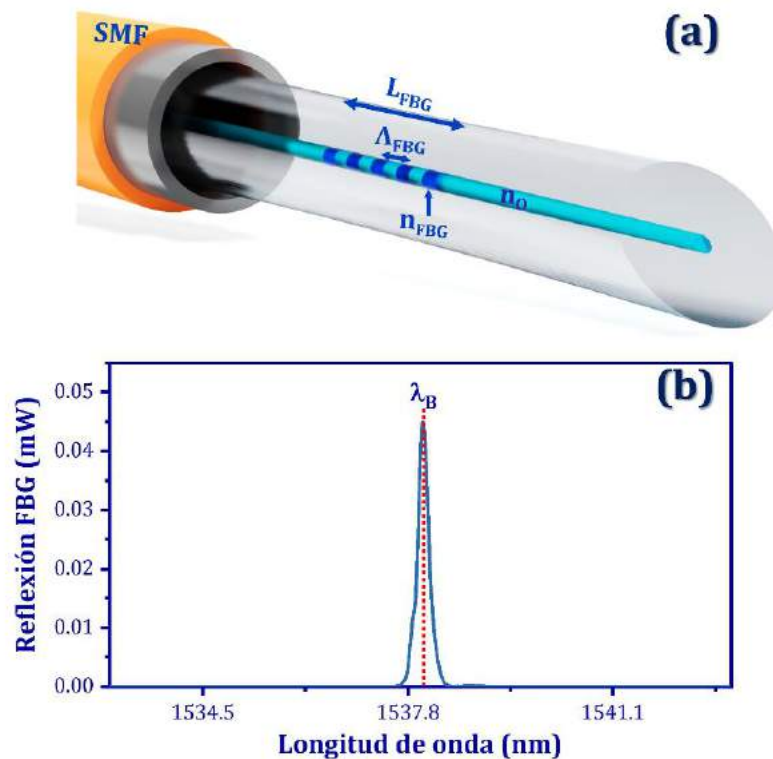


Figura 23. (a) Representación de una rejilla de Bragg inscrita en el núcleo de una SMF. (b) Espectro de reflexión de una FBG.

Existen dos métodos principalmente para la inscripción de las rejillas de Bragg en una fibra óptica, los cuales se basan en fenómenos ópticos como: (1) fotosensibilidad y (2) absorción de fotones (Daud & Ali, 2018). En el primer método se toma ventaja de la fotosensibilidad del SiO_2 (o de SiO_2 dopado con GeO_2) del que está hecho el núcleo de la fibra óptica para inducir un aumento en su índice de refracción. Esto a través de someter el núcleo a la radiación del patrón de interferencia de un láser UV (Nguty & Potton, 1997). Las fibras ópticas con núcleo de SiO_2 dopadas con GeO_2 han demostrado una mayor fotosensibilidad por lo que son más apreciadas en el grabado de las rejillas. Otra manera de aumentar la fotosensibilidad del SiO_2 es a través de la hidrogenación, es decir someter a las fibras ópticas a una atmósfera de hidrógeno a alta presión. Durante la exposición a radiación UV las moléculas H_2 aumentan la absorción de la radiación UV ayudando a generar el cambio en el índice de refracción de forma permanente (Lemaire et al., 1993). El segundo método de inscripción de rejillas de Bragg es a través de la generación de defectos secuenciales en forma de puntos, líneas, o planos en el núcleo de la fibra óptica por medio de la exposición a la radiación de un láser de femtosegundo focalizado en el núcleo (Fuerbach et al., 2019). La alta densidad de energía del pulso induce a que en el material se dé la absorción de fotones sobre el

punto focal y, en consecuencia, el índice de refracción aumenta respecto a su valor inicial n_0 . Este último método de fabricación ha alcanzado la madurez tecnológica lo que ha permitido que las FBG sean fabricadas de manera eficiente y que se haya conseguido la estabilidad térmica, factores que han propiciado que ahora sean uno de los dispositivos más apreciados en el campo de los sensores de fibra óptica particularmente para la medición de temperatura (Przhiialkovskii & Butov, 2021).

Las FBGs son intrínsecamente sensibles a temperatura y esfuerzo, magnitudes que afectan directamente el n_{ef} y el Λ_{FBG} , el cambio en uno o ambos parámetros conlleva a un cambio en la condición de Bragg, que se aprecia como el desplazamiento de λ_B . Este se expresa como

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda_{FBG} \frac{\partial n_{ef}}{\partial L_{FBG}} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda_{FBG}}{\partial L_{FBG}} \right) \Delta L_{FBG} + 2 \left(\Lambda_{FBG} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda_{FBG}}{\partial T} \right) \Delta T \quad (48)$$

Siendo ΔT el cambio de temperatura y ΔL_{FBG} el aumento o disminución de la longitud física de la FBG generada por un esfuerzo aplicado. La información respecto al cambio inducido por el parámetro a detectar es codificada en términos de longitud de onda, particularmente este mecanismo permite eliminar el problema de las fluctuaciones en la intensidad de la señal. La banda estrecha de la señal reflejada de las FBGs es otra de las cualidades que las hace atractivas en el campo de los SFOs, y se define por su ancho a media altura (FWHM: *Full Width at Half Maximum*) que varía en un rango de 0.1-1 nm. Esta fineza en el FWHM determina la resolución que se puede alcanzar en la medición de estas magnitudes utilizando las FBGs; además, brinda la posibilidad de utilizar varias FBGs en una misma fibra óptica ya que las señales de múltiples FBGs, con distintas λ_B , pueden ser multiplexadas sin interferir entre sí sobre un rango de longitudes de onda (Baldwin, 2005).

Aunque las FBGs son mayormente conocidas en el desarrollo de SFOs de esfuerzo y temperatura (Othonos, 1997), diversos grupos de investigación se han apoyado de las tecnologías de materiales, así como de nuevas técnicas de fabricación, para desarrollar SFOs de desplazamiento (H. Li et al., 2021; T. Li & Ren, 2017; Thomas et al., 2020), campo magnético (Peng et al., 2022; Schukar et al., 2016), presión (Hong, Yuan, et al., 2019; Y. Zhao et al., 2018), vibración (T. Li et al., 2020; J. Wang et al., 2017) y flujo (Allil et al., 2021; L. Cheng et al., 2023; Hong, Zhang, et al., 2019). En la Tabla 4 se

presenta la sensibilidad reportada para estos SFOs basados en FBGs. No obstante, los trabajos de investigación respecto a las FBGs han sido dirigidos también hacia el desarrollo de SFOs multiparamétricos (Z. Liu et al., 2020; Q. Zhang et al., 2013). Los SFOs multiparamétricos con FBGs son desarrollados ya sea por (1) la multiplexación de dos o más FBGs (Men et al., 2008; Sengupta & Ghorai, 2015; Wolf et al., 2020; Xu et al., 2020; Yu et al., 2020), o bien, por (2) la combinación con dispositivos basados en otros fenómenos ópticos, tales como los IFOs (Wu et al., 2015; D. Yi et al., 2021; T. Zhang et al., 2019). Estas configuraciones llevan a la combinación de dos o más señales en el espectro óptico del SFO, pero existen diversas técnicas de análisis que permiten decodificar y correlacionar de forma individual el cambio en la señal generada por los parámetros a detectar.

Tabla 4. Sensores de fibra óptica basados en FBGs para la medición de parámetros físicos.

Parámetro físico (P)	Sensibilidad ($\Delta\lambda_B/\Delta P$)	Ref.
Temperatura	13 pm/°C	(Othonos, 1997)
Esfuerzo	1.2 pm/ $\mu\epsilon$	(Othonos, 1997)
Presión	258.28 pm/Mpa	(Y. Zhao et al., 2018)
Desplazamiento	219.69 pm/mm	(T. Li & Ren, 2017)
Fuerza	345.2 pm/N	(T. Li & Ren, 2017)
Vibración	~152.290 pm/g	(J. Wang et al., 2017)

3. Método o Procedimiento de Investigación

En este proyecto se ha planteado el uso de fibras ópticas tanto convencionales como especiales para desarrollar dispositivos ópticos de medición altamente sensibles, confiables y prácticos. Estos dispositivos se apoyan del fenómeno de la interferencia óptica. Particularmente en este trabajo nos enfocamos en dos esquemas interesantes y que brindan la oportunidad de medir múltiples parámetros físicos, tales son (1) el interferómetro supermodal y (2) el interferómetro Fabry-Perot. En la Fig. 24 se muestra el diagrama de la metodología planteada en este proyecto doctoral, y con la que se ha podido alcanzar los objetivos propuestos. En este capítulo se describe con detalle cada una de las etapas de esta metodología de investigación.



Figura 24. Diagrama de la metodología de investigación.

3.1 Simulación

En esta primera etapa se trabajó en la simulación los modos excitados, así como la propagación de la luz tanto en fibras ópticas convencionales como en fibras ópticas especiales. En este trabajo se utilizan tres distintos MCFs, las fibras ópticas de 3 (MCF₃) y 7 (MCF₇) núcleos, las cuales fueron fabricadas y proporcionadas por el grupo de Microstructured Fiber and Devices del College of Optics and Photonics (CREOL), así como una fibra de 2 (MCF₂) núcleos fabricada por Leibniz Institute of Photonic Technology (IPHT). Para el análisis de estas fibras ópticas se recurre al uso de MODE LUMERICAL, este es un software especializado que permite el modelado de dispositivos fotónicos. MODE provee de un análisis de la frecuencia modal y el campo espacial sobre estructuras de guías de ondas (planas y cilíndricas) y con longitudes de

propagación largas, esto a través de: FDE solver (*Finite difference mode*) y EME solver (*Eigenmode expansion*).

3.1.1 Análisis modal: 2D

La simulación de los modos soportados en una fibra óptica es realizada a través del FDE solver. En la Fig. 25 se presenta la interfaz del simulador MODE LUMERICAL, resaltando cada una de las secciones esenciales para realizar el análisis modal de una fibra óptica. La numeración de cada sección corresponde a la metodología que se sigue para este análisis, y se describe como:

1. Modelo. Dentro del diagrama de árbol se crea el modelo de la fibra óptica que se desee analizar. Partiendo desde un plano 2D-XY en el punto de origen (0,0), figuras correspondientes a cilindros (y/o hexágonos) son insertadas una por una dentro del área del modelado. Dentro de cada una de las figuras geométricas se le asigna una etiqueta de identificación, así como sus características tanto geométricas como ópticas: dimensión, posición, e índice de refracción. En el Anexo C se detalla la forma de configurar los núcleos vecinos para las fibras fabricadas por el CREOL, ya que poseen geometrías hexagonales. También se detalla la forma en la que se configura en el plano XY los núcleos distribuidos alrededor del núcleo central.

2. FDE solver y enmallado de regiones. En este mismo diagrama de árbol, se asigna el FDE solver para el cálculo de los modos soportados en una sección 2D de la estructura de la fibra óptica. Aquí se define la región de análisis (marcado en naranja dentro de la vista XY), su área abarca tanto los núcleos como parte del revestimiento. Entre las configuraciones que se les asigna al FDE solver, se encuentra la geometría del enmallado. Un enmallado con un tamaño de cuadrícula fino debe ser implementado cuando la estructura del modelo es compleja, cuando existen interfaces de materiales cercanos o cuando el perfil del campo cambia rápidamente. Por otro lado, este se puede asignar con una cuadrícula gruesa, e implementar un enmallado de regiones haciendo una cuadrícula más fina en el área en la que se encuentra el (los) núcleo(s).

3. Parámetros del análisis. En esta sección se asigna las condiciones iniciales para el análisis de los modos soportados en el modelo de la fibra óptica. Se establece la longitud de onda/frecuencia de la luz que excita a los modos soportados en la fibra óptica. Se define el número de modos que se desea obtener dentro del modelo y se asigna el valor del índice de refracción máximo; es decir el del (de los) núcleo(s). Los modos poseen un índice de refracción efectivo, n_{ef} , cuyos valores se encuentran en el rango $[n_r, n_o]$ siendo $n_o > n_r$. Una vez definido se procede a calcular los modos.

4. Análisis de las soluciones. En esta sección se despliegan las soluciones obtenidas para los modos soportados en el modelo de la estructura. El FDE solver arroja una lista de las propiedades de los modos soportados tal como el índice efectivo, pérdida, polarización y el perfil del modo (distribución de la intensidad), siendo este último y sus índices efectivos las propiedades que únicamente resultan de nuestro interés.

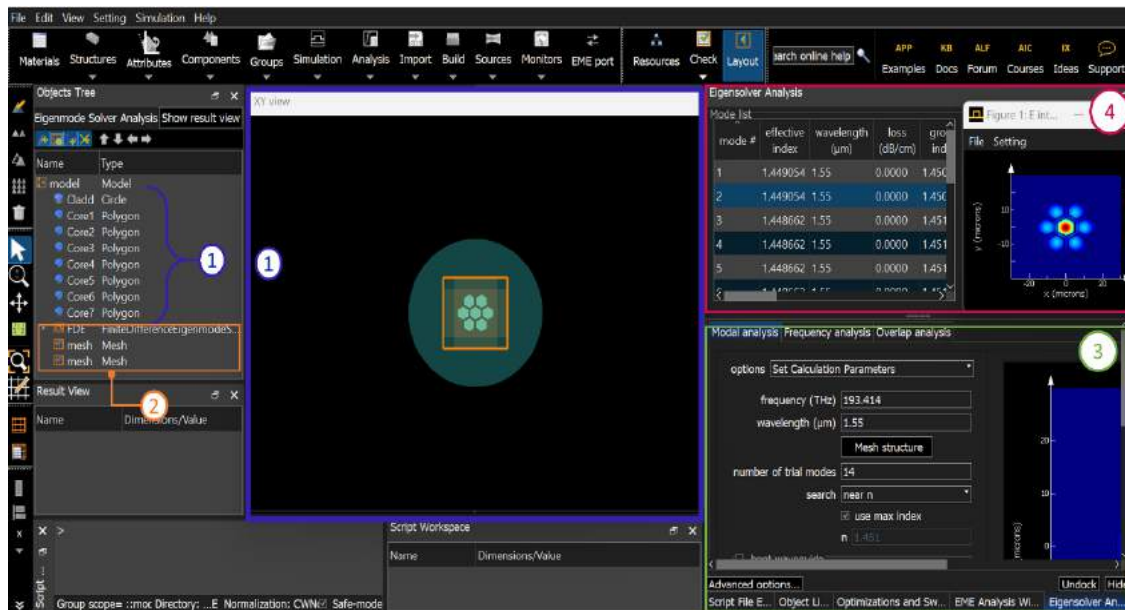


Figura 25. Interfaz gráfica del software MODE LUMERICAL con el solucionador FDE.

La metodología, descrita para el cálculo de los modos soportados en una estructura de fibra óptica modelada, fue aplicado para el análisis de los modos soportados para una fibra monomodo y para fibras ópticas multinúcleo (2, 3, y 7 núcleos). La

simulación de estas fibras ópticas nos permite conocer aquellos dos supermodos a considerar en el principio de la transferencia de energía, y que pueden ser explotados para generar el fenómeno de interferencia explicado en la sección 2.3.1.2. En la Fig. 2 se observa el perfil del modo fundamental soportado por una SMF obtenido del análisis de su modelo. En la Fig. 4, 7, y 8 se presenta el perfil de los supermodos excitados en las estructuras de una MCF₂, MCF₃, y MCF₇, respectivamente.

3.1.2 Propagación del campo modal: 3D

Otro de los intereses de este trabajo se enfoca en el análisis de la propagación del campo modal (plano XY y propagación en Z), principalmente, en las estructuras de MCFs, esto con el fin de entender de forma visual el principio físico basado en la transferencia de energía (sección 2.2.1.2) generada cuando los supermodos se propagan sobre L_{MCF} . En la Fig. 26 se muestra la interfaz gráfica resaltando la metodología seguida en la simulación 3D para el análisis de la propagación de la luz en una fibra óptica. Para este caso, se recurre al uso del EME solver realizando los siguientes puntos:

- 1. Modelo.** Para el modelo de la fibra óptica se diseña su sección transversal en un plano 2D-XY desde el punto de origen (0,0), tal como se realiza en la simulación del análisis modal. Pero para este diseño, se le asigna una determinada longitud sobre el espacio Z, de esta forma se puede realizar el análisis en 3D.
- 2. EME Solver, enmallado, celdas.** Para la simulación en 3D se asigna el EME Solver. Se define la región de análisis (marcado en naranja dentro de la vista XY y YZ), la cual abarca el (los) núcleo(s), el revestimiento, y la longitud de la fibra óptica. Entre las configuraciones que se les asigna al EME solver, se encuentra la geometría del enmallado, la longitud de onda de la fuente y el número de celdas. Las celdas son colocadas de acuerdo a la cantidad de cambios que exista sobre la longitud de la fibra óptica. Por otro lado, se implementa un enmallado de regiones haciendo una cuadrícula más fina en el área en el (los) que se encuentra el núcleo(s).

3. Modo de análisis EME solver. En esta sección se define las características para el análisis de la propagación del campo modal. Se define los límites de la(s) celda(s) que posee la sección de fibra óptica por la que la luz se propaga, el número de modos soportados (obtenido del análisis modal- 2D), la amplitud de la fuente, y se asigna el puerto (1 ó 2) por el cual inicia la propagación de uno o más modos, considerando que el segundo puerto será el de salida. Una vez definido los parámetros el EME solver comienza el análisis de la propagación en la estructura modelada. El análisis de EME solver se basa en calcular los modos en cada celda de la región definida, para después propagar los campos y calcular la matriz S (matriz de dispersión). Los valores de la matriz S se relacionan con los coeficientes de transmisión y reflexión entre los puertos y modos seleccionados, y su tamaño dependerá del número asignado de estos dos parámetros, es decir, dos puertos y un modo por puerto resultará en una matriz de 2x2. En la vista YZ de la Fig. 26 se puede ver un puerto asignado en cada uno de los extremos de la estructura y, considerando un único modo en cada puerto, se obtiene la matriz S de 2x2 expresada como

$$\begin{array}{cc}
 & \text{Entrada} \\
 & \text{Puerto 1} \quad \text{Puerto 2} \\
 \text{Salida} \quad \text{Puerto 1} & \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \\
 \text{Puerto 2} &
 \end{array} \quad (49)$$

donde S_{11} y S_{22} son los coeficientes de reflexión en los puertos correspondientes a sus subíndices. Mientras que S_{12} y S_{21} son los coeficientes de transmisión de un puerto a otro, en el sentido indicado por los subíndices.

4. Visualización en monitores. Para visualizar la propagación del campo modal dentro de la estructura de fibra óptica, se añade monitores dentro del modelado que permiten ver sobre un plano en 2D su comportamiento. Se puede tener vistas laterales (XZ, YZ) o vistas transversales (XY) sobre determinados puntos en Z. En la Fig. 5(a) se puede observar la propagación de la luz en una MCF₂ modelada, donde la imagen es obtenida de un monitor colocado en el plano YZ con su centro ubicado en (0,0).

5. **Análisis propagación/longitud de onda.** Una vez que el análisis sobre la región de simulación ha sido realizado, se habilita la opción de realizar un barrido sobre una celda que se requiera escanear y analizar en función de las variaciones en su longitud física. Además, se puede realizar un barrido de la matriz S en función de la longitud de onda, definiendo un intervalo y número de puntos a calcular. Esta herramienta permite optimizar los tiempos de análisis ya que no es necesario volver a definir dentro del área de modelado una nueva longitud física de la estructura, así como definir las longitudes de onda una por una.

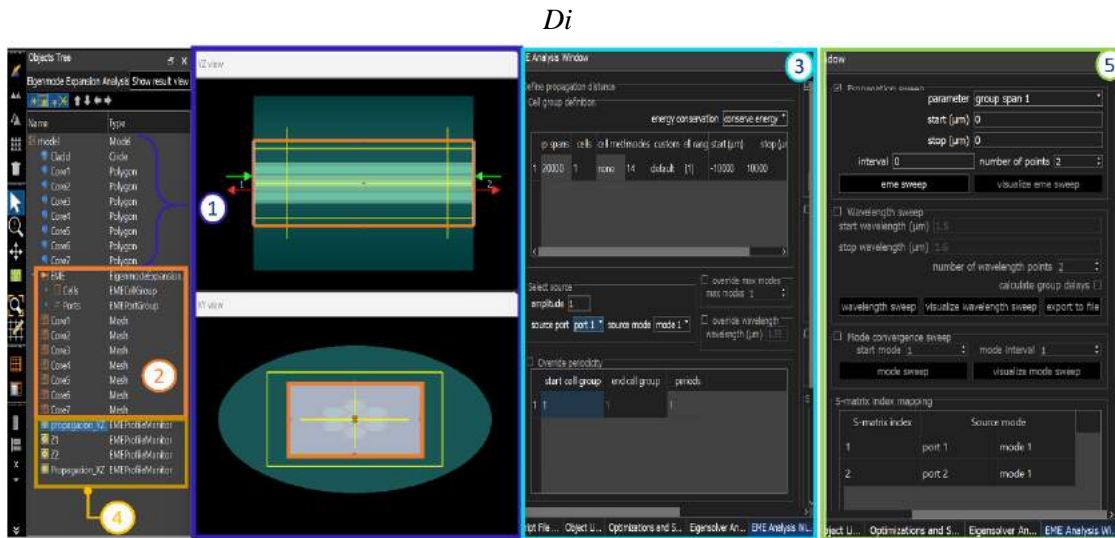


Figura 26. Interfaz gráfica del software *MODE LUMERICAL* con el solucionador *EME*.

3.2 Diseño del DFOS

Tras el análisis de la propagación de la luz y los modos soportados en las fibras ópticas, se procede al diseño de los DFOS en donde tome lugar el fenómeno óptico de interferencia. Por lo tanto, en esta etapa se establecen las condiciones necesarias para acceder a dicho fenómeno. Para este trabajo nos enfocamos en el desarrollo tanto de un esquema Fabry-Perot como de un esquema multimodal basado en supermodos, siendo este último evaluado en *MODE LUMERICAL* a través del *EME* solver. Para el

modelado de un interferómetro supermodal se toma como referencia el esquema visto en la Fig. 19 (a), donde una sección de fibra multinúcleo es empalmada entre dos secciones de fibra monomodo formando un tipo de estructura heteronúcleo. La misma metodología explicada en la sección 3.1.2 es realizada para simular el principio físico del ISPM. Sin embargo, el número de celdas de análisis cambia debido a las transiciones que existen entre distintos tipos de fibras ópticas utilizadas. Como se muestra en la Fig. 27, se configuran tres celdas que corresponden a la sección SMF₁ (*cell 1*), MCF (*cell 2*), y SMF₂ (*cell 3*), respectivamente. Además, se agregan un puerto de entrada en SMF₁ y un puerto de salida en SMF₂ para el cálculo de la matriz S, donde el valor de S_{12} nos describe la señal transmitida sobre la estructura modelada.

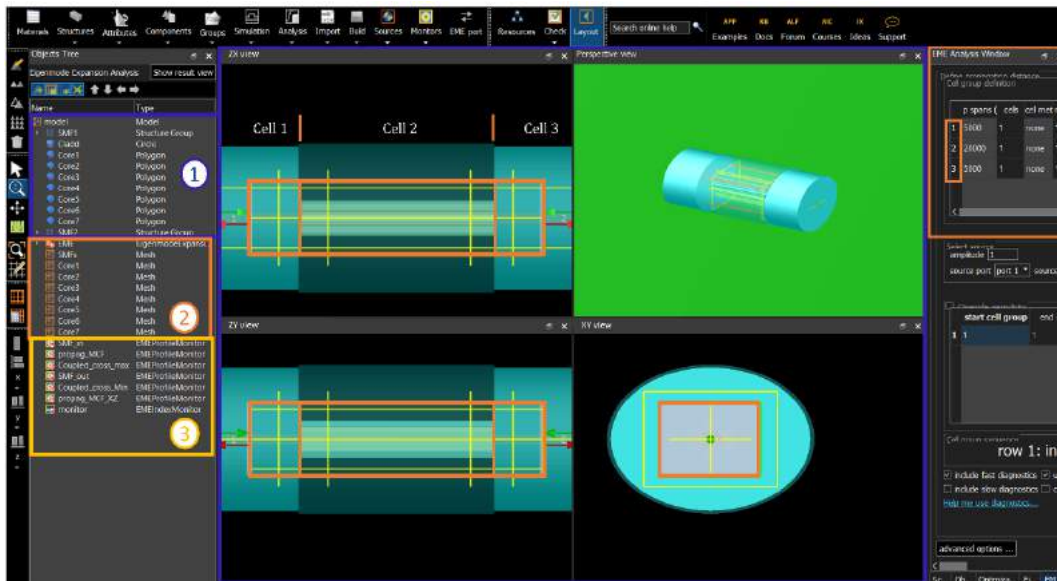


Figura 27. Simulación en MODE LUMERICAL usando EME solver para el modelado de un interferómetro supermodal.

La explicación de esta estructura ha sido abordada con detalle en la sección 2.3.1.2. Sin embargo, en la simulación se busca también tener los parámetros óptimos de la sección MCF del interferómetro que nos provea de un patrón de interferencia que se ajuste sobre el rango de longitudes de onda en el que se trabajará. Previamente se analizó que la respuesta de los ISPMs varía de acuerdo a la diferencia de fase que está relacionada con los índices efectivos de los supermodos y con la longitud física de la sección de la MCF. En el diseño de un ISPM los índices efectivos de los supermodos dependen de las características de diseño de las MCFs, es decir, el diámetro de los núcleos, los índices de refracción de los núcleos y revestimiento, y la separación entre

núcleos. Considerando que la estructura interna de la MCF se encuentra predefinida por el fabricante, el ajuste de la longitud de la fibra óptica permite sintonizar el patrón de interferencia a un FSR y localización de λ_{SPM} deseados, tal como se muestra en la Fig. 22 (a) de la sección 2.3.1.2. En las subsecciones siguientes se describe el diseño de los interferómetros que se proponen en este trabajo utilizando cada una de las MCF para la medición de diversos parámetros.

3.2.1 Dispositivo en Punta: SMF-MCF₇

Los SFOs basados en interferómetros supermodales que han sido propuestos hasta ahora, toman como principio de operación la modificación de la sección MCF en relación a la magnitud del parámetro a detectar. Bajo este entendido, la investigación nos ha llevado a plantear el desarrollo de nuevos dispositivos donde el principio de operación sea distinto a lo ya reportado. Para esta propuesta se utiliza una MCF₇ conformada por un núcleo central y de seis núcleos a su alrededor con los que se tiene una distribución de forma simétrica. Cada uno de los núcleos tiene un diámetro de $\phi_0 = 9 \mu\text{m}$, y una separación centro-centro de $\Lambda = 11 \mu\text{m}$. En la Fig. 28 (a) se muestra una foto de la sección transversal de la MCF₇ que se utiliza para el desarrollo del dispositivo en punta, explotando el área activa creada por los 7 núcleos distribuidos para el desarrollo de un dispositivo de fibra óptica en punta, tal como se muestra en la Fig. 28 (b), en el cual el haz de salida pueda ser utilizado en un esquema IFPF-E.

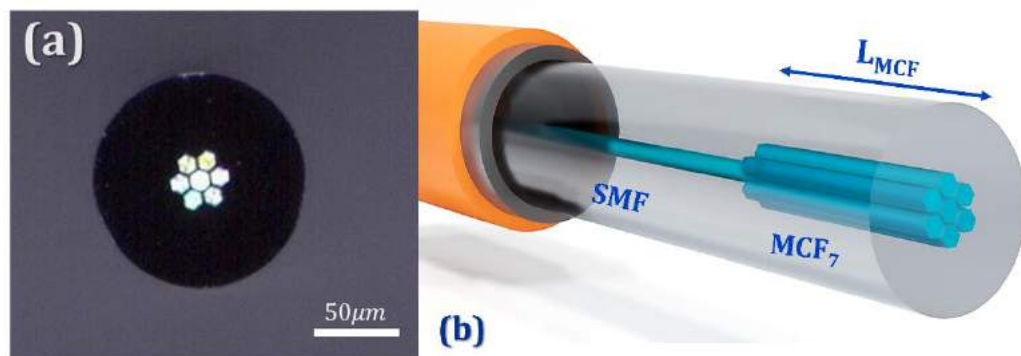


Figura 28. (a) Foto de la sección transversal de la MCF₇. (b) Representación del interferómetro supermodal en punta: SMF-MCF₇

Para el diseño de este dispositivo con la simulación se busca analizar el efecto que tiene L_{MCF} en el haz de salida y determinar la longitud óptima para el desarrollo de un sensor físico. Para tener una L_{MCF} óptima se deben considerar determinados aspectos en la propagación de la luz y la respuesta del dispositivo. En la Fig. 29 se puede observar estas dos características para dos L_{MCF} distintas. En el caso de una L_{MCF} de 5.2 mm (Fig. 29 (a)) se alcanza al final de su sección una interferencia constructiva, ya que la energía se encuentra concentrada en el núcleo central. Además, en la respuesta del dispositivo, descrita por la Ec. 45 donde su fase acumulada posee dos veces L_{MCF} , se puede apreciar un máximo sobre un rango de 1510-1590 nm. La potencia máxima se encuentra centrada en ~1550 nm, longitud de onda ubicada en la Banda C (Convencional) donde se tiene bajas pérdidas en los sistemas de fibra óptica. Aunque la interferencia constructiva es la condición deseada en los interferómetros, para la aplicación que se desea estudiar no es la mejor condición. Como se ve en la vista XY de la Fig. 29 (a) la energía se encuentra concentrada en la región del núcleo central y, cuando la luz emerge de la MCF_7 tiene el mismo comportamiento que la luz que emerge de una fibra convencional, es decir el diámetro del haz crece conforme el haz se propaga. Esto no es óptimo cuando se requiere incidir la luz sobre la superficie de un objeto localizado a una distancia larga (>1 cm). Para evitar este inconveniente se puede tomar ventaja de tener una interferencia destructiva en el extremo de la MCF_7 . Por lo tanto, se hizo el análisis y se encontró que a una L_{MCF} de 9.2 mm se puede tener esta condición, tal como se muestra en la Fig. 29 (b). En la vista XY de dicha figura se aprecia que la energía se encuentra distribuida en los núcleos de alrededor del núcleo central. Esta distribución permite que el haz que emerge de la sección transversal de la MCF_7 tenga un diámetro mayor a la salida. Aunque la interferencia destructiva es generada en el extremo de la MCF_7 con una L_{MCF} de 9.2 mm, es importante notar que su espectro óptico simulado a ~1550 nm se encuentra localizado a la potencia máxima debido a una interferencia constructiva generada en la condición de dos veces L_{MCF} , tal como se muestra en la Fig. 29 (b). Por lo tanto, el dispositivo en punta, SMF- MCF_7 , puede considerarse con un rendimiento óptimo para una L_{MCF} de 9.2 mm.

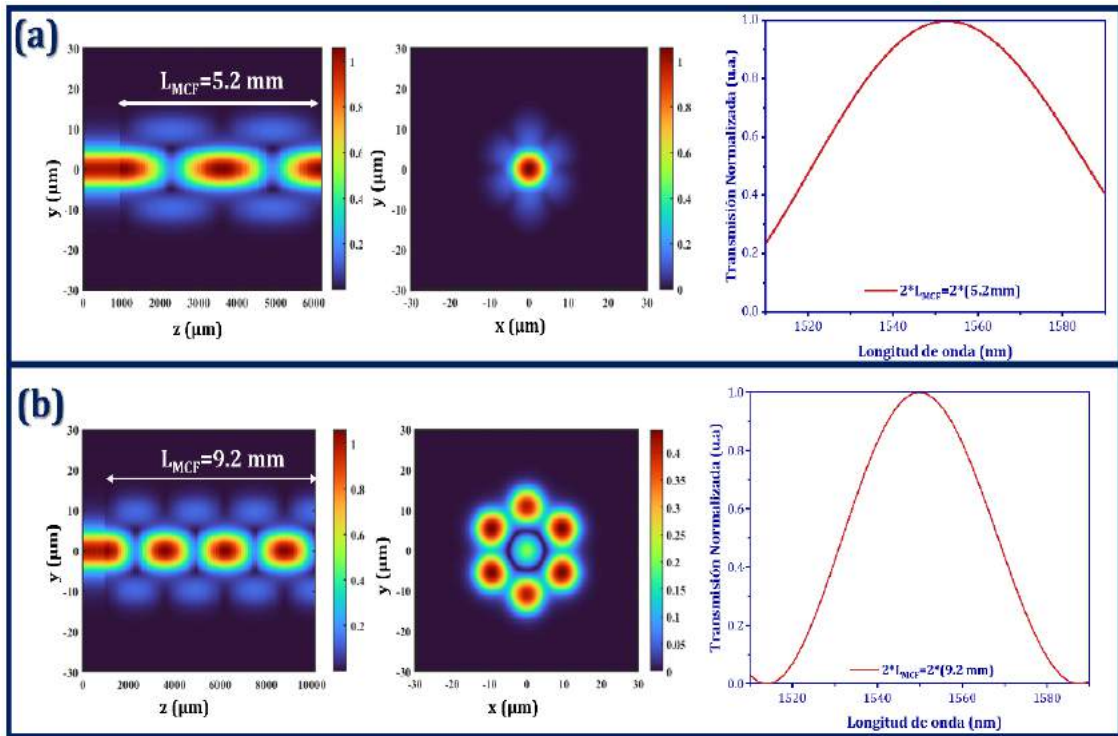


Figura 29. Análisis de la propagación de la luz, distribución de la energía en los núcleos y espectro óptico simulado (señal transmitida en la condición de $2 * L_{MCF}$) del dispositivo en punta para una L_{MCF} de (a) 5.2 mm y (b) 9.2 mm.

3.2.2 Dispositivo Híbrido en Reflexión: ISPM (MCF₃) + FBG

El principio de operación de los SFOs basados en ISPM se centra en seguir la posición de λ_{SPM} del patrón de interferencia en relación al cambio ejercido por el parámetro a detectar. Aunque el seguimiento de un máximo (o mínimo) en la respuesta de los DFOSs resulta un método de análisis bastante simple, se compromete la sensibilidad, pero especialmente la resolución, del SFOs que operan bajo este mecanismo. Esto debido a que en muchas ocasiones la búsqueda del punto máximo (o mínimo) sobre espectros con FWHM grandes se vuelve poco preciso. Ante este inconveniente, en este trabajo se busca mejorar el rendimiento de los ISPMs implementando nuevas estructuras que permitan tener un principio de operación más

óptimo. Para esto se plantea el desarrollo de un DFOS híbrido conformado por un ISPM y una rejilla de Bragg, los cuales se encuentran conectados en serie. En este caso se utiliza una MCF₃ conformada por un núcleo central y dos núcleos laterales a la misma distancia del central formando una distribución asimétrica. Cada uno de los núcleos tiene un $\varnothing_0 = 9 \mu\text{m}$, y una separación de centro-centro de $\Lambda = 11 \mu\text{m}$. En la Figura 30 (a) se muestra una fotografía de la sección transversal de la MCF₃ que se utiliza en el ISPM, y una representación del DFOS híbrido puede verse en la Fig. 30 (b).

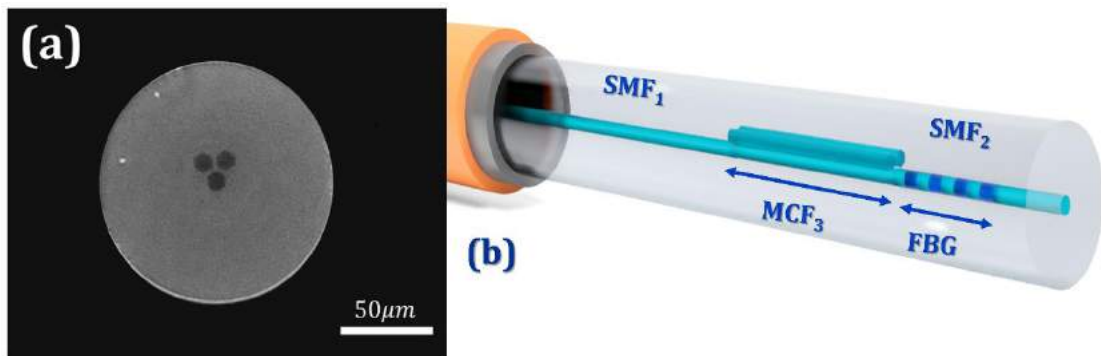


Figura 30. (a) Foto de la sección transversal de la MCF₃. (b) Representación del dispositivo híbrido en reflexión formado por un interferómetro supermodal y una fibra con rejilla de Bragg conectada con la MCF₃.

El propósito de este diseño va dirigido al desarrollo de un SFO interrogado en intensidad, es decir, en seguir las variaciones de intensidad a una determinada longitud de onda generadas por la perturbación externa que se desea detectar. La FBG dentro del DFOS actúa como un elemento para transformar los corrimientos del patrón de interferencia de la MCF₃ en cambios de intensidad, recordando que el pico de reflexión de este dispositivo tiene un FWHM $\sim 0.1-1 \text{ nm}$. Es conveniente que la longitud de onda λ_B no coincida con la λ_{SPM} de un máximo del espectro de interferencia, sino a la longitud de onda (λ_Q) donde se localice el punto de cuadratura (punto Q) sobre el patrón de interferencia. El punto Q en el espectro óptico se determina cuando la fase corresponde a $\phi_{SP} = 2\pi\Delta n_{ef}L_{MCF}/\lambda = (2m + 1)\pi/2$ y donde la intensidad de la señal es 0.5 de la intensidad normalizada. La técnica de punto de cuadratura crea una relación entre el cambio de fase y la intensidad reflejada, es decir, los cambios en la intensidad de la señal de la FBG son generados cuando el patrón de interferencia se desplaza debido a un cambio en su fase en función del parámetro a detectar. En la Fig. 31 se observa el principio de la técnica de punto de cuadratura y donde el punto Q es ubicado en una señal inicial (P_ϕ). Al conectar una FBG cuya λ_B se posicione en la longitud de onda donde se ubica el punto Q la intensidad de su señal reflejada

aumentará cuando el espectro ($P_{\phi+}$) se desplace hacia longitudes de onda largas. Mientras que la intensidad de señal reflejada del FBG disminuirá cuando el espectro ($P_{\phi-}$) se desplace a longitudes de onda cortas. La selección de λ_B en el punto-Q de fase permite que el SFO pueda operar de forma lineal en un rango definido por la pendiente formada entre los puntos de un máximo y un mínimo, λ_{SPM}^{max} y λ_{SPM}^{min} . Además, el SFO posee una sensibilidad mayor en contraste al seguimiento en longitud de onda. Una ventaja adicional de esta técnica es la capacidad que le brinda al SFO para poder distinguir la forma en el que el cambio es inducido por el parámetro a detectar.

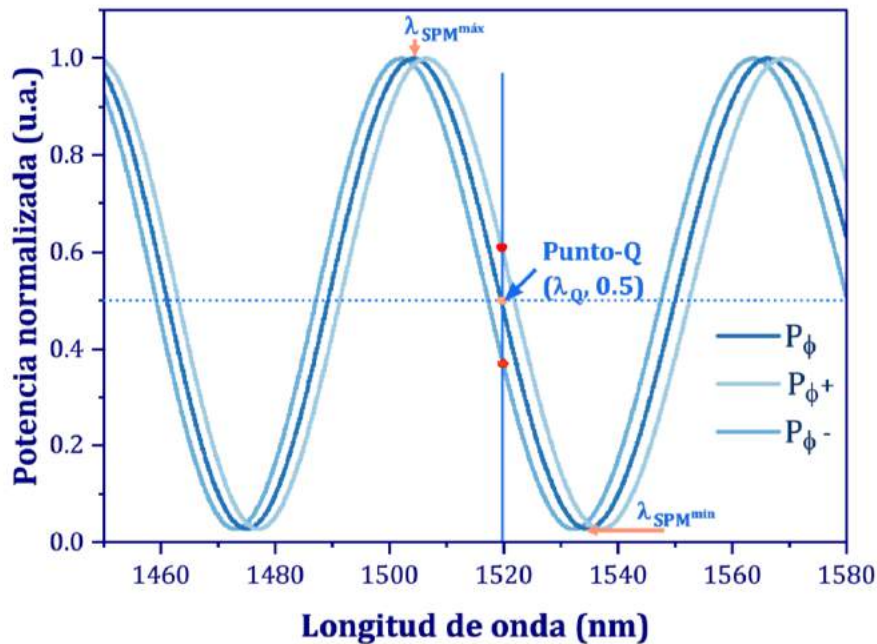


Figura 31. Espectros reflejados de un ISPM variando la fase respecto a la señal de referencia P_{ϕ} , y la ubicación del punto Q .

El desarrollo de este DFOS modulado en intensidad con la técnica de cuadratura, además de mejorar la sensibilidad de los SFOs basado en un ISPM, permite acceder a una medición dinámica donde los cambios generados por el parámetro a detectar ocurren en periodos de tiempos cortos. Así mismo, al tener un ISPM y una FBG conectados se puede tener una medición multiparamétrica de forma simultánea, ya que sus respuestas individuales tienen comportamientos distintos en la detección de dos parámetros físicos. En este sentido, se propone un ISPM en reflexión con una L_{MCF} de 6.2 mm de manera que en su espectro reflejado se aprecia un máximo y mínimo para tener una pendiente donde ubicar en cuadratura el espectro reflejado de una FBG. En

la Fig. 32 se aprecia los espectros individuales de los dos dispositivos, ISPM y FBG, considerados para el diseño del DFOS híbrido en reflexión.

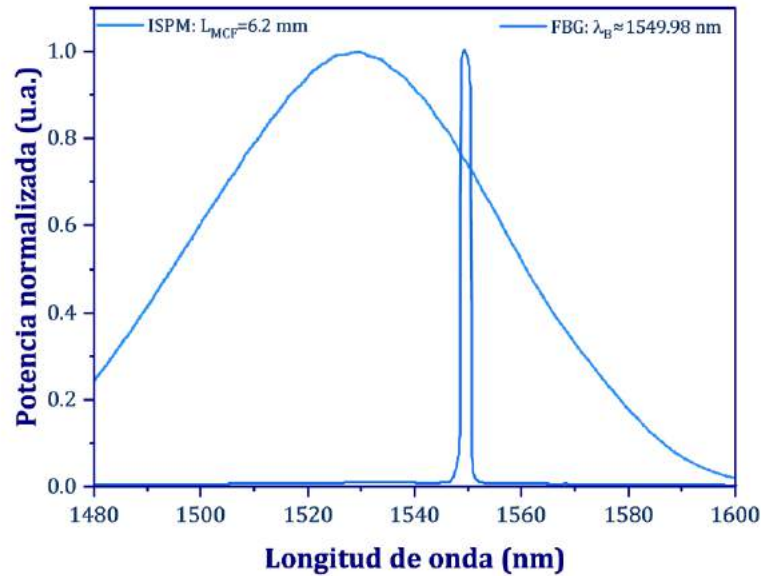


Figura 32. Espectros de reflexión individuales de: una FBG con λ_B ubicada en la pendiente del espectro de un ISPM (MCF_3).

3.2.3 Dispositivo Híbrido en Punta: ISPM ($MCF_2 + FBG$)

En este trabajo se plantea también el desarrollo de un dispositivo híbrido en punta tomando ventaja de una MCF_2 . En este caso se utiliza una MCF_2 con un núcleo central y un núcleo lateral separado a $\Lambda = 13.5 \mu\text{m}$. Cada uno de los núcleos tiene un $\varnothing_0 \approx 8.8 \mu\text{m}$. En la Figura 33 (a) se muestra una foto de la sección transversal de la MCF_2 . En la Fig. 33 (b) se presenta el diseño del DFOS híbrido basado en un ISPM con una MCF_2 en la que se ha inscrito una FBG en cada uno de los núcleos. Aunque la FBG se encuentre inscrita sobre la sección de MCF_2 , su principio de funcionamiento se basa también en la técnica de cuadratura descrita en la sección anterior.

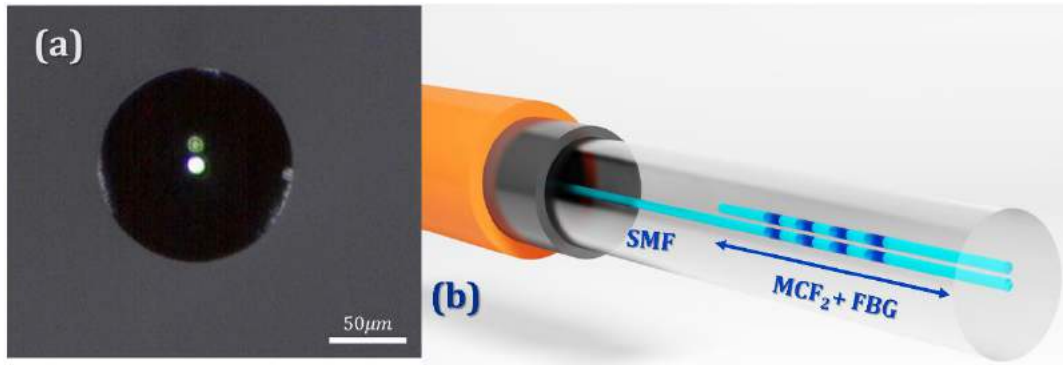


Figura 33. (a) Foto de la sección transversal de la MCF₂. (b) Representación del dispositivo híbrido en punta basado en un ISPM con rejillas de Bragg inscritas en el núcleo de una MCF₂.

Para el desarrollo de este dispositivo se propone un ISPM en punta con una L_{MCF} de 40 mm, esto permite que al menos un máximo y mínimo del patrón de interferencia se encuentren en el rango de longitudes de onda en el que se opera. En este caso la λ_B de la FBG inscrita se posiciona sobre la pendiente entre un mínimo y un máximo, como se observa en la Figura 34.

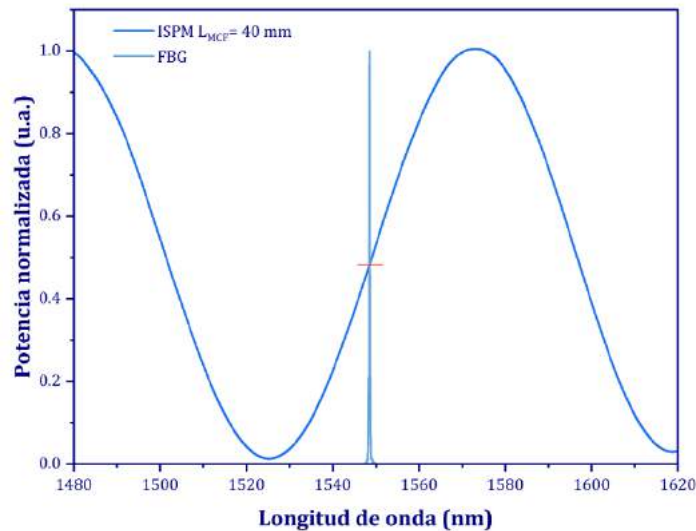


Figura 34. Espectros de reflexión de una FBG inscrita en los núcleos de la MCF₂ de un ISPM con λ_B ubicaao en la pendiente del espectro.

3.3 Fabricación de DFOS diseñados

En esta sección se describe el proceso de fabricación de los DFOS diseñados en la sección 3.2 siguiendo una metodología fácil y reproducible. Los materiales requeridos en la preparación de las fibras ópticas y los equipos usados para la adecuada manipulación de estas durante la fabricación son:

- Peladora de fibra óptica.
- Pinzas de limpieza con hisopos/ toallas sin pelusa.
- Alcohol isopropílico o acetona.
- Cortadora de fibra óptica manual (FITEL S326A) o automática (Fujikura CT-105).
- Empalmadoras (FITEL S326A) y (Fujikura FSM-100P+).
- Montura mecánica de desplazamiento.

La fabricación de los DFOS se realizó dentro de los laboratorios del Grupo de Sensores Ópticos y Microdispositivos (GSOM, CIO), y el Applied Photonic Group (APG, UPV/EHU) y a continuación se describe la metodología aplicada.

3.3.1 Fabricación del Dispositivo en Punta

La metodología detallada a continuación es propuesta para la fabricación de DFOS en punta, considerando primero el diseño del dispositivo descrito en la sección 3.2.1 con una MCF₇.

- 1. Preparación de una SMF.** Con la ayuda de la peladora de fibra óptica se remueve el polímero de una SMF a lo largo de una sección ≥ 20 mm. Luego, con una pinza con hisopos humedecidos de alcohol isopropílico o acetona se limpia la sección del revestimiento descubierto. Es importante tener la precaución, cuando la limpieza se realiza con acetona, de dejar secar la fibra óptica pues este compuesto orgánico volátil daña las superficies de plástico donde sea colocada.

- 2. Corte de la SMF.** Antes de realizar un empalme por fusión es importante realizar un corte “plano” para tener pocas pérdidas por inserción. En este proceso, además, es necesario establecer una metodología para controlar las longitudes de los DFOS basados en MCF y para poder tener un proceso reproducible se tiene algunas consideraciones. Primero, el extremo donde inicia el polímero de la SMF se coloca en un punto de referencia (p_{ref}) sobre la cortadora, tal como se muestra en la Fig. 35 (a). Una vez colocada en la cortadora, el mecanismo con la cuchilla realiza el corte de tal manera que la SMF queda en punta con una superficie plana como se puede ver en la Fig. 35 (b). La longitud de la SMF es igual a la distancia de p_{ref} a la cuchilla, en nuestro caso la longitud es de 10 mm.
- 3. Preparación y corte de la MCF.** Similar al proceso con la SMF, se remueve el polímero de protección de la MCF. La longitud de la sección con el núcleo expuesto debe ser al menos $20 \text{ mm} + L_{MCF}$, donde L_{MCF} es la longitud del dispositivo que se fabricará. Después se limpia la sección del revestimiento y se procede a colocar en la cortadora para su corte. Aquí no es importante colocar el extremo del polímero de la MCF en p_{ref} , pero sí dejar extremo de la MCF con el revestimiento descubierto en el borde final de la cortadora.
- 4. Empalme SMF-MCF.** Se procede a colocar cada una de las fibras ópticas en los sujetadores de la empalmadora, como se muestra en la Fig. 35 (c). Para la fusión de la SMF y MCF se utiliza uno de los programas por defecto para empalmar fibras ópticas convencionales, esto debido a que ambas fibras ópticas son del mismo material. En ocasiones las empalmadoras están configuradas para alinear ambas fibras ópticas por el núcleo. Sin embargo, ajustar la MCF con el núcleo de la SMF le resulta complicado al sistema óptico de la empalmadora debido a los múltiples núcleos. Ante esta limitación se cambia la opción de alineación por *revestimiento*, esto permite colocar ambas fibras ópticas alineadas entre sí a través de sus diámetros de revestimiento. Por lo tanto, el núcleo de la SMF se alinea con el núcleo central de la MCF, tal como se requiere en la configuración de los ISPMs. Una vez alineadas ambas fibras ópticas comienza el proceso de fusión. Aunque ambas fibras ópticas tienen distintas estructuras internas, las pérdidas de inserción resultan bajas debido a la similitud de la apertura numérica entre ambos núcleos alineados. En la sección inferior de la Fig. 35 (c) se aprecia las etapas del empalme por fusión de la SMF y MCF.

5. **Corte final de la MCF con una L_{MCF} .** De acuerdo al diseño del DFOS se debe controlar la L_{MCF} , y bajo este entendido se procede a colocar las fibras ópticas, empalmadas previamente, en la cortadora. En este punto toma relevancia el paso 2, ya que el extremo del polímero es colocado nuevamente en p_{ref} definido en ese paso, esto permite que el empalme SMF-MCF se encuentre ubicado sobre la cuchilla, como se muestra en la Fig. 35 (d). Teniendo esta posición la fibra se desplaza de tal manera que el extremo del polímero se desplace hasta p_{final} . La distancia (d_L) de p_{ref} a p_{final} que se desplaza la fibra óptica lleva a que el empalme se aleje de la cuchilla la distancia deseada, como se muestra en la Fig. 35 (e). Para un desplazamiento de escala μm , las fibras ópticas pueden fijarse a una montura mecánica para controlar mejor este parámetro. En la posición final se procede al corte de la MCF siendo su L_{MCF} igual a la distancia desplazada d_L , como se ve en la Fig. 35 (f).

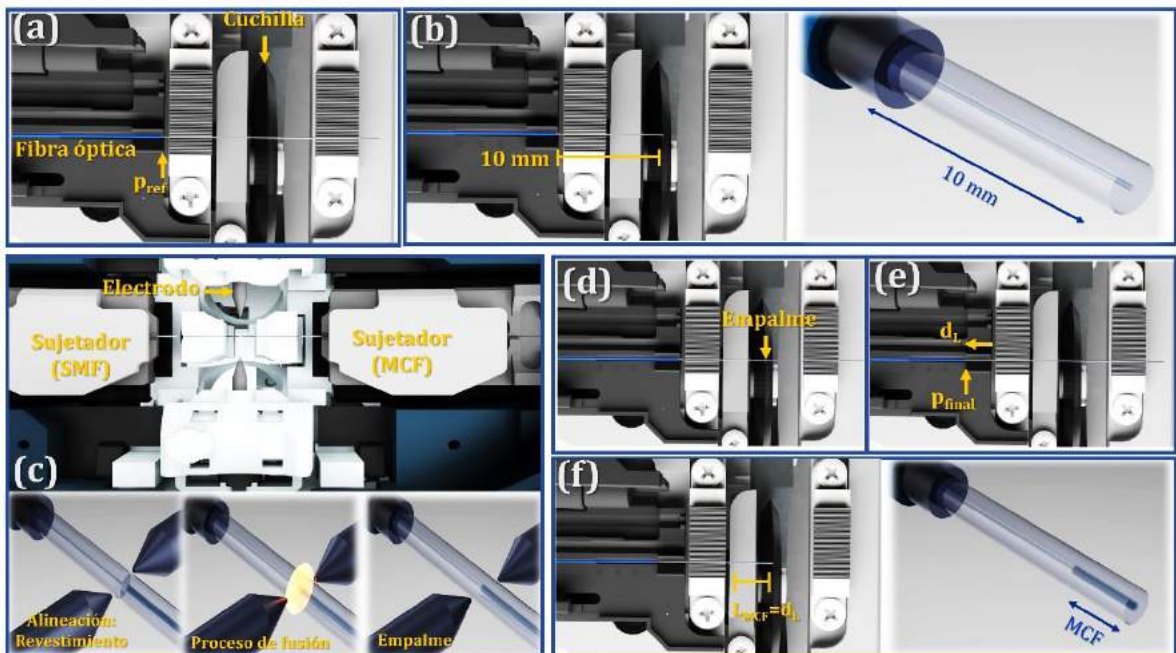


Figura 35. Proceso de fabricación de los DFOS en punta: (a) Posición de la SMF en la cortadora en un punto de referencia, (b) corte de la SMF, (c) empalme de la SMF con una MCF, (d) colocación de la SMF en el punto de referencia nuevamente, (e) desplazamiento de las fibras empalmadas a una distancia d_L respecto al punto de referencia, y (f) corte de la sección de MCF para tener una punta SMF-MCF con una $L_{MCF}=d_L$.

3.3.2 Fabricación del Dispositivo Híbrido en Reflexión

Para la fabricación del DFOS, diseñado en la sección 3.2.2 basado en una MCF₃ y una fibra con una rejilla de Bragg, se realiza la misma metodología del paso 1 al 5 explicada en la sección anterior. El dispositivo fabricado en punta SMF₁-MCF₃ con una L_{MCF} de 6.2 mm, visto en la Fig. 36(a), es empalmado en su extremo libre a una SMF con una FBG inscrita en su núcleo, como se muestra en la Fig. 36 (b). La FBG utilizada fue fabricada por la empresa B-SENS (Mons, Bélgica) con una L_{FBG} de 5 mm y una λ_B centrada en ~ 1549.39 nm. Aunque de acuerdo al diseño de la sección 3.2.2 la λ_B de la FBG debe estar en el punto de cuadratura en $\lambda_Q \approx 1549.98$ nm, su respuesta se encuentra situada dentro del rango de longitudes de onda que abarca la pendiente. Cabe indicar que la sección de la SMF₂ es de 15 mm contemplando que la longitud entre el empalme a la región donde inicia la rejilla de Bragg inscrita es de ~ 2 mm. Por último, al extremo final del dispositivo SMF₁-MCF₃-SMF₂+FBG se le realiza un corte en ángulo α cercano a la región donde termina la rejilla de Bragg inscrita, como se aprecia en la Fig. 36 (c). Este corte se realiza con fines prácticos de visualizar únicamente la señal reflejada de la rejilla de Bragg, la cual será monitoreada como respuesta del DFOS.



Figura 36. Proceso de fabricación del DFOS híbrido en reflexión: (a) Dispositivo en punta basado en una MCF₃, (b) empalme del dispositivo en punta con una FBG inscrita en una SMF, y (c) dispositivo final en reflexión.

3.3.3 Fabricación del Dispositivo Híbrido en Punta con FBG Inscrita

En la fabricación del dispositivo diseñado en la sección 3.2.3, se inicia con la misma metodología del paso 1 al 5. Siguiendo estos pasos se accede a una punta basada en una MCF_2 con una L_{MCF} de 40 mm, tal como ve en la Fig. 37 (a). Una vez teniendo el dispositivo SMF_1 - MCF_2 se empalma en el extremo de la MCF_2 una SMF_2 , como se observa en la Fig. 37 (b). El diseño de este dispositivo implica tener una FBG inscrita en los dos núcleos. Por lo tanto, la inscripción de la FBG en la MCF es realizado por la empresa B-SENS (Mons, Bélgica), para esto se envía el dispositivo fabricado SMF_1 - MCF_2 - SMF_2 . La razón principal para tener una configuración en transmisión como en la Fig. 37 (c), se debe al proceso de inscripción por láser de la FBG, ya que el dispositivo se debe mantener tenso durante la fabricación. Además, de esta manera se puede interrogar en tiempo real la respuesta en transmisión de la inscripción de la FBG en el dispositivo. El dispositivo con la FBG inscrita en los dos núcleos se puede observar en la Fig. 37 (d), la cual tiene una L_{FBG} de 9 mm y una $\lambda_B \sim 1548.3$ nm. Por último, el dispositivo diseñado debe tener una configuración en punta, por lo tanto, se realiza un corte para remover parte de la SMF_2 , el corte se hace en ángulo en la sección transversal de la SMF_2 . Bajo esta metodología se desarrollaron 12 dispositivos en total.

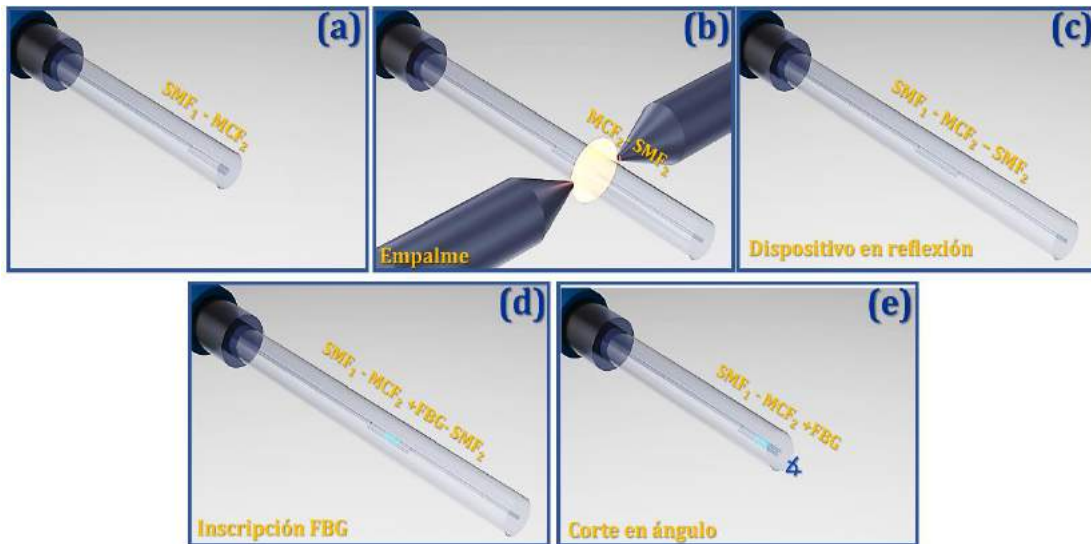


Figura 37. Proceso de fabricación del DFOS híbrido en punta: (a) Dispositivo en punta basado en una MCF₂, (b) empalme del dispositivo en punta con una SMF₂, (c) dispositivo en transmisión, (d) Inscripción de la FBG en los núcleos de la MCF₂, y (e) dispositivo híbrido en punta.

3.4 Caracterización de los SFOs

Una vez fabricados los DFOS, se procede a evaluar el funcionamiento y el rendimiento de estos dispositivos como sensores. Para esto se recurre a su implementación en un esquema de SFOs, lo que implica también la configuración del sistema, los elementos e instrumentos que lo conforman, tanto ópticos (fuentes de luz, acopladores de fibra óptica, detectores, polarizadores, etc.) como mecánicos/electrónicos (monturas de desplazamiento, hornos de temperatura, excitador de vibraciones, etc.), y los cuales permiten poner bajo prueba a los SFOs que se proponen en este trabajo. En esta sección se describe la operación de cada uno de los SFOs propuestos en la detección de: temperatura, distancia, desplazamiento, doblamiento, entre otros. Además, se proponen algunas aplicaciones como en la evaluación de superficies, caracterización de muestras de vidrio fabricadas, detección de deflexiones de micro-cantiléver, detección de impacto, y detección de contacto con sentido de dirección.

3.4.1 SFO Basado en un ISPM en Punta (MCF₇)

En esta sección se evalúa el funcionamiento del DFO diseñado y fabricado en la sección 3.3.1. Este dispositivo está conformado por un ISPM en punta con $L_{MCF} = 9.2$ mm y, cuyas características nos permite incorporarlo en el desarrollo de un SFO de distancia basado en un esquema IFPF-E. El ISPM se explota como elemento para guiar y acoplar la luz que se transmite y refleja dentro de la cavidad del IFPF-E. Tomando ventaja principalmente del área activa formada por el arreglo de 7 núcleos en su sección transversal. A continuación, se describe con más detalle el funcionamiento del SFO de distancia, y en las siguientes subsecciones se describe su uso para la medición/detección de otros parámetros físicos.

3.4.1.1 Distancia

Una representación del sistema del SFO de distancia puede verse en la Fig. 38. El SFO está conformado por un: (1) interrogador (MicronOptics sm125, LUNA), (2) montura de desplazamiento de 1 eje con motor de paso (NRT/150, Thorlabs), (3) montura de desplazamiento de 3 ejes con motor de paso (Nanomax-300, Thorlabs), (4) controlador de motores (BSC203, Thorlabs), y (5) DFOS. Este último es un IFPF-E, donde el ISPM en punta es colocado de forma perpendicular a una superficie reflejante. En nuestro caso, la superficie reflejante es una película de aluminio depositado en la superficie de un portaobjeto y se encuentra fijo sobre el elemento (3). Mientras que el ISPM se encuentra sujeto a una montura magnética (HFV002, Thorlabs) la cual está sujeta en (2). El otro extremo de la fibra del IFPF-E está unido a un conector FC/APC el cual se conecta a una de los canales del interrogador (1). El equipo MicronOptics sm125 posee un láser de barrido en el rango de 1510-1590 nm, así como de un acoplador o circulador que envía la luz al IFPF-E y direcciona la señal reflejada hasta un detector. La señal del interrogador es analizada en una computadora mediante una interfaz gráfica realizada en LabVIEW para observar y adquirir en tiempo real la señal del dispositivo.

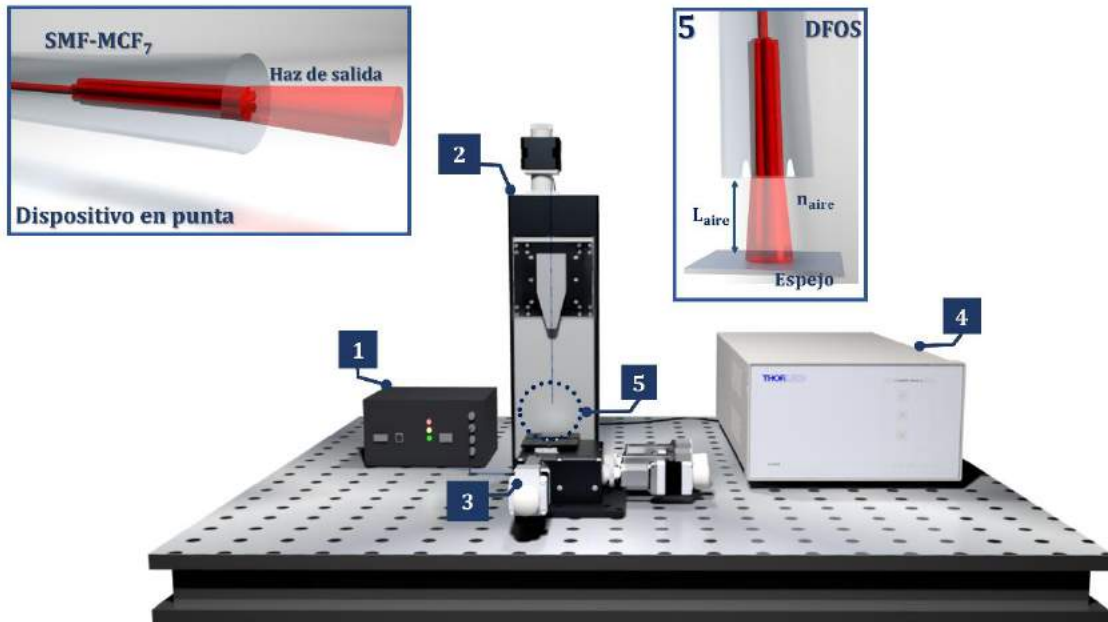


Figura 38. Arreglo experimental de un SFO para la medición de distancia basado en un IFPF-E: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas con ejes X y XYZ; respectivamente, (4) controlador de motores, (5) DFOS.

En este tipo de sensor, las dos características a destacar de su rendimiento son el rango dinámico y la resolución. En el caso del rango dinámico se define como la distancia máxima que el SFO es capaz de medir. Para esto la punta del ISPM se desplaza primero hacia el punto inicial de la prueba a través de (2) y la señal reflejada es adquirida y almacenada. El punto inicial, en este caso, es cuando la superficie de la punta está en contacto con la superficie del espejo, prácticamente no hay cavidad, o espacio de aire, para cumplir la condición del IFPF-E. Después la montura que sujeta la punta de fibra óptica comienza a desplazarse de tal forma que la fibra se separa de la superficie del espejo formando la cavidad del IFPF-E. El desplazamiento (δ) del ISPM es controlado en pasos de 0.1 mm de la posición cero, hasta una distancia de 20 mm. Luego en un rango de 20 mm a 50 mm el desplazamiento se realiza en pasos de 1 mm. En cada posición de la punta de fibra respecto al espejo, la señal reflejada es adquirida para su posterior análisis. En este caso la señal no es analizada en el dominio óptico, con el fin de obtener un valor directo de la cavidad las señales son analizadas en el dominio de Fourier. Este análisis nos permite conocer la LCO del IFPF-E, o bien, la longitud física de la cavidad (L_{aire}) que indica la distancia entre la punta de la fibra y la superficie reflejante.

La resolución se define como la distancia mínima que el SFO puede medir con certidumbre. Para obtener la resolución del SFO se utiliza el elemento (3) del sistema, debido a que con la montura NRT/150 de Thorlabs se dispone de desplazamientos micrométricos. En este sentido, utilizando la montura NanoMax-300 es posible realizar desplazamientos nanométricos, en este caso es el espejo el que se mueve respecto a la punta fibra óptica. Primero, la punta de fibra es colocada a una distancia de ~ 1.29 mm. Luego, el espejo se desplaza en dirección hacia la punta con desplazamientos de $\delta = 500$ nm observando en el espectro de Fourier un desplazamiento del máximo. Este mismo proceso se repite para desplazamiento de $\delta = 100$ y 300 nm, pero en el espectro de Fourier no se observa un cambio significativo.

3.4.1.2 Nanodesplazamiento

Una de las limitaciones que se presentan en el SFO de distancia que se analiza en este trabajo es la detección de desplazamientos nanométricos, la cual está limitada por el análisis de Fourier a una resolución de 500 nm. Es posible mejorar esta resolución si el análisis de la señal reflejada por un IFPF-E se hace en el dominio óptico en lugar del dominio de Fourier. Sin embargo, esto presenta otros retos entre ellos que para medir desplazamientos menores de 500 nm es necesario reducir la longitud de la cavidad de aire a unos cuantos micrómetros. Este requerimiento no siempre es fácil de cumplir o resulta muy impráctico. En este sentido el SFO de distancia basado en un IFPF-E de una única cavidad se configura a uno de dos cavidades, con el fin de poder detectar desplazamientos nanométricos a través del efecto Vernier descrito en la sección 2.3.1.1.2, que ha demostrado ser una estrategia exitosa para mejorar la resolución de los SFOs basados en IFOs. En la Fig. 39 se muestra una representación del sistema para la detección de desplazamientos nanométricos tomando el principio de operación del SFO de distancia descrito en la sección anterior. El DFOS basado en un IFPF-2C está conformado por el ISPM en punta, una cavidad de aire de longitud L_{aire} , y una cavidad de vidrio con un espesor de L_{vidrio} en cuya superficie posterior tiene depositado una película altamente reflejante. De acuerdo a la sección 2.3.2.2, en el efecto Vernier uno de los dos IFOs (o cavidades) es utilizado como un dispositivo de referencia; mientras que, el otro es utilizado como dispositivo de medición. En nuestro caso, la

cavidad de vidrio y de aire corresponden al dispositivo de referencia y de medición, respectivamente.

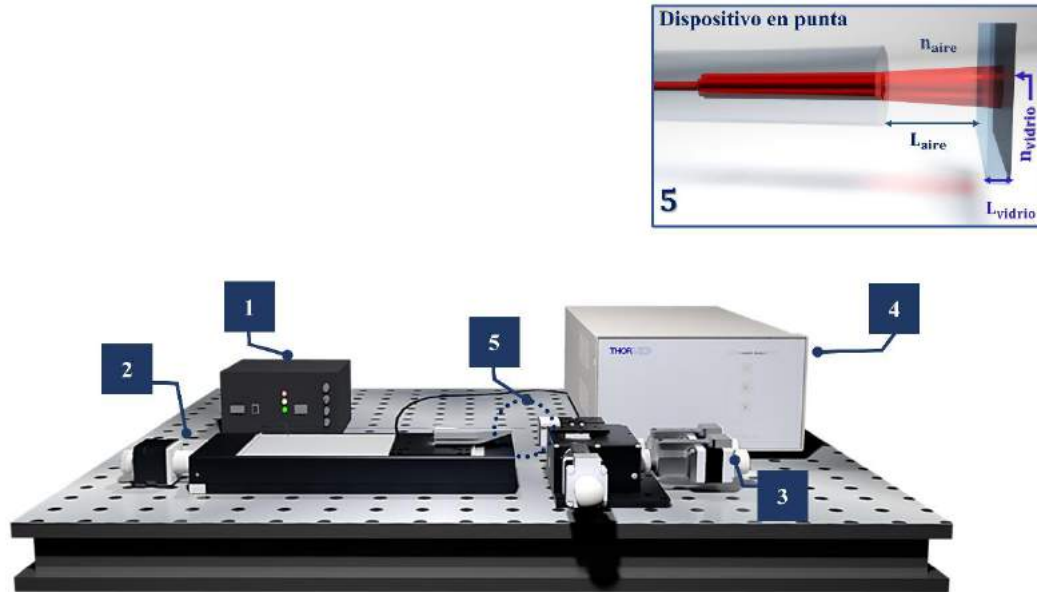


Figura 39. Arreglo experimental de un SFO para la detección de nanodesplazamiento basado en un IFPF-2C: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas con ejes X y XYZ, respectivamente, (4) controlador de motores, (5) DFOS.

Con el propósito de tener un mejor control en el ajuste en las cavidades, el DFOS es configurado en horizontal. Por lo tanto, el elemento (2) es fijado de forma horizontal sobre la mesa de trabajo, mientras que el sustrato de vidrio espejado es colocado en un soporte en forma de L el cual se encuentra fijo en (3). Esto permite tener el sustrato en paralelo con la sección transversal del ISPM. Una vez posicionados ambos elementos el ISPM se desplaza para ajustar la cavidad de aire. La punta se coloca a una distancia donde la longitud de camino óptico de la cavidad de aire (LCO_{aire}) se iguala a la del vidrio (LCO_{vidrio}), $LCO_{\text{aire}} = LCO_{\text{vidrio}}$. El proceso de ajuste se monitorea a través de la señal óptica reflejada en tiempo real, y es analizada en el dominio de Fourier. Debido a que la cavidad de vidrio es fija, en el espectro de Fourier se aprecia únicamente un desplazamiento de la componente de la cavidad de aire conforme el LCO_{aire} se aproxima a LCO_{vidrio} , el cual es igual a 1.6688 mm. Cuando LCO_{aire} se iguala a LCO_{vidrio} , un único pico se aprecia en el espectro de Fourier. En esta condición la

señal óptica del SFO se registra como una señal de referencia que será utilizada en el análisis de la señal del efecto Vernier.

De la posición de referencia se procede a generar la condición del efecto Vernier en el DFOS. Por lo tanto, la cavidad de aire se ajusta de tal manera que su LCO cumpla con la siguiente relación

$$LCO_{aire} = LCO_{vidrio} \pm \rho \quad (50)$$

donde ρ representa la diferencia en el LCO entre ambas cavidades. Se selecciona un ρ^+ de 36.6 μm , y el LCO_{aire} se ajusta para ser igual a 1.7054 mm. El espectro reflejado se registra en este punto inicial, luego se procede a evaluar el rendimiento SFO en la detección de nanodesplazamientos. A través de la montura NanoMax-300 se induce desplazamientos sucesivos de $\delta=0.1 \mu\text{m}$ hasta recorrer una distancia de 1 μm , en cada una de las posiciones se registra la señal reflejada del SFO. Una de las ventajas del DFOS es el grado de libertad que posee para reconfigurar su esquema fácilmente. Teniendo en cuenta que el efecto Vernier se puede cumplir para diferentes valores de ρ , se evalúa el rendimiento del SFO para $\rho=58.6 \mu\text{m}$ y $\rho=80.6 \mu\text{m}$ realizando la misma metodología descrita en el primer caso.

3.4.1.3 Aplicación del SFO: Perfilometría

Un perfilómetro es un instrumento usado para evaluar la calidad de la superficie, identificar defectos, o planificar intervenciones. Los puntos básicos en la operación de un perfilómetro son: alineación, escaneo, procesamiento de datos, y análisis. Bajo esta metodología el funcionamiento del SFO de distancia es aplicado para realizar la técnica de perfilometría sin contacto para evaluar una superficie.

En la Fig. 40 se puede apreciar el esquema del SFO de distancia para su uso como perfilómetro. El DFOS basado en un IFPF-E está conformado por el ISPM y la superficie a evaluar. La superficie es un patrón de calibración reflejante que tiene, de

acuerdo a las especificaciones del fabricante, un perfil escalonado con una altura de $9\ \mu\text{m}$ y un periodo de $100\ \mu\text{m}$. Primero, se alinea la punta de fibra óptica en la base del escalón y a una distancia de $100\ \mu\text{m}$. Después, se inicia el escaneo a través del desplazamiento de la montura NanoMax-300 en pasos de $\delta_{\text{perfil}} = 5\ \mu\text{m}$ sobre una longitud de $250\text{-}300\ \mu\text{m}$. En cada uno de los puntos desplazados se registra el espectro de Fourier obtenido del análisis de la señal óptica reflejada del dispositivo. La posición del espectro de Fourier varía conforme se escanea la superficie. Por lo tanto, la distancia obtenida de Fourier en cada uno de los puntos permite trazar el relieve de la superficie, y obtener sus características como altura y periodicidad. Por último, se evalúa el funcionamiento del SFO cuando la punta de fibra óptica se posiciona a una distancia de $200\ \mu\text{m}$ y $400\ \mu\text{m}$, repitiendo el escaneo de la superficie, así como su análisis.

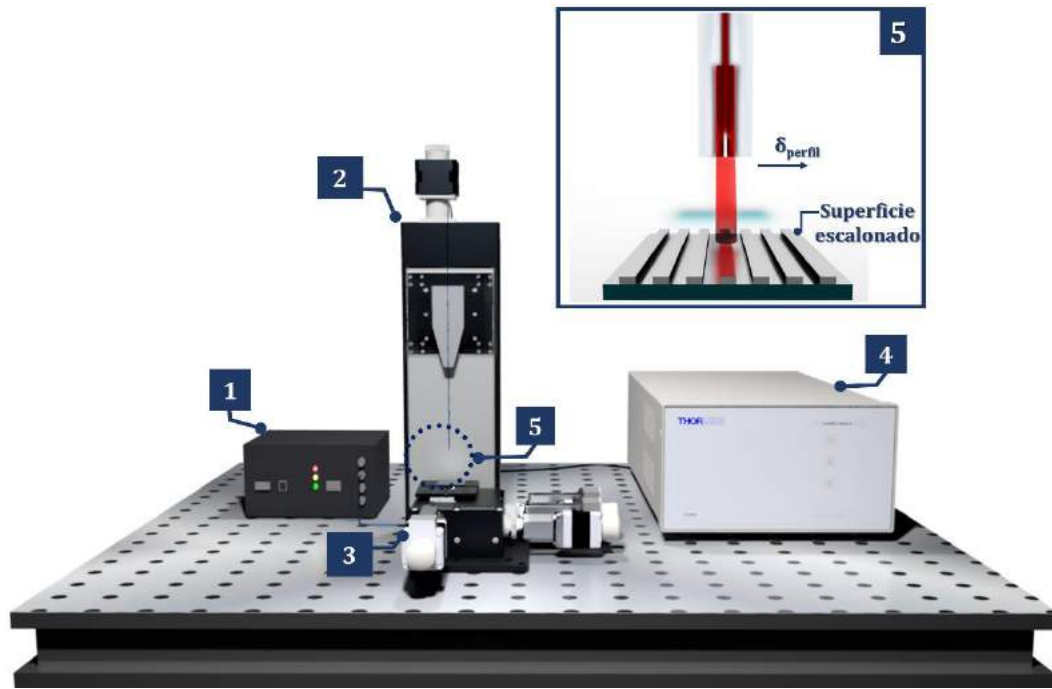


Figura 40. Arreglo experimental de un SFO basado en un IFPF-E para evaluar superficies: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas de con ejes X y XYZ, (4) controlador de motores, (5) DFOS.

3.4.1.4 Aplicación del SFO: Detección de Deflexiones en estructuras micro-cantiléver

El SFO de distancia se propone para el análisis y extracción del estrés superficial sobre estructuras de micro-cantiléver comerciales, los cuales se funcionalizan para la biodetección del anticuerpo albumina de suero bovino (BSA: *Bovine Serum Albumin*). Las estructuras micro-cantiléver (500 x 90 x 1 μm) se encuentran integradas en un chip. El chip está recubierto por una película de titanio de 2 nm para facilitar la adherencia de una película de oro de 25 nm. El chip se somete a un protocolo para la funcionalización e inmovilización de su superficie con el bioreceptor, siendo la proteína BSA a 25 $\mu\text{g/ml}$. Este trabajo se realizó en colaboración con el grupo de investigación del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (responsable: Dra. Daniela Alonso), con el objetivo de obtener el estrés superficial que induce la deflexión del micro-cantiléver por la interacción molecular entre la proteína BSA y el anti-BSA. Para esto se usa el sistema de la Fig. 41, donde el DFOS basado en un IFPF-E está conformado por una punta de fibra óptica y un micro-cantiléver. Para esta configuración se omite el uso del ISPM en punta y en su lugar se usa una SMF, ya que no se requiere de la incidencia de un haz con un ancho reducido por las dimensiones del micro-cantiléver. Debido a la naturaleza de las pruebas, el chip con las estructuras micro-cantiléver se coloca en una celda de fluido impresa por estereolitografía 3D. Esta celda tiene una entrada y salida para el flujo de las muestras líquidas. Además, el diseño de la celda permite que la fibra en punta pueda entrar a través de una abertura en la parte superior. Para evitar las perturbaciones y tener un mejor control durante las pruebas, la celda se fija en la montura NanoMax-300. A través de 2 de los 3-ejes de la montura, el micro-cantiléver se centra respecto a la sección transversal del SMF. Mientras que, la distancia de la punta a la superficie del micro-cantiléver se ajusta con la montura NRT/150.

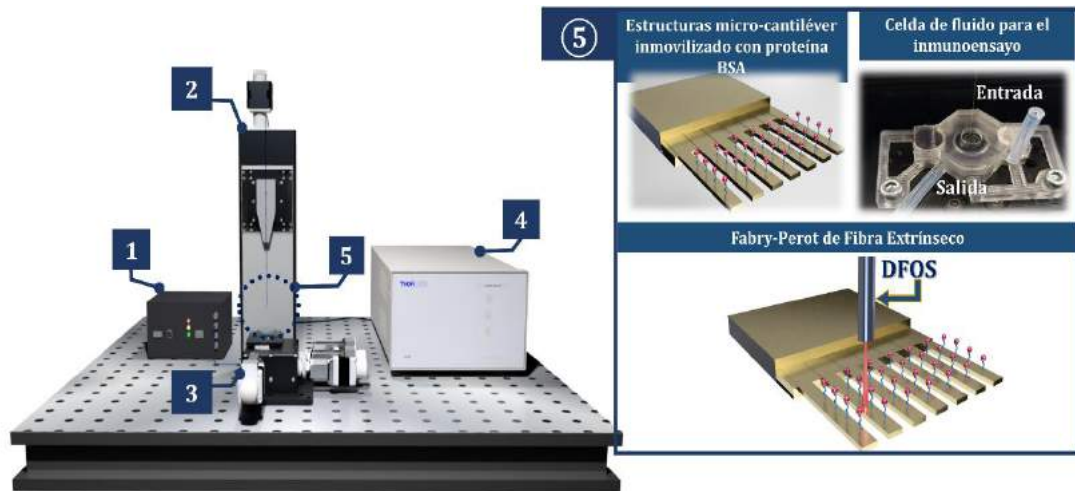


Figura 41. Arreglo experimental de un SFO basado en IFPF-E para la detección de deflexiones de estructuras de micro-cantiléver funcionalizados:(1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas con ejes X y XYZ, (4) controlador de motores, (5) DFOS.

La metodología para el inmunoensayo se conforma de tres pasos. Primero, en la entrada de la celda se inyecta una muestra de tampón fosfato salino (PBS: *Phosphate buffered saline*) hasta alcanzar el nivel de la parte superior de la celda. Después, se realiza una curva de calibración del SFO a desplazamiento considerando que la cavidad se encuentra dentro de un medio distinto al aire. Para esto, la punta de fibra se posiciona a un LCO de 40 μm respecto a la superficie del cantiléver. Una vez colocado en un punto inicial, se registra el espectro óptico reflejado para su análisis. Después, se reduce el LCO al desplazar el micro-cantiléver con la montura NanoMax-300 en pasos de 100 nm hasta recorrer una longitud de 1 μm . Los espectros ópticos de cada posición se registran y se realiza una relación entre el desplazamiento de λ_{IFP} y el desplazamiento del micro-cantiléver. Una vez que se tienen la curva de calibración se procede a la biodetección de anti-BSA, donde previo a ello se registra la señal óptica de referencia, es decir cuando el micro-cantiléver se encuentra inmerso en PBS. Subsecuentemente una solución de PBS y anti-BSA a una concentración de 75 $\mu\text{g/ml}$ se introducen la entrada de la celda, dejando que el PBS fluya hacia la salida de la celda. La señal óptica reflejada es monitoreada sobre un lapso de tiempo y se registra cuando el patrón de interferencia se estabiliza. Una vez adquirida la señal con la concentración de 75 $\mu\text{g/ml}$ de anti-BSA, se compara el desplazamiento que se tuvo respecto a la señal de referencia en PBS generada por el cambio del LCO cuando el micro-cantiléver se flexiona. Esta misma metodología se realiza a una solución de PBS y anti-BSA de 300 $\mu\text{g/ml}$.

3.4.1.5 Aplicación del SFO: Espesor e Índice de Refracción de muestras de vidrios

Por otro lado, el SFO de distancia se propone para su aplicación en la caracterización de muestras de vidrios, las cuales fueron dopadas con distintos elementos y concentraciones. Este trabajo se realizó en colaboración con el grupo de investigación de la División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Guanajuato (responsable: Dr. Miguel Vallejo Hernández). En estas pruebas se deriva, a partir de la medición de distancia con el IFPF-E que utiliza el MCF_7 (ya que tiene un rango dinámico mayor que el conseguido con una SMF), las características de la muestra, tales como espesor e índice de refracción.

Para esto se utiliza el sistema visto en la Fig. 42, donde el elemento (2) se coloca en una montura con ejes XY y se utiliza una montura NRT/150 colocada en vertical ($NRT/150^{Vertical}$) sobre la placa de otra montura NRT/150 sujeta a la mesa en horizontal ($NRT/150^{Horizontal}$). En este esquema, el DFOS, visto en el elemento (5) de la Fig. 42, se basa tanto en un IFPF-E como en un IFPF-2C de forma independiente. El IFPF-E se compone del ISPM y de una superficie reflejante (espejo) y, se utiliza como punto de referencia. Con la montura $NRT/150^{Vertical}$ la punta de fibra óptica se aleja de la superficie del espejo y a través de la señal óptica analizada en el dominio de Fourier se monitorea la distancia hasta alcanzar una cavidad óptima donde se pueda introducir una muestra de vidrio; en promedio la distancia de separación es de ~ 11.5 mm. Además, se registra el espectro de Fourier en este punto de referencia para poder analizar las características de la muestra posteriormente. Después, se coloca la muestra de vidrio que se quiera analizar sobre la superficie del espejo. Para evitar golpear la punta de la fibra, la muestra puede colocarse sobre un lado del espejo, tal como se muestra en el elemento (5). Por lo tanto, la punta que se encuentra sujeta en la montura $NRT/150^{Vertical}$ se desplaza hacia la posición de la muestra de forma horizontal a través de la montura $NRT/150^{Horizontal}$. En esta posición se puede ver que el DFOS pasa de estar conformado por un IFPF-E a un IFPF-2C. La señal óptica reflejada en esta posición es adquirida y analizada en el dominio de Fourier para obtener las componentes en LCO de las dos cavidades formadas por aire y la muestra de vidrio. Considerando que la cavidad de aire se reduce, respecto a la posición de referencia, la diferencia entre ambas longitudes corresponde al espesor de la muestra (h_M). Teniendo

en cuenta que se conoce h_M y que el valor de $LCO_{Muestra}$ se obtiene del espectro de Fourier, se puede calcular el índice de refracción de la muestra (n_M) sabiendo que la $LCO_{Muestra} = n_M * h_M$. Esta misma metodología se realiza para la caracterización de cada una de las muestras de vidrio fabricadas y entregadas por el grupo de investigación con el que se colabora.

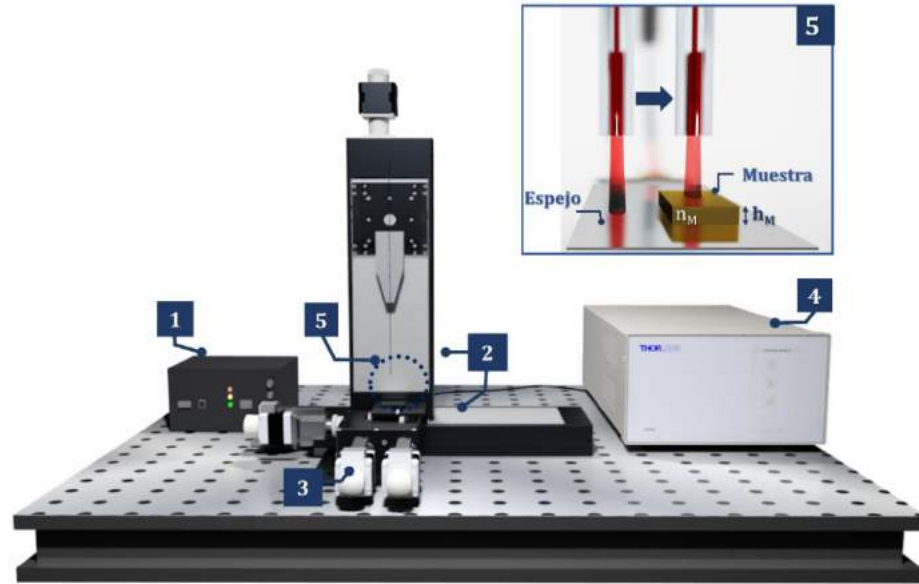


Figura 42. Arreglo experimental de un SFO para la medición de espesor e índice de refracción simultáneamente: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2) montura con eje XY formada por dos monturas colocadas en vertical y horizontal, (3) montura de desplazamiento mecánicas XYZ, (4) controlador de motores, (5) DFOS.

3.4.1.6 Aplicación del SFO: Medición del Δn en Guías de Ondas

El uso del SFO de distancia es propuesto también en la caracterización de guías de ondas (GO), específicamente, para la medición del índice de refracción relativo (Δn) de guías de ondas inscritas en un sustrato de vidrio de sódico-cálcico a distintas velocidades de escaneo del láser de femtosegundos (fs). Este trabajo se realiza en

colaboración con el Laboratorio de Óptica Integrada del Centro de Investigaciones en Óptica (responsable: Dra. Verónica Vázquez), quienes fueron los encargados del proceso de inscripción de las GO. El láser de fs (LIBRA Coherent centrado a 800 nm con una energía de 3 μ J y duración de pulso de 50 fs) fue enfocado a través de un objetivo de microscopio (40x) sobre un sustrato de vidrio de sódico-cálcico con dimensiones de 7.08 mm x 24.8 mm x 1.1 mm. La inscripción de las guías de ondas se realiza a distintas velocidades, 100, 200 y 300 μ m/s. En la Fig. 43 se representa el sistema implementado para la caracterización de las guías de onda inscritas. El DFOS, visto en el elemento (4), se basa en un IFPF-2C que posee una cavidad de aire y una cavidad formada por el sustrato de vidrio.

Para la medición, el ISPM se coloca enfrente del sustrato, sin estar en contacto con la superficie, dejando una cavidad con un LCO_{aire} de 40-50 μ m. El Δn es calculado de la diferencia de los índices de refracción que conforman a la guía de onda, de forma análoga a una fibra óptica, del núcleo (n_{GO}) y del revestimiento ($n_{\text{revestimiento}}$). El núcleo se forma a través de la modificación del índice de refracción, por la incidencia del haz de luz del láser de fs, en el sustrato. Por lo tanto, este último se considera como el revestimiento al tener confinado en su estructura al(los) núcleo(s) inscrito(s). Teniendo en cuenta lo antes mencionado, la punta de fibra óptica se alinea primero a la sección transversal de la GO; es decir, al núcleo. La alineación de la fibra puede ser complicada de realizar, más si no se cuenta con un sistema de visión óptimo. Sin embargo, con el mismo DFOS formado se puede conocer, a través del espectro óptico reflejado, cuando la luz incide en el núcleo o cuando se encuentra en el revestimiento. La luz reflejada proveniente del núcleo induce un patrón de interferencia con mejor contraste que la que proviene del revestimiento, ya que en el núcleo la luz se mantiene confinada evitando la divergencia del haz que reduce significativamente la luz reflejada al propagarse a lo largo de toda la longitud de propagación. Caso contrario de lo que sucede en el revestimiento, donde la interferencia generada de la luz reflejada de esta cavidad exhibe un patrón de interferencia con bajo contraste, ya que el haz incidente diverge y una menor porción de luz se refleja hacia la punta de la fibra óptica.

Cuando la punta de la fibra óptica se encuentra alineada al núcleo de la GO inscrita a una velocidad de 100 μ m/s, la señal reflejada es registrada y analizada en el dominio de Fourier de donde se obtiene su índice de refracción, a partir del LCO_{GO} y de la longitud física conocida del sustrato (7.08 mm). Después la punta de fibra se desplaza 30 μ m, alejándose del centro del núcleo, y posicionándose en la región del revestimiento (o sustrato) donde se registra la señal óptica reflejada que es analizada

en el dominio de Fourier y se obtiene también el índice de refracción, $n_{\text{revestimiento}}$. Para evaluar si el índice de refracción es modificado en menor valor alrededor del núcleo, la punta de fibra se desplaza $10\ \mu\text{m}$ más, quedando a $40\ \mu\text{m}$ lejos del centro, y la señal reflejada se adquiere para analizarse en dominio de Fourier obteniendo el valor de $n_{\text{revestimiento}}$ en un segundo punto del sustrato. Esta misma metodología se repite para la caracterización de una GO inscrita a una velocidad de $200\ \mu\text{m/s}$ y de $300\ \mu\text{m/s}$.

Para comprobar la técnica para medir el Δn en una guía de onda, se toma como referencia la medición de una SMF-28 de la cual se conoce que Δn es de 0.003. Se toma la señal reflejada cuando la punta de fibra se alinea al núcleo de la SMF-28. Después se desplaza la punta de fibra a $50\ \mu\text{m}$ y se adquiere la señal reflejada en este punto. A pesar de que la longitud física de la SMF-28 no es conocida, la $LCO_{\text{núcleo}}$ y la $LCO_{\text{revestimiento}}$, obtenidos del análisis de las señales reflejadas en el dominio de Fourier, permiten obtener el valor relativo de Δn .

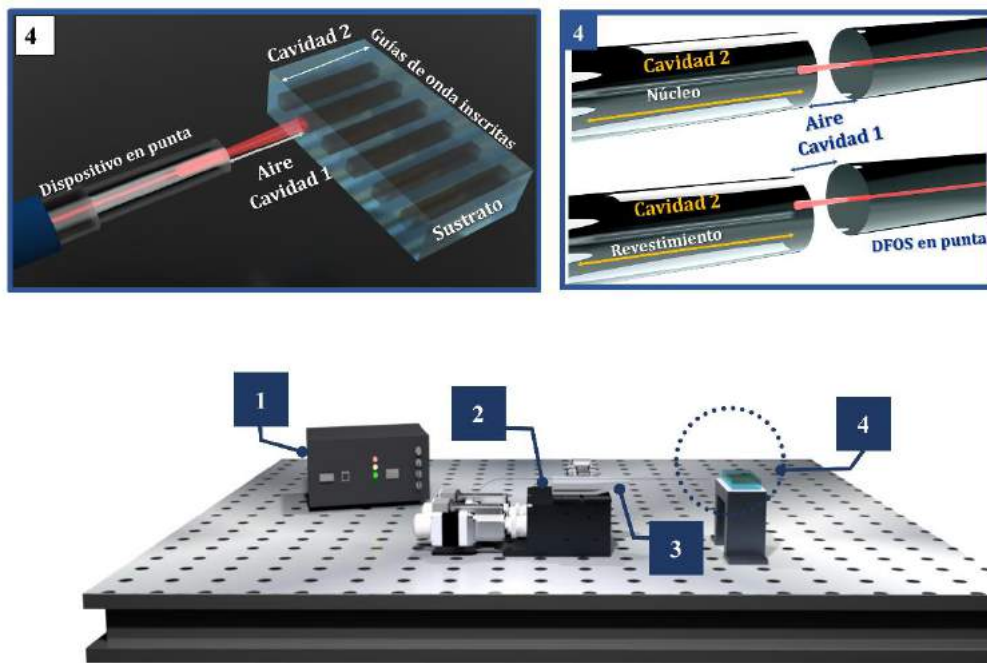


Figura 43. Arreglo experimental de un SFO para la medición del Δn de guías de ondas basado en un IFPF-2C: (1) Interrogador espectral: MicronOptics sm125, (2) montura de desplazamiento mecánicas de tres ejes, (3) sujetador magnético para fibra óptica, (4) DFOS.

3.4.2 SFO Basado en un ISPM (MCF₃) +FBG

En esta sección se describe el desarrollo del sensor conformado por el DFOS visto en la Fig. 30. Este dispositivo se basa en un ISPM (MCF₃) en reflexión (SMF₁-MCF₃-SMF₂) donde la sección de la SMF₂ cuenta con una FBG inscrita, siendo esta última utilizada para analizar la respuesta del SFO.

3.4.2.1 Fuerza

La representación del sistema del SFO de fuerza se muestra en la Fig. 44. Este está conformado por: (1) un interrogador (I-MON 512 USB, Ibsen), (2)-(3) montura mecánica micrométrica de tres ejes (MAX312, Thorlabs), (4) montura de rotación 360° sujeta a una montura fija (HFR001, Thorlabs), (5) sujetador de fibra (HFR007, Thorlabs) y (6) DFOS. El DFOS se basa en un esquema en punta conformado por una FBG empalmada a un ISPM (MCF₃), donde la FBG se diseñó con una $\lambda_B=1549.39$ nm para que coincidiera con el punto de cuadratura del espectro de interferencia, tal como se describió en la sección 3.3.2. El DFOS se conecta en su extremo a un conector FC/APC el cual se embona en el canal de un interrogador, en este caso se utiliza un I-MON 512 cuyo software para la adquisición de la señal es proporcionada por la empresa Ibsen. En este trabajo se describe la metodología a seguir para la caracterización de la respuesta del DFOS ante una fuerza aplicada. Primero el dispositivo se sujeta al elemento (4) del sistema y a la montura (2), tal como se muestra en el elemento (6) de la Fig. 44 donde el DFOS se encuentra orientado 0°, es decir con los núcleos configurados en forma de V invertida (ver sección derecha de la Fig. 44). Después, se coloca una viga con la que se induce una fuerza lateral, sobre el extremo final del DFOS en forma perpendicular. Para esto se utiliza una fibra óptica estándar que se sujeta en el elemento (5) y este a su vez se coloca en la montura mecánica (3). La fuerza (F) que aplica la viga sobre el DFOS es de escala de los microNewton y, puede calcularse como

$$\mu N = \frac{3EI\Delta h}{L_{viga}^3} \quad (51)$$

donde $E= 73$ GPa es el módulo de Young de la fibra óptica, $I = \pi d^4/64 = 1.1983 \times 10^{-5} \text{ mm}^4$ es el segundo momento de área circular, siendo d el diámetro del revestimiento de la fibra óptica. Mientras que $L_{viga}= 20$ mm es la longitud de la fibra óptica. El rango de valores de fuerza que se aplican depende de Δh que corresponde al desplazamiento vertical de la viga. Por lo tanto, la viga se coloca debajo y apoyada sobre el DFOS, tal como se muestra en la Fig. 44 el elemento (6) a la izquierda. Después la señal reflejada se registra para esta posición inicial. Luego, se comienza a desplazar con la montura (3) en un sentido positivo con pasos de $h= 100 \mu\text{m}$, lo que corresponde a una fuerza positiva (F^+) de $38.80 \mu\text{N}$, hasta una distancia de $\Delta h= 1$ mm. En cada uno de los desplazamientos, la fuerza aplicada conduce a un doblamiento de la MCF₃ la cual se observa en la señal reflejada adquirida en cada punto.

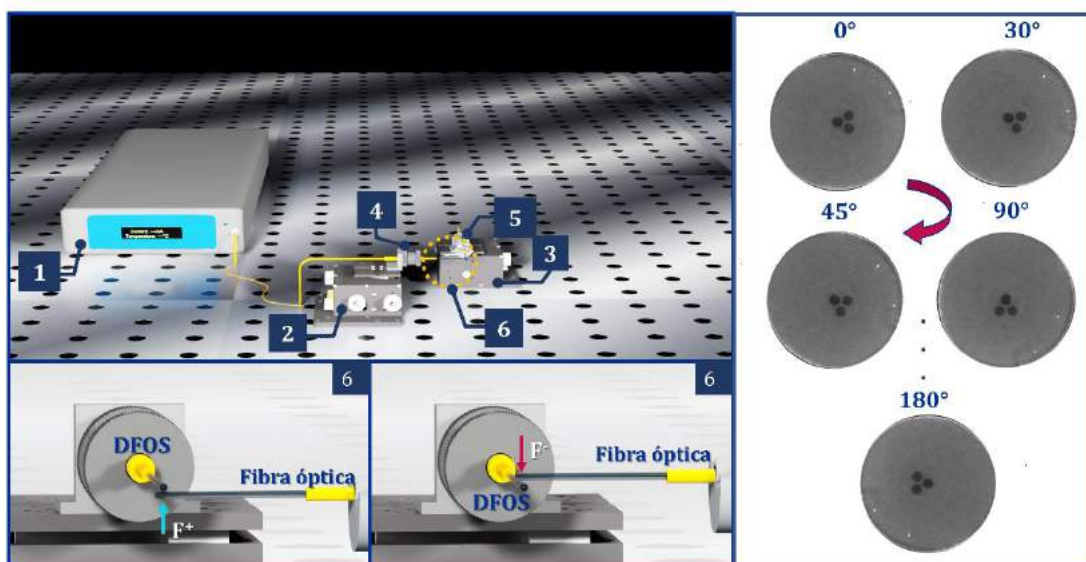


Figura 44. Arreglo experimental de un SFO para la medición de fuerza: (1) Interrogador espectral I-MON USB, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas de tres ejes, (4) Montura de sujeción de fibra óptica con rotación, (5) sujetador de fibra óptica, y (6) DFOS. Sección derecha: Orientación de los núcleos del ISPM.

Debido a la asimetría en la distribución de los núcleos, la sensibilidad del SFO puede resultar distinta tanto en la dirección en la que se aplica la fuerza, como en la orientación en la que se encuentran los núcleos. Por lo tanto, se procede a evaluar su respuesta a fuerza en una dirección negativa (F^-). Ahora, la viga se coloca encima del

DFO y se desplaza en pasos de $h = 100 \mu\text{m}$ hacia abajo hasta una $\Delta h = 1 \text{ mm}$, con dirección negativa, y en cada una de las posiciones la señal reflejada es registrada. Luego, la orientación de los núcleos es modificada para evaluar la sensibilidad del SFO bajo esta consideración. Para esto, el DFO a través del elemento (4) se rota 30° en sentido horario y se repite el procedimiento descrito anteriormente para aplicar la fuerza en dirección positiva y negativa. Esto se realiza hasta alcanzar una rotación del DFO de 180° .

3.4.2.2 Temperatura

La temperatura es un parámetro físico que se cruza en todos los escenarios donde se realiza la medición de algún otro parámetro y por lo que siempre es necesario tomarla en cuenta. En este sentido, el SFO se caracteriza a temperatura. Para esto se utiliza el sistema visto en la Fig. 45. Donde se hace uso de (3) un calibrador-horno en seco (FLUKE 9103, EU) y una (2) estructura en puente. El DFO se introduce de forma vertical por la apertura en la parte superior del horno sin tocar el fondo, dejando un espacio de 50 mm. A través de una base fija en el centro del arco con piezas de sujeción de fibra óptica, el DFOS se mantiene en vertical, fijo y totalmente estirado. En el extremo del DFOS se le empalma un conector FC/APC el cual se embona al canal del (1) interrogador I-MON 512.

Una vez posicionado el DFOS el horno es encendido y configurado para realizar los cambios de temperatura. En este caso se hace uso de un programa realizado en LabVIEW que permite controlar el horno, creando una respuesta de temperatura de tipo rampa sobre el tiempo. Por lo tanto, se configura una temperatura inicial de -20°C y una temperatura final de 80°C , incrementando 20°C cada 10 min. En el mismo software se configura para que el horno tenga una respuesta de forma inversa, es decir, la temperatura desciende de 80°C a -20°C . Considerando que es una prueba realizada sobre el tiempo, la señal reflejada del DFOS es adquirida y registrada automáticamente, en intervalos de 10 s, durante el proceso de la rampa de subida y de bajada en el intervalo de temperaturas configuradas en el horno. El programa utilizado para la adquisición de la señal fue proporcionado por el fabricante del interrogador Ibsen, este provee una interfaz desarrollada en la plataforma de LabVIEW donde se define el tiempo e intervalo de adquisición de la señal reflejada. En cada temperatura, los

cambios experimentados por el DFOS se visualizan como un cambio de la señal reflejada que se adquiere en el tiempo.

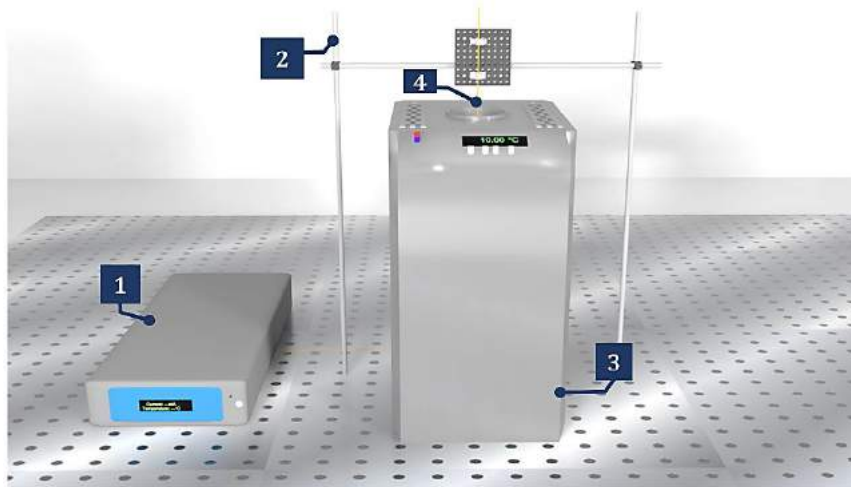


Figura 45. Arreglo experimental de un SFO para la medición de temperatura: (1) interrogador espectral I-MON 512, (2) estructura en puente para sujeción de una fibra óptica en vertical, (3) calibrador-horno en seco, y (4) DFOS.

3.4.2.3 Aplicación del SFO: Detección de Impacto

El impacto de objetos sobre estructuras produce alteraciones o daños internos que a simple vista son imperceptibles, la acumulación del daño con el tiempo puede llevar a una fractura en la estructura. En este sentido, el SFO de fuerza es aplicado para la detección de impactos a niveles bajos de energía. Una representación del sistema para la detección de impacto puede ser vista en la Fig. 46 (a). Este sistema se basa en: una fuente de luz (Safibra OFLS-6 @1550 nm) que se conecta al puerto 1 de un circulador de fibra óptica, en el puerto 2 se conecta el DFOS y en el puerto 3 se conecta un fotodetector (PDA30B2, Thorlabs) el cual se conecta a un osciloscopio (PICO2204A). Con este sistema la detección del impacto es registrada en cambios de intensidad. Además, siendo este un evento dinámico que ocurre en una fracción de tiempo, la

velocidad de adquisición de la señal es determinante. Por eso se restringe el uso de un espectrómetro ya que la velocidad se limita a unos cuantos kHz. Por otro lado, el DFOS se coloca en una pieza, impresa en 3D en forma de T, colocada en forma de voladizo sobre una plataforma.

El impacto en el SFO es generado a través de la caída de diferentes bolas de acero a distintas alturas. En la Fig. 46 (b) se observa una representación de la manera en la que se realizan las pruebas, donde una mordaza colocada a una determinada altura sostiene una bola de acero para después liberarla sobre el DFOS. La bola impacta con una determinada energía (E_{impacto}). La energía de impacto (Joules) de un objeto que cae sobre otro se puede calcular por la siguiente relación:

$$E_{\text{impacto}} = m_o g h_o \quad (52)$$

Donde m_o es la masa del objeto (kg), h_o es la altura (metros) de donde cae y g la aceleración de la gravedad (m/s^2). Este impacto induce un doblamiento en la pieza, en consecuencia, el cual se manifiesta como un cambio en la intensidad de la luz reflejada y que se observa como una variación en el voltaje registrado por el osciloscopio sobre el instante de tiempo en el que sucede. Se realiza una serie de pruebas utilizando diferentes bolas de acero con distintas masas liberadas desde distintas alturas, obteniendo impactos en un rango entre 0.1 mJ a 8.3 mJ.

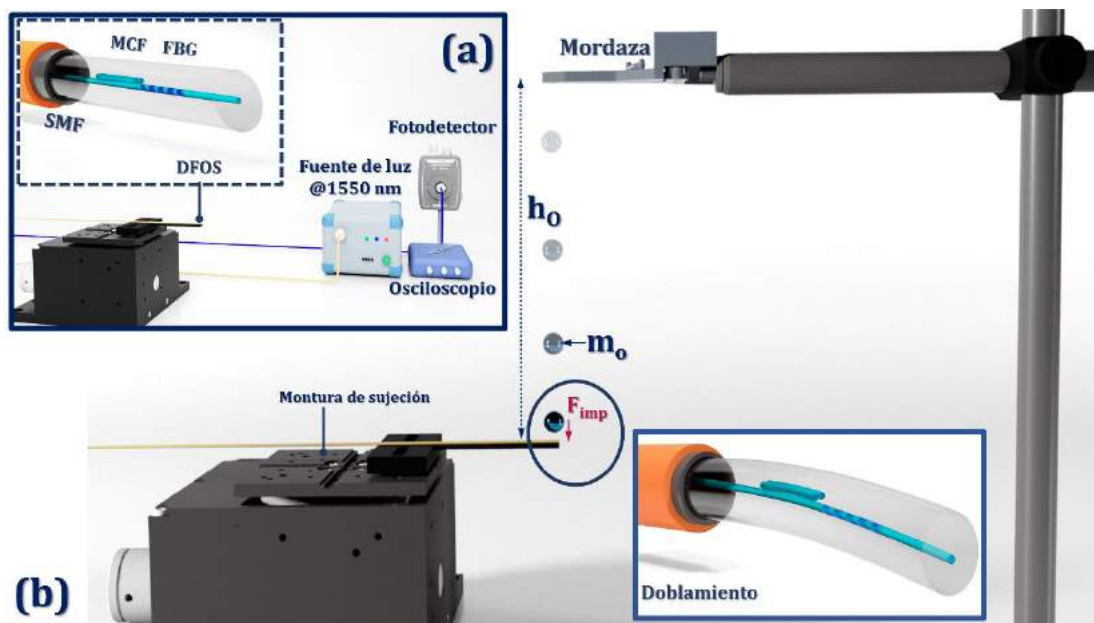


Figura 46. (a) Arreglo experimental del SFO de fuerza para la detección de impacto. (b) Representación de las pruebas de impacto en el SFO.

3.4.2.4 Aplicación del SFO: Detección de Contacto con Sentido de Dirección

Los sensores de contacto son dispositivos que han tomado gran relevancia en sistemas para la manipulación de objetos en áreas como la automatización y la robótica. En este sentido, el SFO es aplicado en la detección de contacto y distinguiendo el sentido en el cual el objeto toca al dispositivo. El sistema del SFO para la detección de contacto se puede ver en la Fig. 47 (a), exactamente el mismo arreglo experimental utilizado en la detección de impacto. Debido a que el contacto entre un objeto y el dispositivo sucede en un instante de tiempo corto, la adquisición de la señal es obtenida a través del fotodetector y el osciloscopio. En la Fig. 44 (b) se presenta la forma en la que se induce el contacto entre un objeto (en este caso un dedo) y el DFOS, esto se realiza tocando en un sentido positivo y negativo la pieza con el dispositivo. El contacto ejercido en la pieza induce un doblamiento del DFOS el cual lleva a un cambio en la

intensidad de la señal reflejada que se registra en el osciloscopio como un cambio en el voltaje.

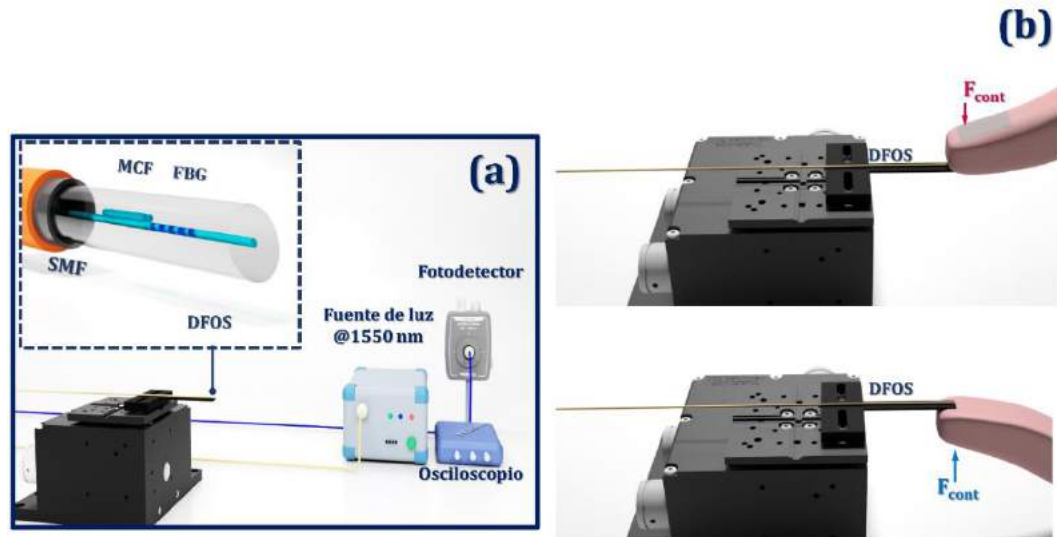


Figura 47. (a) Arreglo experimental del SFO para la detección de una fuerza de contacto. (b) Representación para la prueba de contacto aplicado en distinto sentido.

3.4.3. SFO Basado en una FBG Inscrita en un ISPM (MCF₂)

El SFO, presentado en la sección anterior, demuestra la sinergia entre el ISPM y la FBG para desarrollar un esquema de medición novedoso, práctico y altamente sensible, las cuales son características que permiten ser explotados en diversas aplicaciones. Por otro lado, se propone un SFO considerando un ISPM (MCF₂) cuya sección de MCF es utilizada también como plataforma para albergar la inscripción de una FBG en ambos núcleos, evitando el proceso de manipular y empalmar una FBG externa. Dicho SFO se basa en una FBG inscrita en un ISPM (MCF₂) en punta teniendo una determinada λ_B . El SFO se caracteriza a dos parámetros físicos a: doblamiento y a temperatura. Es importante mencionar que la fibra MCF₂ utilizada en el desarrollo del DFOS ha sido recientemente fabricada a través de un proyecto de colaboración entre

Applied Photonics Group, (Universidad del País Vasco) y Leibniz Institute of Photonic Technology (Jena, Alemania). Por lo tanto, la investigación realizada aquí constituye los primeros resultados sobre el rendimiento de dicha fibra en el desarrollo de SFOs.

3.4.3.1. Doblamiento

El sistema del SFO para la caracterización a doblamiento es visto en la Fig. 48, donde se cuenta con: (1) interrogador (Hyperion si255, LUNA), (2)-(3) monturas mecánica micrométrica de tres ejes (MAX312, Thorlabs), (4) montura de rotación 360° sujeta a una montura fija (HFR001, Thorlabs), (5) base con sujetador de tubo de acero y (6) DFOS. En el extremo del DFOS se coloca un conector FC/APC que se conecta a uno de los canales del interrogador. El interrogador se encuentra conectado a una computadora donde la señal reflejada es visualizada en una interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW, y de donde se adquiere la señal a registrar. Para las pruebas a doblamiento del SFO, se configura al DFOS como en el esquema visto en el elemento (6), donde el punto de sujeción del DFOS se coloca cercano al empalme SMF-MCF₂, después el DFOS se rota hasta tener orientados los dos núcleos de la MCF₂ en el eje horizontal (0°). La orientación de los núcleos se observa a través del uso de un microscopio digital de alta magnificación (Edge AM7515MT8A, Dino-Lite) cuyo campo visual se enfoca en la sección transversal del DFOS. Una vez orientado los núcleos, se coloca un tubo de acero ~∅= 0.7 mm perpendicular y en contacto con el DFOS, la señal reflejada es registrada y se considera como un punto inicial. A través de la montura (3), el tubo de acero se desplaza en pasos de 100 μm sobre el eje horizontal hasta una distancia de 1500 μm. En cada desplazamiento de la fibra óptica (δ) la señal reflejada es adquirida para evaluar los cambios en la señal respecto al ángulo al que se dobla la MCF₂. El ángulo de doblamiento se calcula a partir de

$$\theta_{doblamiento} = \tan^{-1}\left(\frac{\delta}{L_{MCF}}\right) \quad (53)$$

donde L_{MCF} en este caso corresponde a la longitud de la MCF₂ igual a 37 mm, desde el punto de sujeción hasta el extremo de la punta al cual se le realiza un corte en ángulo. La caracterización a doblamiento se realiza para distintas orientaciones de la

MCF₂, es decir, para 90°, 180° y 270°. Para estas pruebas se realiza el mismo procedimiento descrito previamente, rotando únicamente el DFOS 90° hasta completar cada uno de los casos.

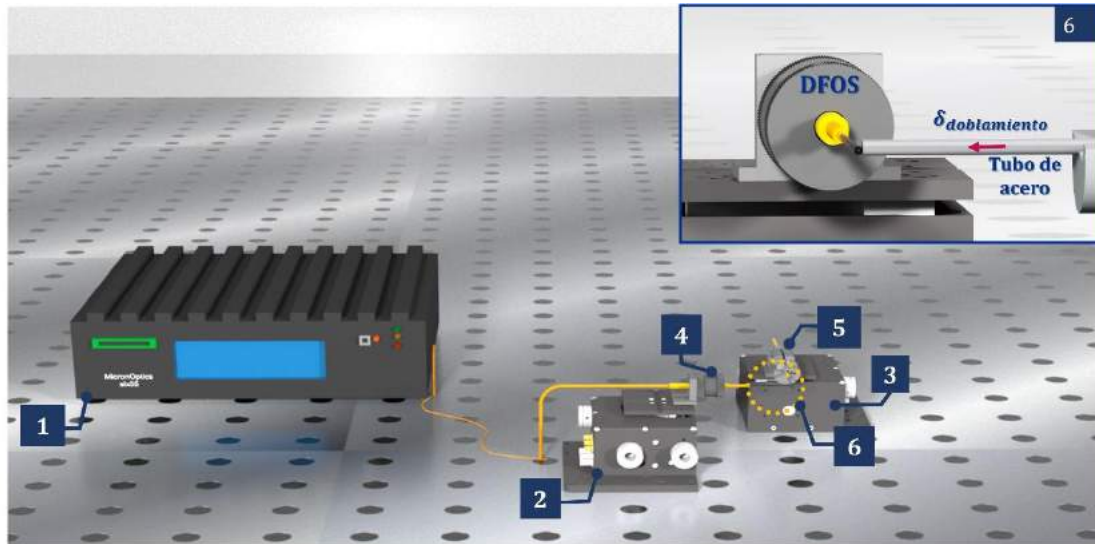


Figura 48. Arreglo experimental de un SFO para la medición de doblamiento: (1) Interrogador espectral Hyperion si255, (2)-(3) monturas de desplazamiento mecánicas de tres ejes, (4) sujetador de fibra óptica con rotación, (5) base con sujetador de un tubo de acero, y (6) DFOS.

3.4.3.2 Temperatura

El SFO se caracteriza a temperatura de forma similar al SFO de la sección anterior. Para esto se utiliza el sistema visto en la Fig. 49 donde el extremo del DFOS se le empalma un conector FC/APC el cual se embona al canal del (1) Hyperion si255. El DFOS es colocado de la misma manera que el SFO explicado en la sección 3.4.2.2. En este caso se hace uso de un programa realizado en LabVIEW que permite controlar el horno, creando una respuesta de temperatura de tipo rampa sobre el tiempo. Por lo tanto, se configura una temperatura inicial de -20 °C y una temperatura final de 80°C, incrementando 10 °C cada 10 min. En el mismo software se configura para que el horno

tenga una respuesta de forma inversa; es decir, la temperatura desciende de 80 °C a -20 °C. Considerando que es una prueba realizada sobre el tiempo, la señal reflejada del DFOS es adquirida y registrada automáticamente, en un intervalo de 10 s, durante el proceso de la rampa de subida y de bajada en el intervalo de temperaturas configuradas en el horno. La adquisición de la señal reflejada de forma automática se realiza a través de una interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW, la cual también rastrea los cambios que se generan sobre el tiempo.

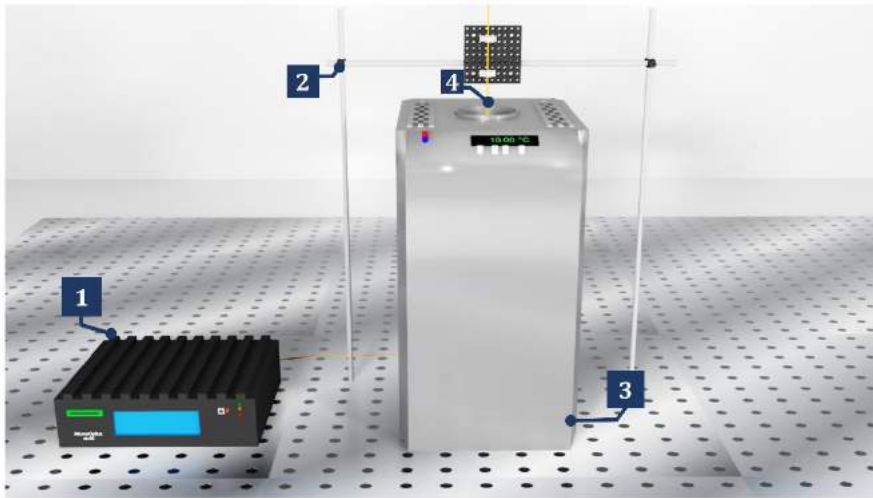


Figura 49. Arreglo experimental de un SFO para la medición de temperatura: (1) interrogador espectral Hyperion si255, (2) estructura en arco para sujeción de una fibra óptica en vertical, (3) calibrador-horno en seco, y (4) DFOS.

3.5 Instrumentación de los SFOs

Los instrumentos de interrogación modernos cuentan con software de adquisición, sin embargo, en muchas ocasiones sus funciones son limitadas. En el caso de los interrogadores utilizados únicamente despliegan el espectro óptico en una interfaz gráfica. La adquisición y análisis en tiempo real del espectro óptico son cuestiones que el usuario final tiene que aprender a gestionar de forma externa. En este sentido, para aprovechar el funcionamiento de los DFOS desarrollados es pertinente realizar su

instrumentación basada en el desarrollo de programas que permitan adquirir, analizar y visualizar la señal y los resultados en tiempo real y automatizado, con el fin de desarrollar SFO útiles para aplicaciones puntuales “reales”. En esta sección se describen el funcionamiento de las interfaces gráficas de usuario desarrolladas en LabVIEW para los interrogadores MicronOptics sm125 y Hyperion si255, adaptándolos a las necesidades requeridas del SFO.

3.5.1 Instrumentación de un MicronOptics sm125: Análisis en el Dominio de Fourier

En la Fig. 50 se muestra la interfaz gráfica de usuario desarrollada en LabVIEW para la instrumentación del interrogador MicronOptics sm125. El programa detrás de la interfaz está diseñado para adquirir la señal del interrogador, analizarla en el dominio de Fourier en tiempo real, e interpretar la señal analizada para desplegar un resultado final para el usuario. La forma de utilizar este programa se describe a continuación.

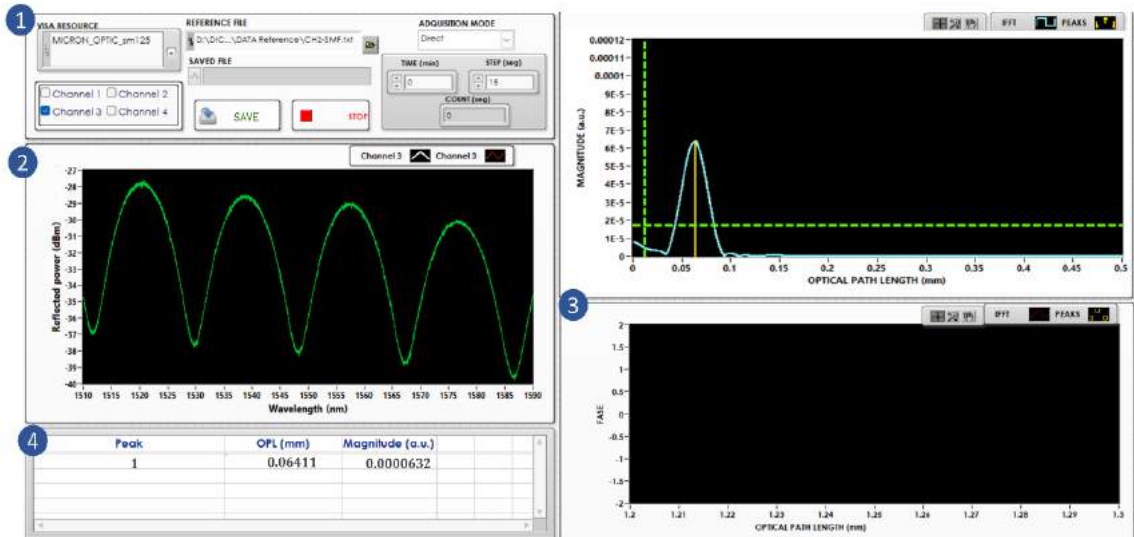


Figura 50. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para la adquisición de la señal del interrogador MicronOptics sm125 y su análisis en el dominio de Fourier.

Panel 1: Se asigna parámetros iniciales, así como la configuración en el modo de operación.

VISA RESOURCE	En este selector se coloca un identificador con el que LabVIEW reconoce al equipo para establecer una conexión por Ethernet. En el Anexo D se describe el protocolo para la comunicación con el interrogador previo a la ejecución del programa ya que se requiere configurar el adaptador de red y asignar al interrogador como un instrumento VISA en LabVIEW.
CHANNELS	Se selecciona el canal en el que el dispositivo se encuentra conectado. El MicronOptics sm125 cuenta con 4 canales de interrogación; sin embargo, únicamente 1 canal puede ser interrogado cuando el programa se ejecuta.
REFERENCE FILE	En este selector se abre la carpeta y se selecciona un archivo de referencia que es utilizado durante la parte de análisis de la señal en el dominio de Fourier. Este archivo representa la señal de la fuente que incide en uno de los canales disponibles, y que son tomados previamente con una punta SMF en reflexión de Fresnel.
ACQUISITION MODE	El programa está diseñado para que el usuario guarde (SAVE) los datos (señal adquirida, señal analizada, datos obtenidos) de forma Direct: En el momento o instante que desee. Timer: De forma automatizada se guardan los datos cada intervalo de tiempo (Step) sobre un lapso de tiempo (Time) .
SAVE FILE	En este indicador se exhibe el nombre del archivo en el que se guardó los datos. Estos datos se pueden encontrar en la carpeta DATA TXT la cual tiene la misma ubicación de donde se encuentra el programa.
STOP	Este permite detener el programa independiente del modo de adquisición en el que se encuentre. Se recomienda usar este botón para detener correctamente la comunicación con el equipo.

Panel 2: Se despliega el espectro óptico adquirido en tiempo real por el interrogador en una gráfica de longitud de onda (nm) vs. potencia reflejada (dBm). Este interrogador cuenta con un rango espectral de 1510 a 1590 nm. El intervalo de λ es de 0.005 nm lo que proporciona 16001 valores adquiridos.

Panel 3: Se muestra el espectro de Fourier del espectro óptico adquirido, donde se tiene los términos de la interferencia que toma lugar. La gráfica despliega la longitud de camino óptico (mm) vs. la magnitud (u. a.). Para el análisis de la señal en el dominio de Fourier se implementa el algoritmo reportado en (Rodríguez-Quiroz et al., 2019) basado en la transformada inversa de Fourier (IFT). La razón de aplicar la IFT es para pasar de un dominio “espacial” (longitud de onda) a un dominio “temporal” ($LCO = c \cdot t$).

Panel 4: El espectro de Fourier se analiza para encontrar la posición (eje X) en la que se encuentra un máximo, así como su magnitud (eje Y). Estos valores son desplegados para una interpretación fácil y rápida de la respuesta óptica del SFO.

3.5.2 Instrumentación de un Hyperion siX55: Análisis en el Dominio de Fourier

En la Fig. 51 se muestra la interfaz gráfica de usuario desarrollada en LabVIEW para la instrumentación del interrogador Hyperion siX55. El programa desarrollado es válido para usar tanto en el modelo si155 como si255. El programa es una versión similar a la del MicronOptics sm125, con una modificación en la comunicación entre LabVIEW y el interrogador. De la misma forma se procede a adquirir la señal del interrogador, analizarla en el dominio de Fourier en tiempo real, e interpretar la señal analizada para desplegar un resultado final para el usuario. La interfaz gráfica para el usuario cuenta con los elementos descritos a continuación.

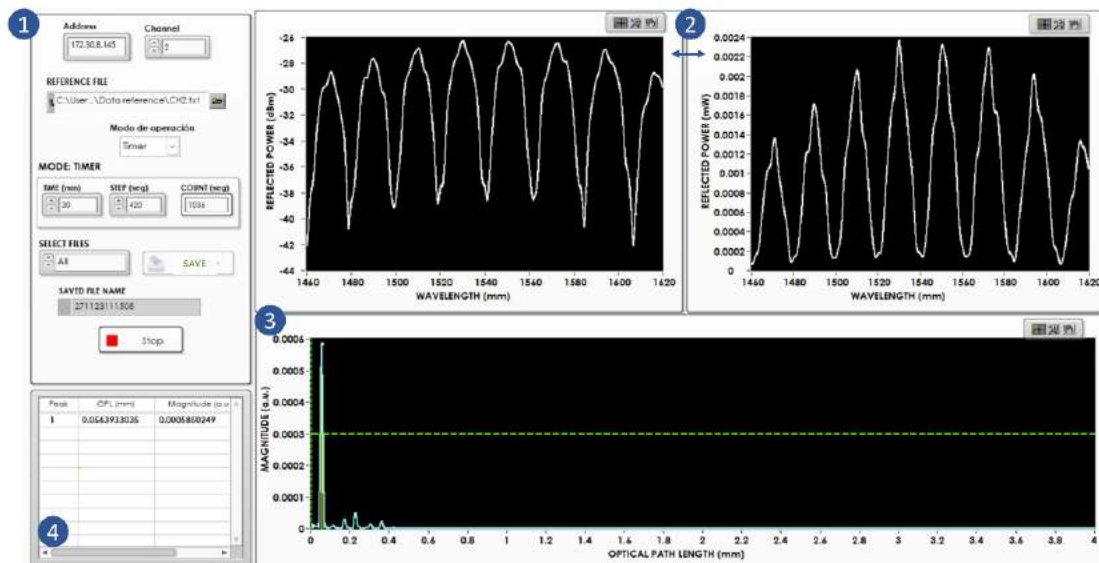


Figura 51. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para la adquisición de la señal del interrogador Hyperion six55 y su análisis en el dominio de Fourier.

Panel 1: Se asigna parámetros iniciales, así como la configuración en el modo de operación.

ADDRESS

La comunicación entre LabVIEW y el interrogador se realiza mediante una conexión remota. El interrogador es conectado a un router vía Ethernet. Mientras que, la computadora en la cual se ejecuta el programa de LabVIEW se conecta vía inalámbrica a la misma red en la que el interrogador es conectado. Por lo tanto, en el identificador es necesario colocar la dirección IP que se despliega en la pantalla frontal del interrogador. Es importante asignar la dirección IP que viene acompañada del indicador (D); en caso de estar en (S) presionar el botón ctrl del interrogador por unos 10 segundos hasta que cambie de estado. La dirección IP acompañada del indicador (S) permite establecer la comunicación de forma directa vía Ethernet, tal como se hace con el MicronOptics sm125. De ser el caso en el que se requiere operar de esta manera el interrogador, se deberá configurar el adaptador de red explicado en el Anexo D y añadir esta dirección IP.

CHANNELS	Se selecciona el canal en el que el dispositivo se encuentra conectado. El Hyperion siX55 cuenta con 4 canales de interrogación. Únicamente 1 canal puede ser interrogado cuando el programa se ejecuta.
REFERENCE FILE	En este selector se abre la carpeta y se selecciona un archivo de referencia que es utilizado durante la parte de análisis de la señal en el dominio de Fourier. Este archivo representa la señal de la fuente que incide en uno de los canales disponibles, y que son tomados previamente con una punta SMF en reflexión de Fresnel.
ACQUISITION MODE	El programa está diseñado para que el usuario guarde (SAVE) los datos (señal adquirida, señal analizada, datos obtenidos) de forma Direct: En el momento o instante que desee. Timer: De forma automatizada se guardan los datos cada intervalo de tiempo (Step) sobre un lapso de tiempo (Time).
SELECT FILE	En este selector se selecciona si se requiere guardar todos los datos desplegados en la interfaz gráfica; o bien, únicamente uno de los datos en específico.
SAVE FILE	En este indicador se exhibe el nombre del archivo en el que se guardó los datos. Estos datos se pueden encontrar en la carpeta DATA TXT la cual tiene la misma ubicación de donde se encuentra el programa.
STOP	Este permite detener el programa independiente del modo de adquisición en el que se encuentre. Se recomienda usar este botón para detener correctamente la comunicación con el equipo.

Panel 2: Se despliega el espectro óptico adquirido en tiempo real por el interrogador en una gráfica de longitud de onda (nm) vs. potencia reflejada (dBm). Este interrogador cuenta con un rango espectral de 1460 a 1620 nm, el cual es superior al rango espectral del MicronOptics sm125. El intervalo de λ es de 0.008 nm lo que proporciona 20000 datos. Por otro lado, en ciertas ocasiones se requiere también visualizar la respuesta del SFO en una escala lineal (mW). En este sentido, se grafica la potencia reflejada convertida de dBm a mW aplicando la relación:

$$P_{mW} = 10^{\left(\frac{P_{dBm}}{10}\right)} \quad (54)$$

Panel 3: Se muestra el espectro de Fourier del espectro óptico adquirido. La gráfica despliega la longitud de camino óptico (mm) vs. la magnitud (u. a.). Para el análisis de la señal en el dominio de Fourier se implementa el algoritmo basado en la IFT (Rodríguez-Quiroz et al., 2019).

Panel 4: El espectro de Fourier se analiza para encontrar la posición (eje X) en la que se encuentra un máximo, así como su magnitud (eje Y). Estos valores son desplegados para una interpretación fácil y rápida de la respuesta óptica del SFO.

3.5.3 Instrumentación de un Hyperion siX55: Análisis en el Dominio de Óptico

En ocasiones el usuario requiere analizar en el tiempo la respuesta del SFO, pero en el dominio óptico, es decir, analizar los cambios en las características del espectro óptico ya sea en longitud de onda o intensidad. Los valores que se obtienen del análisis óptico permiten calcular fácilmente la magnitud del parámetro a medir siempre y cuando se disponga de una curva de calibración del SFO, es decir, una relación lineal o polinomial entre el cambio en longitud de onda (o intensidad) y los cambios del parámetro físico, químico o biológico sobre un rango dinámico. En la Fig. 52 se muestra la interfaz gráfica de usuario desarrollada en LabVIEW para la instrumentación del interrogador Hyperion siX55 para un análisis en el dominio óptico. El programa desarrollado es válido para usar tanto en el modelo si155 como en el si255 y, opera de forma similar al descrito en la sección 3.5.2. Sin embargo, la señal adquirida del interrogador no es analizada en el dominio de Fourier sino en longitud de onda e intensidad. Esta interfaz gráfica de usuario cuenta con los elementos descritos a continuación.

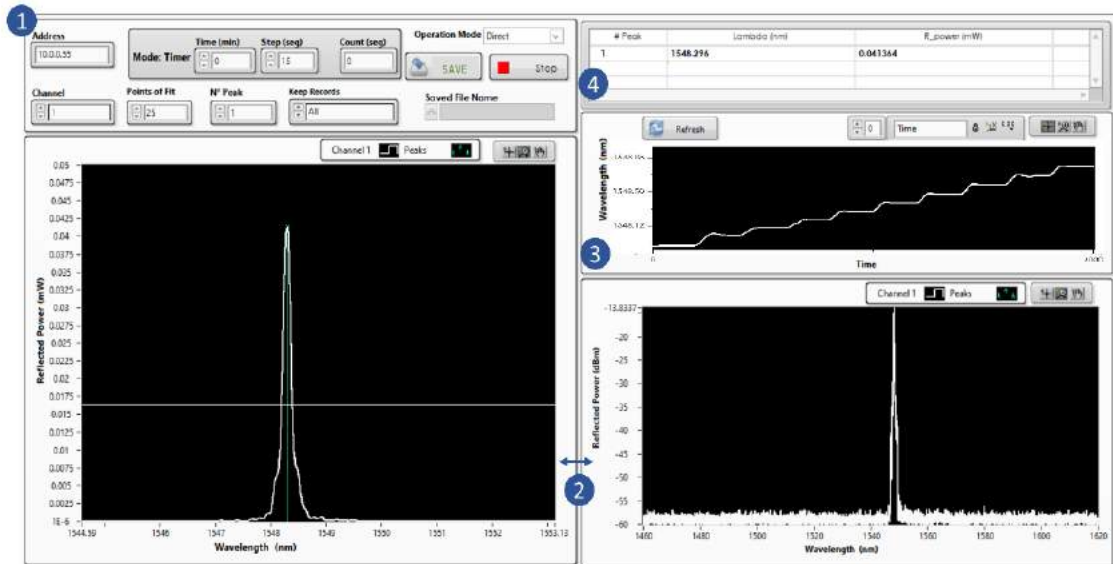


Figura 52. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para la adquisición de la señal del interrogador Hyperion six55 y su análisis en el dominio óptico.

Panel 1: Se asigna parámetros iniciales, así como la configuración en el modo de operación.

ADDRESS

La comunicación entre LabVIEW y el interrogador se realiza mediante una conexión remota. El interrogador es conectado a un router vía Ethernet. Mientras que, la computadora en la cual se ejecuta el programa de LabVIEW se conecta vía inalámbrica a la misma red en la que el interrogador es conectado. Por lo tanto, en el identificador es necesario colocar la dirección IP que se despliega en la pantalla frontal del interrogador. Es importante asignar la dirección IP que viene con el indicador (*D*); en caso de estar en (*S*) presionar el botón ctrl del interrogador por unos 10 segundos hasta que cambie de estado. La dirección IP con el indicador (*S*) permite establecer la comunicación de forma directa vía Ethernet, tal como se hace con el MicronOptics sm125. De ser el caso en el que se requiere operar de esta manera el interrogador, se deberá configurar el adaptador de red explicado en el Anexo D y añadir esta dirección IP.

CHANNELS	Se selecciona el canal en el que el dispositivo se encuentra conectado. El Hyperion siX55 cuenta con 4 canales de interrogación. Únicamente 1 canal puede ser interrogado cuando el programa se ejecuta.
POINT OF FIT	En esta entrada se asigna el número de puntos de datos consecutivos para para localizar y seguir los picos exhibidos en el espectro óptico. El valor óptimo de entrada es explicado más adelante.
N° PEAKS	Se selecciona el pico que se desea monitorear; en caso de detectar más de uno en el espectro óptico.
ACQUISITION MODE	El programa está diseñado para que el usuario guarde (SAVE) los datos (señal adquirida, señal analizada, datos obtenidos) de forma Direct: En el momento o instante que desee. Timer: De forma automatizada se guardan los datos cada intervalo de tiempo (Step) sobre un lapso de tiempo (Time).
SELECT FILE	En este selector se selecciona si se requiere guardar todos los datos desplegados en la interfaz gráfica; o bien, únicamente uno de los datos en específico.
SAVE FILE	En este indicador se exhibe el nombre del archivo en el que se guardó los datos. Estos datos se pueden encontrar en la carpeta DATA TXT la cual tiene la misma ubicación de donde se encuentra el programa.
STOP	Este permite detener el programa independiente del modo de adquisición en el que se encuentre. Se recomienda usar este botón para detener correctamente la comunicación con el equipo.

Panel 2: Se despliega el espectro óptico adquirido en tiempo real por el interrogador en una gráfica de longitud de onda (nm) vs. potencia reflejada (dBm), así como la respuesta del SFO en una escala lineal (mW). Para este programa la señal óptica en escala lineal es tomada para su análisis en el dominio óptico.

Panel 3: La gráfica despliega sobre el tiempo (segundos) el desplazamiento en longitud de onda del pico que se exhibe en el espectro óptico, y el cual fue seleccionado

por el usuario. Para el seguimiento del pico se utiliza un algoritmo preestablecido en LabVIEW, el cual se basa en un ajuste de un polinomio cuadrático sobre un conjunto de puntos. El número de puntos óptimos que se asigna para el ajuste se define por:

$$Point\ of\ fit = \frac{FWHM * 0.5}{0.008} \quad (55)$$

Panel 4: El análisis del pico en el espectro óptico es desplegado en el panel, donde se dan los valores en longitud de onda e intensidad del pico seleccionado por el usuario.

3.5.4 Instrumentación de un Calibrador FLUKE 9103: Control de la Temperatura

La calibración de los SFOs a temperatura (u otro parámetro) representa una actividad que requiere de controlar cuidadosamente el proceso al que se somete. Cuando este proceso se hace de forma manual por el usuario pueden suceder situaciones donde la secuencia del proceso se pierda, es decir, que no se asigne correctamente la señal de entrada (parámetro a medir) en el SFO; o bien que no se realice los cambios pertinentes en intervalos de tiempo de forma periódica. En este sentido, se realiza un programa para controlar el equipo (FLUKE 9103) utilizado para las pruebas de temperatura de los SFO propuestos. En la Fig. 53 se presenta la interfaz gráfica del programa para el control de temperatura. Este va creando respuestas de temperatura de tipo rampa en el tiempo de tal manera que incrementa hasta una temperatura determinada para después hacerlo de forma inversa. Los elementos que conforman al programa son los siguientes:

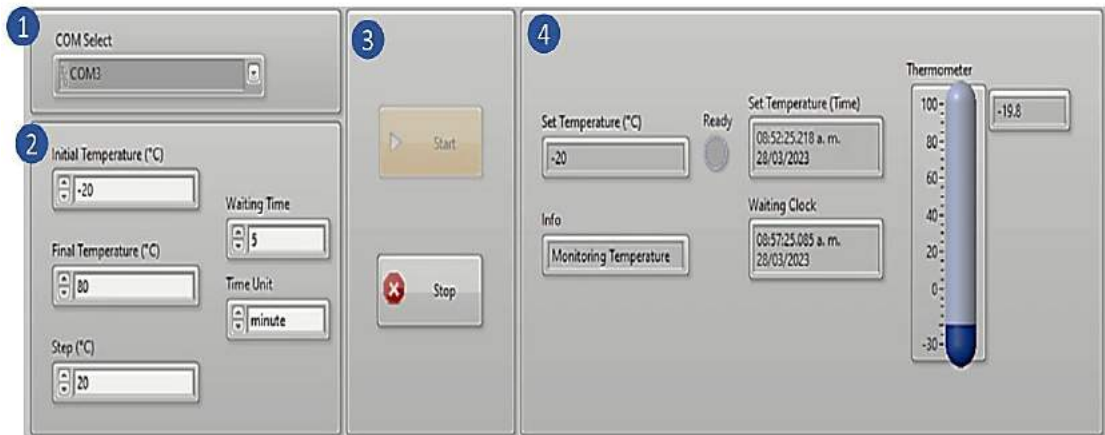


Figura 53. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para el control de un horno de temperatura: FLUKE 9103.

Panel 1: Se asigna el puerto para la comunicación entre LabVIEW y el equipo FLUKE 9103, el cual se identifica como COM # y, la conexión se realiza a través de un conector USB a RS-232.

Panel 2: Se define el comportamiento del calibrador FLUKE 9103 a temperatura:

Initial Temperature (°C) Se asigna la temperatura inicial (final) cuando la rampa de temperatura asciende (desciende).

Final Temperature (°C) Se asigna la temperatura final (inicial) cuando la rampa de temperatura asciende (desciende).

Step (°C) Se define el cambio en la temperatura que se desea tener entre la temperatura inicial y la temperatura final.

Waiting Time & Time Unit Se asigna el tiempo (hora, minuto, segundo) que se desea esperar en cada cambio de temperatura; este tiempo permite que el horno se estabilice.

Panel 3. Una vez definidas las condiciones de entrada para el sistema del horno FLUKE 9103, por ende, para el SFO que se encuentra inmerso, el usuario dispone del botón de inicio para ejecutar el programa en el momento que desee. El botón de Start se deshabilita en cuanto se presiona. Una vez que inicia y completa los ciclos de subida y bajada, el programa se detendrá automáticamente habilitando nuevamente el botón de Start. En caso de que el usuario requiera detener la ejecución puede detener el programa de forma segura con el botón de Stop.

Panel 4. En esta sección se tienen indicadores que muestran el proceso del control de temperatura. El programa comienza con la temperatura inicial asignada y un temporizador se pone en marcha con el tiempo de espera (*Waiting Time*) que se ha declarado. Una vez cumplido este tiempo, se le da la instrucción al horno de pasar a la siguiente temperatura, es decir, la temperatura actual más el valor de Step. El programa monitorea constantemente la temperatura del horno hasta que se alcanza el nuevo valor de la temperatura donde se inicia nuevamente el temporizador con el tiempo de espera (*Waiting Time*). Este proceso se repite de nuevo hasta que se llega al valor de temperatura final (*Final Temperature*) donde el proceso comienza de forma inversa; es decir la temperatura va en descenso hasta alcanzar el valor de temperatura inicial (*Initial Temperature*). Además, al usuario se le va informando el estado actual en el que se encuentra el programa, y en un archivo txt se genera un reporte con la fecha y hora en la que el horno alcanza cada una de las temperaturas establecidas. Este archivo se guarda automáticamente en la ubicación del programa y, se encuentra con el nombre de Time Information.

5. Resultados

4.1 Fibra multinúcleo (7 núcleos)

4.1.1 Distancia

En la Fig. 54 se observa el espectro de reflexión del DFOS descrito en la sección 3.3.1, el cual está conformado por un ISPM en punta basado en una MCF_7 con una L_{MCF} de 9.2 mm (línea roja) y 5.2 mm (línea naranja). Se puede observar que, para ambas L_{MCF} , la interferencia constructiva toma lugar en el espectro de reflexión para el rango de longitudes de onda de interrogación, tal como se demuestra en la simulación realizada en la sección 3.2.1. No obstante, esta interferencia constructiva no asegura el mismo rendimiento para ambos ISPMs dentro del IFPF-E. En todo caso, para un rendimiento óptimo del IFPF-E se debe considerar la distribución de la luz cuando emerge del ISPM en punta como resultado de la interferencia constructiva/destructiva que acontece en L_{MCF} y, de la divergencia del haz conforme se propaga en L_{aire} .

En la simulación de la propagación de la luz en el ISPM vista en la Fig. 29, se muestra la distribución de la energía concentrada en el núcleo central para $L_{MCF} = 5.2$ mm; mientras que, para $L_{MCF} = 9.2$ mm la energía se encuentra distribuida en los núcleos vecinos al núcleo central. En este último caso cuando el haz emerja de la MCF_7 , lo hará con un diámetro cercano a la región formada por todos los núcleos. Caso contrario al haz que emerge para $L_{MCF} = 5.2$ mm, ya que este tendrá un diámetro similar al de un único núcleo, el núcleo central. Conforme se propague el haz sobre L_{aire} este tenderá a diverger, es decir, el diámetro del haz incrementará en el trayecto de la cavidad. Para una determinada L_{aire} la divergencia de un haz con un diámetro grande, para el $ISPM_{9.2\text{ mm}}$, será menor comparada a la de un haz con diámetro pequeño, para el $ISPM_{5.2\text{ mm}}$. Este efecto influirá de tal manera que, la potencia del haz reflejado, que

se acoplará a la fibra óptica, será mucho menor para el haz de diámetro menor. Bajo esta premisa, ambos DFOS son evaluados de forma experimental mediante su uso en el sistema del SFO de distancia descrito en la sección 3.4.1.1. Véase en la Fig. 54 cuando se forma el IFPF-E con una $L_{\text{aire}} = 1.5$ mm usando ambos ISPM, respectivamente. Los espectros de reflexión están formados por la combinación de ambas interferencias que toman lugar, es decir, la interferencia supermodal modulada por la interferencia de múltiples haces. La visibilidad de las franjas del IFPF-E, usando el ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$ (línea azul) es mayor a la que se tiene usando el ISPM $_{5.2 \text{ mm}}$ (línea verde), esto debido a la divergencia que presenta este último.

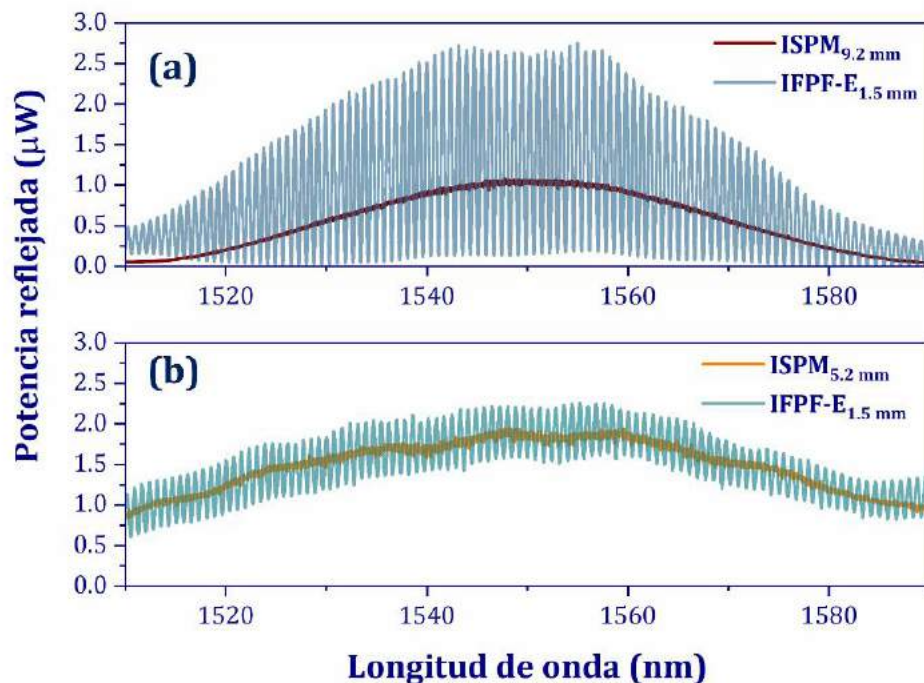


Figura 54. Espectros de reflexión de una ISPM en punta y del IFPF-E con $L_{\text{aire}} = 1.5$ mm con L_{MCF} (a) 9.2 mm y (b) 5.2 mm.

El uso del ISPM $_{5.2 \text{ mm}}$ en el IFPF-E equivale a tener a una SMF en punta, y con el fin de mejorar el funcionamiento de un SFO de distancia se opta por explotar al ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$ en punta para la medición de distancia. En este sentido, el ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$ fue implementado en un IFPF-E tal como se muestra en la Fig. 38, y siguiendo la metodología descrita en la sección 3.4.1.1 se caracterizó su funcionamiento a distancia. En la Fig. 55 (a) se presenta la respuesta característica del IFPF-E a distintas distancias, es decir, variando L_{aire} al desplazar el ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$ respecto a la superficie reflejante (espejo). Las variaciones de L_{aire} llevan a un cambio en la fase del IFPF-E, este cambio

se manifiesta en la periodicidad del espectro óptico reflejado, descrito en la sección 2.3.1. Tal como se muestra en la Fig. 55 (a), conforme L_{aire} aumenta el periodo del patrón de interferencia disminuye. Por otro lado, se observa que la visibilidad de las franjas del patrón de interferencia disminuye también conforme L_{aire} aumenta. En la Fig. 55 (b) se muestran los espectros de Fourier obtenidos al analizar la señal mediante el algoritmo de la IFT implementado, donde la reflectancia de la señal (I_{Total}/I_0) se expresa en términos de la longitud de camino óptico.

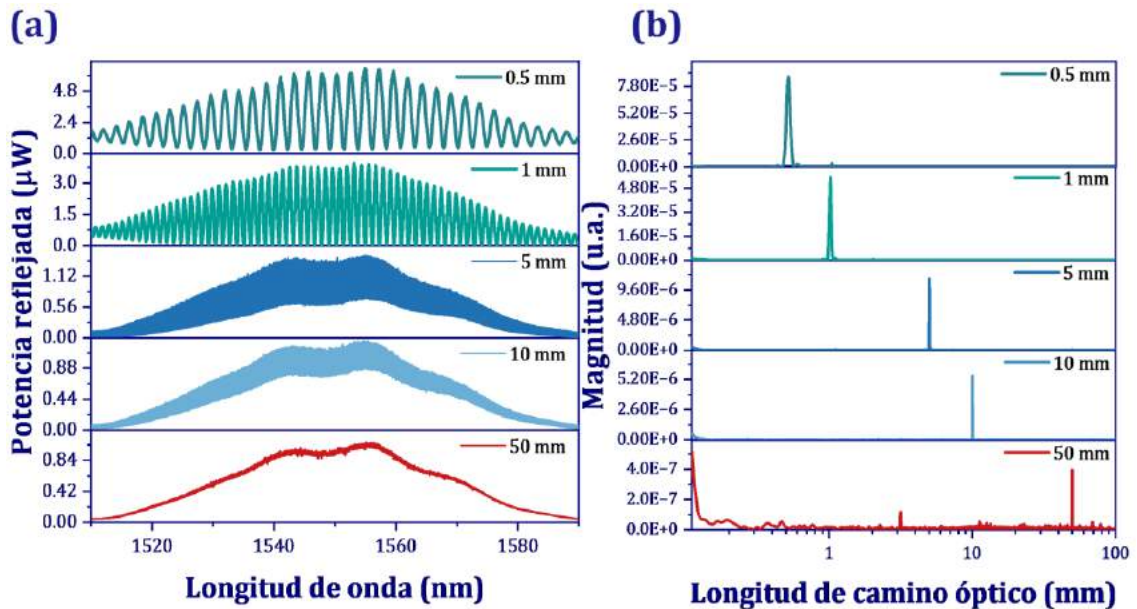


Figura 55. (a) Espectros ópticos reflejados del IFPF-E para diferentes distancias y (b) su análisis en el dominio de Fourier; escala logarítmica.

La localización del pico de Fourier nos permite medir de forma directa la longitud (distancia) de la cavidad formada. Mediante este análisis y usando el sistema representado en la Fig. 38, el SFO fue evaluado en la medición de distancia. Para esto, el ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$ se desplazó respecto al espejo en intervalos de $\delta=0.1 \text{ mm}$ sobre un rango de 0 a 20 mm y en intervalos de $\delta=1 \text{ mm}$ sobre un rango de 20 a 50 mm. En la Fig. 56 se muestra la relación entre la medición de la distancia, obtenida de la longitud del camino óptico calculado de la IFT, y la distancia derivada del desplazamiento del ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$ respecto al espejo. Las gráficas insertadas dentro de la Fig. 56 se muestra un acercamiento de la curva en una región cercana a 0 mm y otra a 20 mm. A pesar de la poca porción de luz que pueda reflejarse a una distancia larga del espejo hacia la punta del ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$, como en el caso de una $L_{\text{aire}}=50 \text{ mm}$, el ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$ tiene la capacidad para acoplar dicha porción de luz debido a la sección transversal que posee

la MCF₇ con la región activa formada por la distribución de los 7 núcleos. El rango dinámico del SFO se limita a 50 mm, ya que para distancias mayores el pico del espectro de Fourier se encuentra al nivel del ruido presente en la señal, lo que reduce la precisión del SFO.

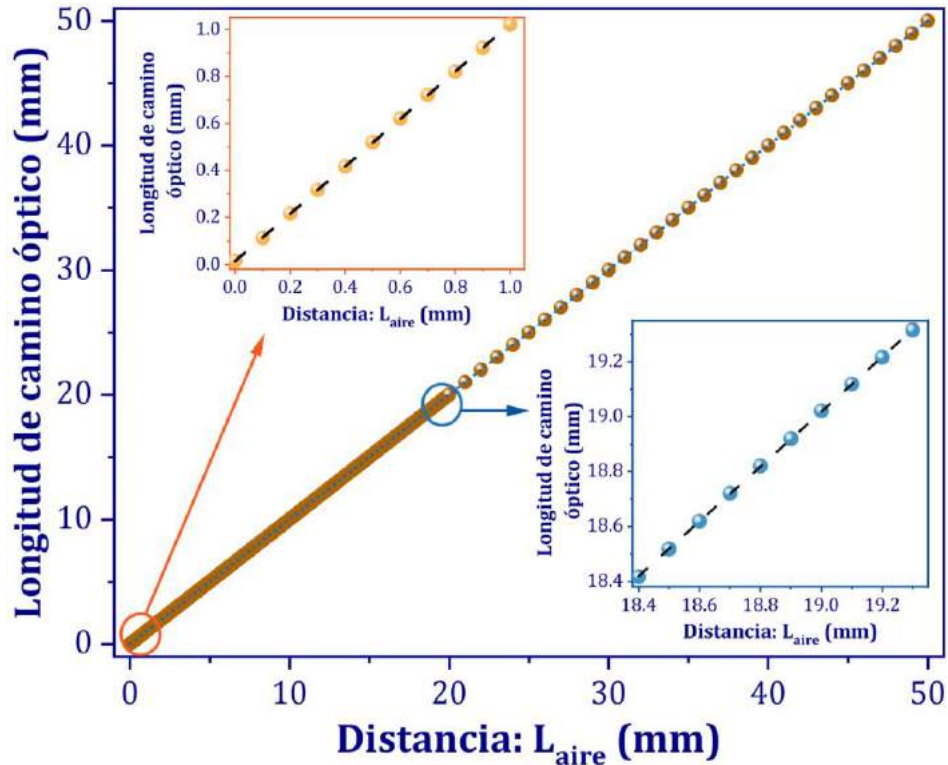


Figura 56. Medición de la longitud del camino óptico con el IFPF-E en función de la distancia: L_{aire} .

Por otro lado, una de las características de rendimiento que se evaluó del SFO de distancia es su resolución, es decir el cambio mínimo que puede ser medido a través de la longitud de camino óptico en el espectro de Fourier. En este sentido, el ISPM_{9.2 mm} fue colocado a una determinada distancia; $L_{aire}= 1.29$ mm, y con una montura nanométrica el espejo fue acercado al ISPM_{9.2 mm} en punta; con valores de $\delta= 0.2 \mu\text{m}$ a $\delta= 0.4 \mu\text{m}$ observando que el pico en el espectro de Fourier no se desplazaba en el eje de la longitud de camino óptico. Después se procedió a inducir $\delta= 0.5 \mu\text{m}$ observando un desplazamiento del pico de Fourier tal como se muestra en la gráfica insertada dentro de la Fig. 57. De esta manera se definió una resolución para el SFO de distancia de 500 nm.

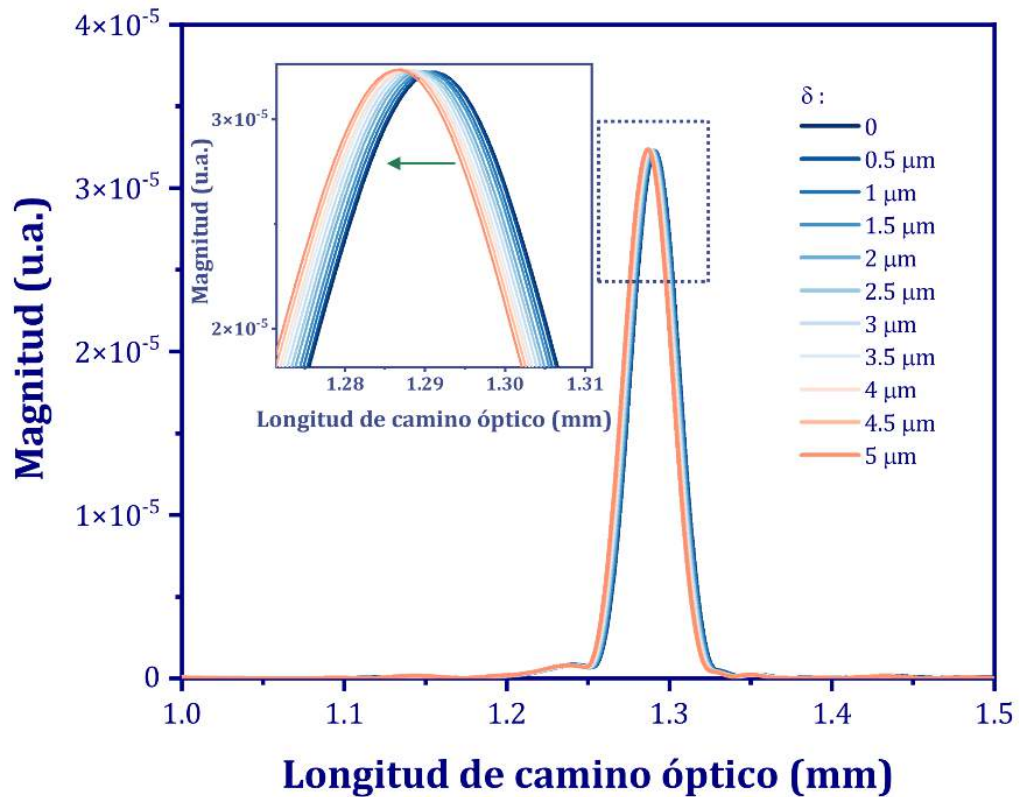


Figura 57. Espectros de Fourier obtenidos de la variación mínima de la distancia; L_{aire} .

4.1.2 Nanodesplazamiento

En el estudio previo, se demostró que el SFO de distancia propuesto presenta un rango dinámico grande utilizando como técnica de análisis de su respuesta la IFT. Sin embargo, la resolución del SFO que se dispone con el algoritmo implementado de la IFT se limita a detectar cambios de la LCO de 500 nm. Con el fin de mejorar el rendimiento del SFO en la detección de desplazamientos inferiores a los 500 nm, en el SFO de distancia se incorporó una segunda cavidad para acceder a la versión óptica del efecto conocido como Vernier. En la Fig. 39 se observa el sistema del SFO y el esquema del DFOS basado en un IFPF-2C conformado por una cavidad de aire y una cavidad de vidrio. Para el efecto Vernier se considera a la LCO_{vidrio} como referencia, al

ser una cavidad fija; mientras que, la cavidad de aire funge como elemento de detección al tener un grado de libertad para variar su LCO_{aire} .

El SFO basado en el IFPF-2C fue evaluado a desplazamientos nanométricos y se analizó su rendimiento para tres distintos casos en su estructura. Primero, la LCO_{aire} se ajustó a LCO_{vidrio} donde se obtuvo el espectro óptico visto en la Fig. 58 (a) el cual se tomó como una señal de referencia. El patrón de interferencia que se observa corresponde a la combinación de la interferencia supermodal (ISPM) y la interferencia Fabry-Perot de dos cavidades (IFPF-2C) generadas en el DFOS. En la Fig. 58 (e) se observa el espectro en el dominio de Fourier (línea azul claro) de la señal de referencia ($I_{\text{referencia}}$) donde se exhibe un único pico debido a las componentes individuales de ambas cavidades que se encuentran superpuestas al ser de LCO iguales. Después, la LCO_{aire} se modificó con una diferencia respecto a LCO_{vidrio} de $\rho_1=36.6 \mu\text{m}$ cuyo espectro óptico (I_{vernier}) se puede ver en la Fig. 58 (b), el efecto Vernier puede ser visto en la modulación que aparece en forma de lóbulos en la parte inferior del espectro óptico. Por otro lado, en la Fig. 58 (e) se observa el espectro de Fourier (línea azul oscuro) donde se tienen dos picos que corresponden a la LCO de las dos cavidades y, su separación equivale a ρ_1 . Luego, la LCO_{aire} se modificó para tener una diferencia mucha mayor a ρ_1 , en la Fig. 58 (c)-(d) se observan los espectros ópticos cuando se tiene una diferencia respecto a LCO_{vidrio} de $\rho_2= 58.6 \mu\text{m}$ y $\rho_3= 80.6 \mu\text{m}$. Los espectros de Fourier respectivos se ven en la Fig. 58 (e), conforme ρ aumenta el segundo pico que corresponde a la cavidad de aire se desplaza alejándose del pico de referencia. En tanto que, en el espectro óptico se puede observar que aparecen más lóbulos en la parte inferior conforme ρ aumenta.

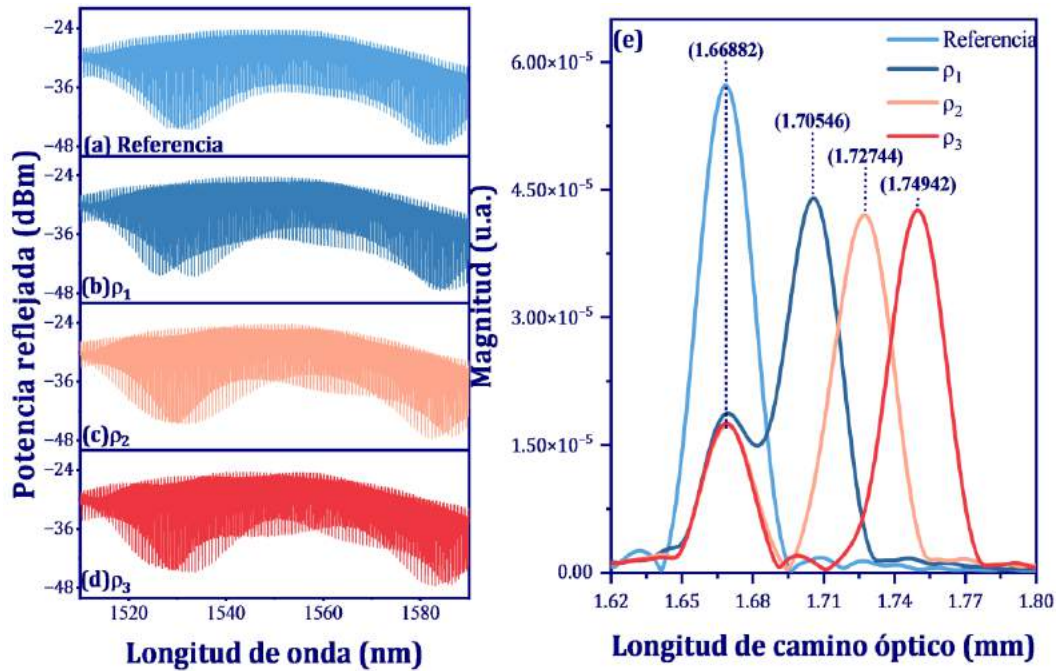


Figura 58. (a) Espectros de reflexión de referencia del IFPF-2C cuando $LCO_{aire} = LCO_{vidrio}$. (b)-(d) Espectros de reflexión para tres distintos valores de $LCO_{aire} > LCO_{vidrio}$, (e) espectros de Fourier correspondientes a los espectros ópticos de (a)-(d).

Estos lóbulos que se aprecian en los espectros ópticos de la Fig. 58 (b)-(d) se encuentran modulados por una envolvente superior/inferior. Sin embargo, resulta complicado de analizar dichas envolventes debido a la forma en la que se encuentran ubicados los lóbulos. En este sentido, se propuso una estrategia que nos permitió tener únicamente los lóbulos formados en el espectro óptico. Para esto, se realizó una resta de cada uno de estos espectros ópticos menos el espectro de referencia, ambos en escala lineal, ya que en una escala logarítmica la resta implica únicamente una normalización de la señal. En la Fig. 59 se aprecia el resultado de la resta realizado para cada uno de los casos de la LCO_{aire} ; es decir, ρ_1 , ρ_2 , y ρ_3 , dejando únicamente los lóbulos formados por la condición del efecto Vernier y, cuyo espectro óptico puede describirse en términos de LCO_{vidrio} como

$$I_{vernier} = I_{sensor} - I_{referencia} = \quad (56)$$

$$\begin{aligned}
& 2(1 - R_1)\sqrt{R_1R_2\eta_1} \left(\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(LCO_{vidrio} + \rho_i)\right) \right. \\
& \quad \left. - \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(LCO_{vidrio})\right) \right) + 2(1 \\
& \quad - R_1)(1 - R_2)\sqrt{R_1R_3\eta_2} \left(\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(2LCO_{vidrio} + \rho_i)\right) \right. \\
& \quad \left. - \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(2LCO_{vidrio})\right) \right)
\end{aligned}$$

En los espectros obtenidos para cada caso de ρ , se puede ver formada una envolvente tanto en la parte superior como inferior, los cuales cuando intersecan forman un nodo localizado a una determinada longitud de onda (λ_{nodo}). Para fines prácticos aquí se resalta únicamente la envolvente inferior, siendo el valor máximo la posición del nodo. Dicha envolvente posee un FSR_i el cual depende de ρ_i . Tal como se muestra en la Fig. 59, conforme la diferencia entre LCO_{aire} y LCO_{vidrio} aumenta, el FSR de la envolvente disminuye. Las señales de las envolventes se obtuvieron mediante un algoritmo en el que se encuentran valores extremos, es decir, puntos cuya derivada de primer orden es igual a cero. Luego se realiza una interpolación con una curva cúbica a través de los valores extremos y, por último, se aplica un suavizado de los datos interpolados.

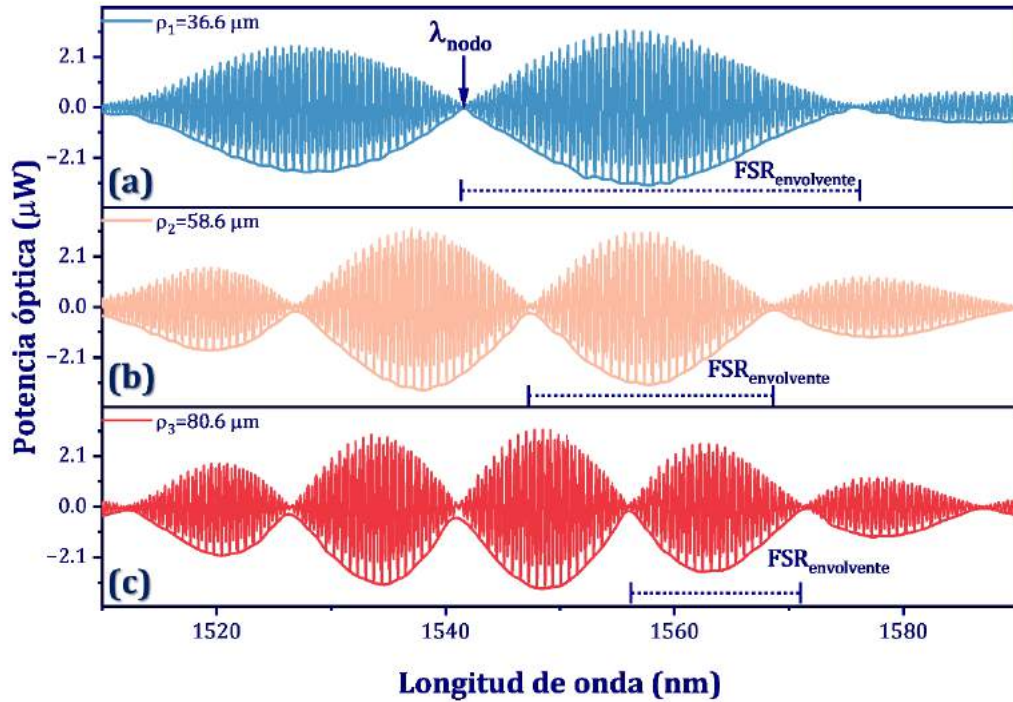


Figura 59. Espectros ópticos (I_{vernier}) obtenidos con las envolventes inferiores para (a) ρ_1 , (b) ρ_2 , y (c) ρ_3 .

La técnica aplicada para analizar el espectro óptico se basa en seguir el desplazamiento de la envolvente en longitud de onda en relación al cambio generado en la LCO_{aire}. La relación obtenida no es más que una forma de describir la sensibilidad del SFO. En este sentido, la sensibilidad del SFO se obtuvo al evaluar su operación para cada uno de los tres casos de ρ distintos. Para el caso donde la diferencia entre las LCOs de las cavidades es de $\rho_1=36.6 \mu\text{m}$, se partió del punto inicial en donde el ISPM_{9,2 mm} fue colocado a una distancia igual a $\text{LCO}_{\text{vidrio}} + \rho_1=1.70546 \text{ mm}$ del espejo. Luego, se aplicó sucesivos desplazamientos de $\delta=0.1 \mu\text{m}$ en la cavidad de aire hasta una distancia de $1 \mu\text{m}$. Cada uno de los espectros reflejados fueron adquiridos para después ser analizados mediante la resta de la señal de referencia. En la Fig. 60 (a) se puede ver el espectro óptico obtenido de este análisis, donde se aprecia el desplazamiento del espectro modulado, por la envolvente con un determinado FSR_1 , hacia longitudes de ondas cortas para cada δ aplicado. El desplazamiento hacia longitudes de onda cortas se debe a que el δ representa un valor negativo, es decir, la LCO de la cavidad de aire disminuye ya que el vidrio espejeado fue acercado hacia la punta del ISPM_{9,2 mm}. De ser el caso contrario, el espectro modulado se desplazará hacia longitudes de onda

largas. Por otro lado, en la envolvente se seleccionó uno de los nodos localizado en λ_{nodo} , y se correlacionó con los desplazamientos ejercidos en la cavidad de aire con los desplazamientos en el nodo ($\Delta\lambda_{\text{nodo}}$), para obtener la curva característica y determinar la sensibilidad del SFO. En la Fig. 60 (b) se muestra la curva característica del SFO relacionando el cambio del nodo de la envolvente ($\Delta\lambda_{\text{nodo}}$) en un intervalo de mediciones del desplazamiento ($\Delta\delta$) en la cavidad de aire, y a la cual se aplicó un ajuste lineal. La pendiente de la curva ajustada de forma lineal proporciona la sensibilidad del SFO que se define como $S = \frac{\Delta\lambda_{\text{nodo}}}{\Delta\delta} = 42.366 \text{ nm}/\mu\text{m}$. Mientras que, la resolución calculada del SFO corresponde a 0.47 nm considerando la resolución del interrogador (MicronOptics sm125) de 0.020 nm.

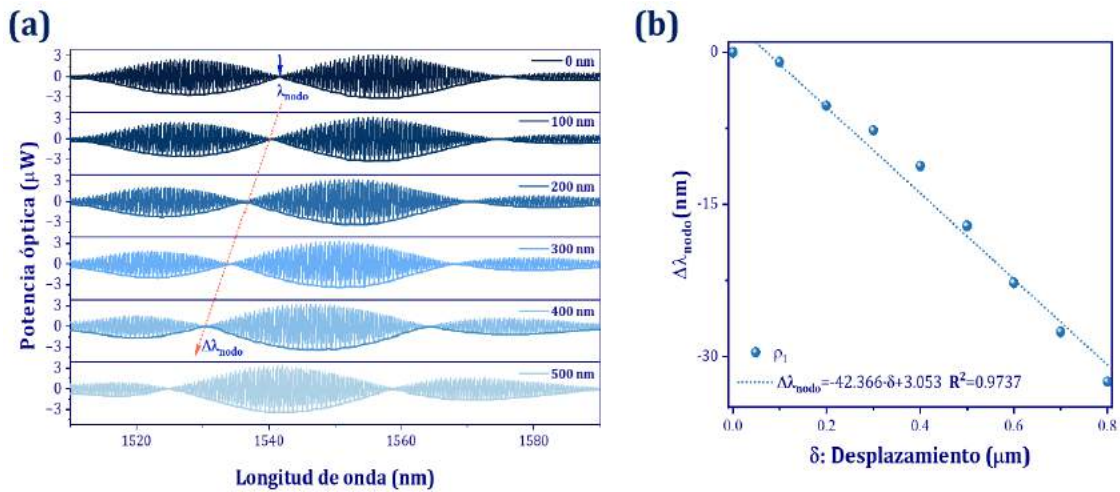


Figura 60. (a) Espectros ópticos modulados por una señal envolvente (resaltando su envolvente inferior) a desplazamientos de 0.1 μm inducidos en el SFO cuando $LCO_{\text{aire}} = LCO_{\text{vidrio}} + \rho_1$. (b) Curva característica del SFO con un ajuste lineal.

Debido a los distintos FSRs que se tienen cuando las LCOs mantienen una diferencia de ρ_2 y ρ_3 , el SFO es evaluado en cada uno de estas condiciones tal como se realizó para ρ_1 . En la Fig. 61 (a)-(b) se muestran los espectros modulados por una envolvente para los primeros seis desplazamientos de 0.1 μm inducidos en la cavidad de aire del IFPF-2C. La longitud inicial para cada caso, dónde toma lugar el efecto Vernier, es igual a $LCO_{\text{vidrio}} + \rho_2 = 1.72744 \text{ mm}$ y $LCO_{\text{vidrio}} + \rho_3 = 1.74942 \text{ mm}$, respectivamente. De estos dos casos, se puede observar que el FSR_3 de la envolvente que modula al patrón de interferencia es menor que el FSR_2 , siendo $\rho_3 > \rho_2$. La

influencia del FSR de la envolvente en la sensibilidad y resolución del SFO se analizó de la misma manera que en el caso de ρ_1 , es decir, la correlación entre $\Delta\lambda_{\text{nodo}}$ y $\Delta\delta$. En la Fig. 61 (c)-(d) se muestran las curvas de calibración del SFO para cada posición inicial con ρ_2 y ρ_3 respectivamente. Para el caso en el que la envolvente tiene el FSR₂, el SFO presentó una sensibilidad de $S = \frac{\Delta\lambda_{\text{nodo}}}{\Delta\delta} = 29.31 \text{ nm}/\mu\text{m}$. En el caso de la envolvente con el FSR₃, la sensibilidad que presenta el SFO es igual a $S = \frac{\Delta\lambda_{\text{nodo}}}{\Delta\delta} = 18.12 \text{ nm}/\mu\text{m}$. Las resoluciones calculadas para cada caso corresponden a 0.68 nm y 1.10 nm, respectivamente. Ambas sensibilidades y resoluciones son menores al obtenido en el caso de ρ_1 . Se puede ver que el FSR de la envolvente formada por el efecto Vernier influye en la sensibilidad y resolución del SFO. En consecuencia, un mayor FSR de la envolvente implica una mejora en el rendimiento del SFO.

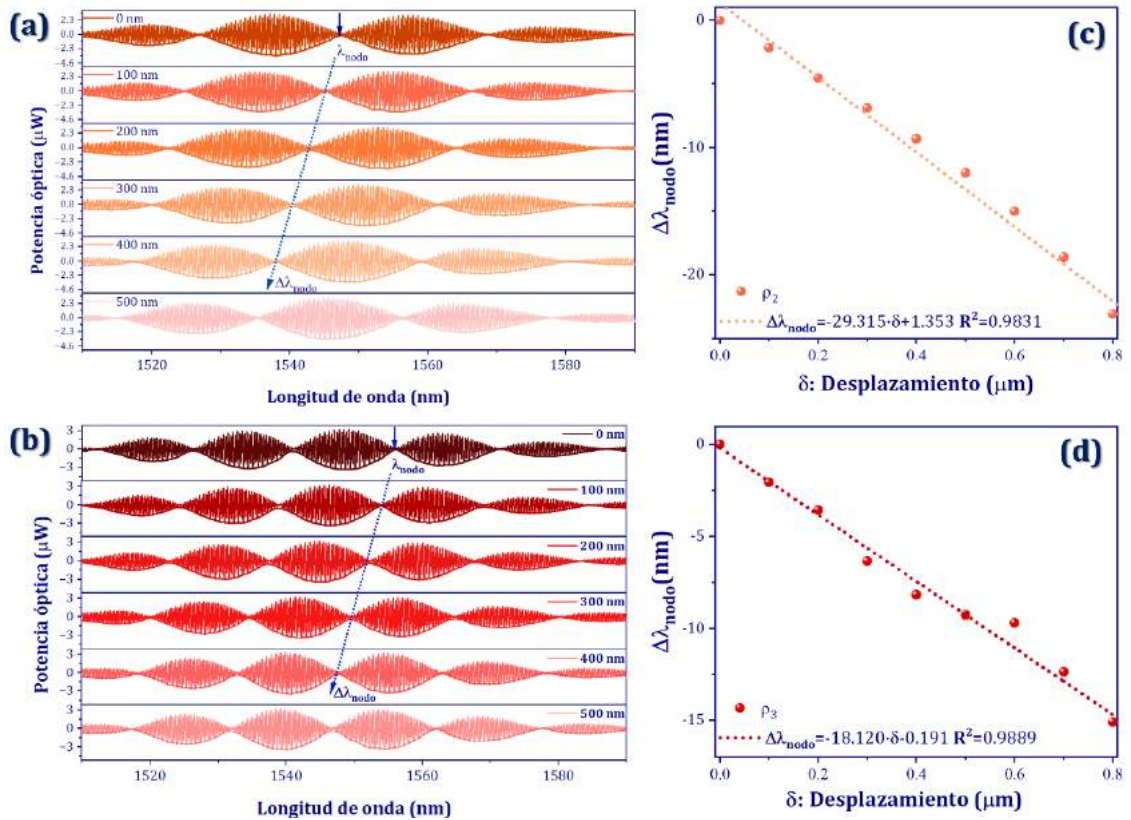


Figura 61. (a)-(b) Espectros ópticos modulados por una señal envolvente (resaltando su envolvente inferior) a desplazamientos de $0.1 \mu\text{m}$ cuando $\text{LCO}_{\text{aire}} = \text{LCO}_{\text{vidrio}} + \rho_2$ y $\text{LCO}_{\text{aire}} = \text{LCO}_{\text{vidrio}} + \rho_3$, respectivamente. (c)-(d) curva característica del SFO con un ajuste lineal obtenidos de (a) y (b) respectivamente.

Por otro lado, la técnica convencional para evaluar la sensibilidad del SFO se basa en el seguimiento de una de las franjas del patrón de interferencia localizado en $\lambda_{\text{IFPF-2C}}$. En este sentido se analiza el rendimiento del SFO mediante esta técnica con el fin de comparar con la técnica de efecto Vernier. Para ello, se toman los espectros ópticos que se obtuvieron en la condición de Vernier (I_{vernier}) para cuando $\text{LCO}_{\text{aire}} = \text{LCO}_{\text{vidrio}} + \rho$ aplicando $\delta = 0.1 \mu\text{m}$. Sin embargo, a estos espectros no se les realiza el proceso de sustracción de señal de referencia. Debido a la densidad de franjas presentes en el espectro óptico se tomó un rango estrecho de longitudes de onda para realizar el análisis del patrón de interferencia tal como se muestra en la Fig. 62. Se realiza el seguimiento de un mínimo en $\lambda_{\text{IFPF-2C}}$ en cada uno de los espectros ópticos obtenidos en cada desplazamiento inducido desde la posición inicial. Esto permite tener la curva de calibración que se observa en la gráfica insertada dentro de la Fig. 62, donde se correlacionan $\Delta\lambda_{\text{IFPF-2C}}$ y $\Delta\delta$. Un ajuste lineal es aplicado en la curva de calibración dando una sensibilidad del SFO de $S = \frac{\Delta\lambda_{\text{IFPF-2C}}}{\Delta\delta} = 0.54 \text{ nm}/\mu\text{m}$ y una resolución calculada de 37 nm.

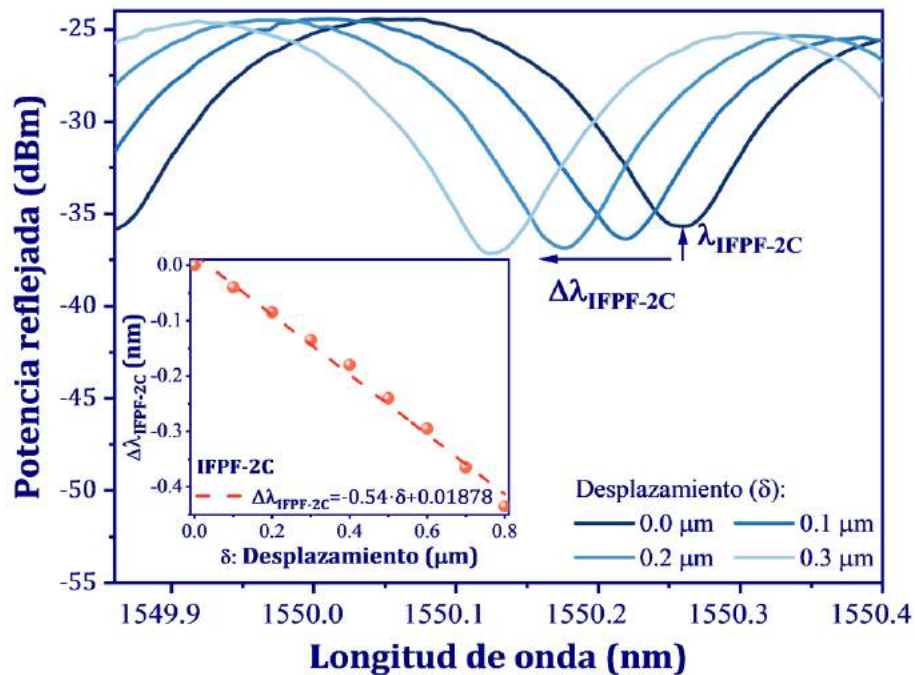


Figura 62. Patrones de interferencia del IFPF-2C en un rango estrecho de longitudes de onda para desplazamientos de 0.1 μm , y su curva de calibración.

La sensibilidad del SFO alcanzada con la técnica convencional resulta baja comparada a la obtenida con el seguimiento de la envolvente generada por el efecto Vernier. Mediante la técnica del efecto Vernier se pudo observar que la sensibilidad del mismo SFO puede ser aumentada hasta 80 veces. Es importante mencionar que la sensibilidad y resolución del SFO puede ser mejor cuando se aplica la técnica convencional, siempre que las LCO de las cavidades sean de alrededor de unos cuantos micrómetros. Pero en aplicaciones donde se requieren cavidades de tamaños macrométricos el rendimiento del SFO se encuentra limitado. Por lo que la técnica de efecto Vernier permite superar estas limitaciones brindando sensibilidades similares o mejores a las obtenidas a distancias micrométricas. Por otro lado, el esquema implementado en el IFPF-2C brinda un grado de libertad con el que se puede ajustar el rendimiento del SFO.

4.1.3 Perfilometría

El SFO de distancia basado en un IFPF-E a través de su cavidad libre permite ser incorporado en diversas aplicaciones donde el mecanismo principal lleve a un cambio en la longitud de dicha cavidad. En este sentido, el SFO fue aplicado para el desarrollo de un esquema de perfilometría sin contacto. Para esto se implementó el sistema de la Fig. 40 descrito en la sección 3.4.1.3 para el escaneo de una superficie escalonada. Este proceso se realizó de forma semiautomática, comenzando cuando el ISPM_{9.2 mm} en punta fue colocado a una distancia de 100 μm de la superficie bajo prueba. Luego, dicha superficie fue desplazada a través de una montura motorizada en dirección horizontal (eje X) del punto inicial, donde el ISPM_{9.2 mm} se mantuvo fijo, hasta una distancia de 300 μm . El movimiento de la superficie realizado de forma horizontal es conocido también como *desplazamiento en el plano*, en este caso se realizó en pasos de $\delta_{\text{perfil}} = 5 \mu\text{m}$. Para este estudio se utilizó la interfaz gráfica realizada en LabVIEW para el interrogador MicronOptics sm125, descrita en la sección 3.5.1, donde la señal reflejada fue adquirida y analizada en tiempo real. En este caso particular, se considera únicamente el análisis de la señal óptica en el dominio de Fourier. Para ser más precisos se registró únicamente la localización del pico del espectro Fourier en el eje de la longitud de camino óptico que el mismo programa de LabVIEW otorga en tiempo real. Las variaciones en la L_{aire} sobre el eje Y se registraron para cada uno de los puntos de

δ_{perfil} . A este cambio en vertical (eje Y) se le conoce como *desplazamiento fuera del plano*. En la Fig. 63 (a) considerando una distancia inicial de $100 \mu\text{m}$ del ISPM $_{9.2 \text{ mm}}$ se puede observar los desplazamientos en X y Y los cuales fueron correlacionados para trazar la forma en 2D de la superficie bajo prueba. El desplazamiento generado fuera del plano nos permitió obtener la altura del escalón ($h_{\text{escalón}}$) que corresponde a $9.1592 \mu\text{m}$. Mientras que el desplazamiento ejercido en el plano nos permitió medir la periodicidad de los escalones ($\Lambda_{\text{escalón}}$) siendo esta de $100 \mu\text{m}$. Siendo la superficie bajo prueba un patrón de calibración se encontró que los valores obtenidos concuerdan con los datos proporcionados por el fabricante.

Este mismo proceso de evaluar la superficie escalonada se realizó para una distancia inicial de $200 \mu\text{m}$ y $300 \mu\text{m}$, en la Fig. 63 (b)-(c) se puede observar los perfiles obtenidos para cada caso. Se observó que conforme la distancia inicial aumenta, en la medición del relieve se pierde precisión para trazar con más detalle la superficie y en consecuencia, para obtener los valores $h_{\text{escalón}}$ y $\Lambda_{\text{escalón}}$.

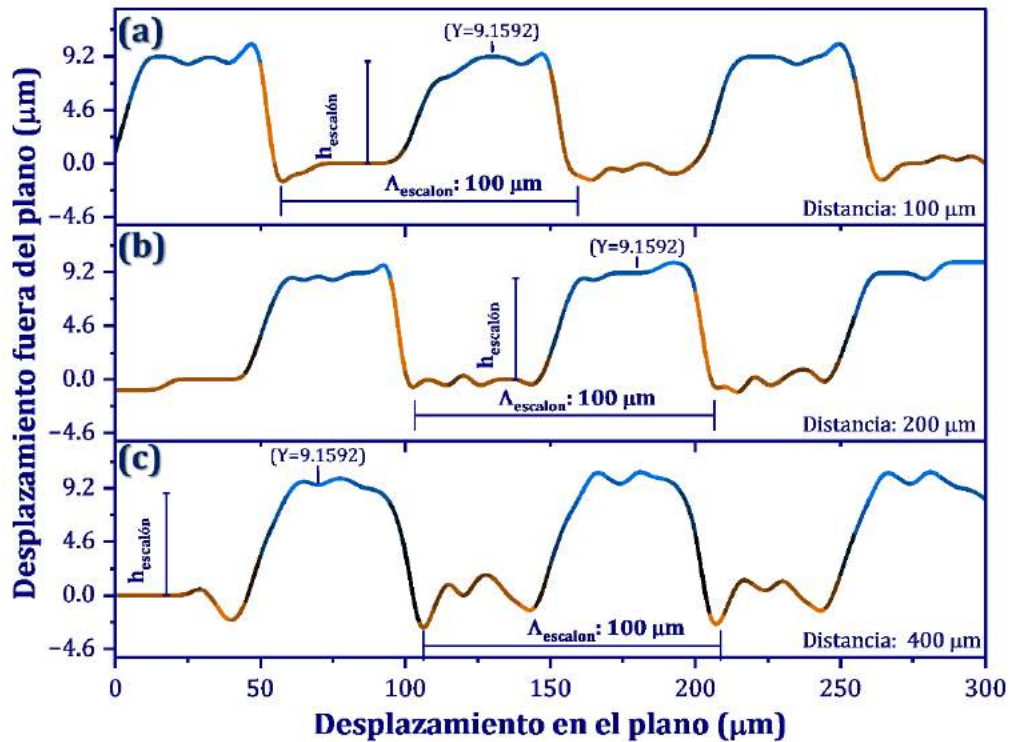


Figura 63. Perfil de una superficie con patrón escalonado evaluado con un ISPM en punta a una distancia de (a) $100 \mu\text{m}$, (b) $200 \mu\text{m}$ y (c) $400 \mu\text{m}$.

El resultado obtenido puede deberse al diámetro del haz que emerge e incide sobre la superficie. Conforme se aumenta la distancia del punto inicial, el haz va divergiendo e incide abarcando un área cada vez mayor de la superficie teniendo como resultado un promedio de ello. Para comprobar la influencia del diámetro del haz, en el IFPF-E se puede incorporar una SMF en lugar del ISPM_{9.2 mm} ya que el haz emerge con un diámetro mucho menor. Esto debido al núcleo de 9 μm de la SMF en contraste con el arreglo de 7 núcleos de la MCF utilizada. La misma metodología fue realizada para evaluar la superficie bajo prueba colocando la SMF a una distancia inicial de 100 μm . En la Fig. 64 se puede observar la correlación de los datos en el eje X y Y para trazar la superficie escalonada. Comparando el resultado obtenido en la Fig. 63 (a) cuando se utilizó el ISPM_{9.2 mm} con la misma distancia inicial, el relieve del patrón escalonado fue trazado de mejor forma utilizando la SMF, teniendo mayor precisión para obtener los valores de $h_{\text{escalón}}$ y $\Lambda_{\text{escalón}}$. No obstante, la medición puede ser realizada tanto con el ISPM como con la SMF en el IFPF-E, pero es conveniente tener un haz con diámetro pequeño.

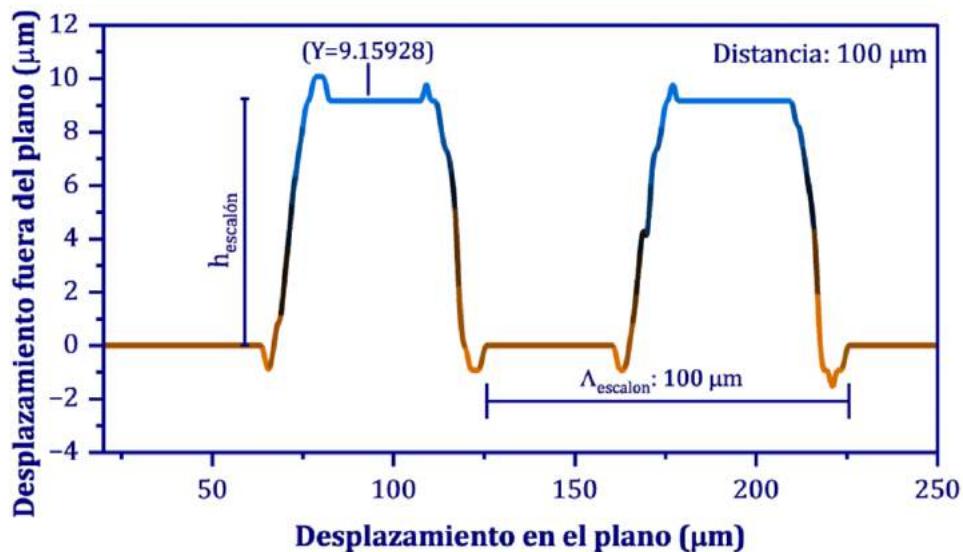


Figura 64. Perfil de una superficie con patrón escalonado evaluado con una SMF en punta a una distancia de 100 μm .

4.1.4. Detección de Deflexiones de micro-cantiléver

El SFO de distancia fue aplicado como técnica para la detección de deflexiones de micro-cantiléver funcionalizados con proteína BSA a una concentración de 25 $\mu\text{g/ml}$. Esto representa una primera aproximación en la biodetección de anti-BSA combinando una transducción optomecánica. Para ello se utilizó el sistema visto en la Fig. 41 cuya metodología de medición es descrita en la sección 3.4.1.4.

El esquema del SFO se basa en un IFPF-E cuya cavidad se conforma por la sección transversal del extremo de la SMF y la superficie del cantiléver funcionalizados. Una vez que se alineó la punta de SMF y se colocó a una $LCO \approx 40 \mu\text{m}$ respecto al micro-cantiléver se procedió a realizar la calibración del SFO bajo las condiciones óptimas para realizar la prueba de inmunoensayo, es decir, la cavidad fue inmersa en un medio basado en PBS. Después, la celda de fluido que mantiene al chip con los micro-cantilévers asegurados se desplaza en $\delta = 0.1 \mu\text{m}$ en dirección hacia la punta de fibra óptica, donde la señal reflejada es registrada en cada posición a través del interrogador MicronOptics sm125. En la Fig. 65 se observan los espectros ópticos de reflexión obtenidos donde el λ_{IFP} se desplaza hacia longitudes de onda cortas debido a que la LCO se reduce para cada δ . La correlación entre el desplazamiento en longitud de onda ($\Delta\lambda_{\text{IFP}}$) del patrón de interferencia y el cambio inducido en la LCO de la cavidad ($\Delta\delta$) permitió obtener; a través de, un ajuste lineal la curva característica del SFO, tal como se muestra en la gráfica insertada en la Fig. 65.

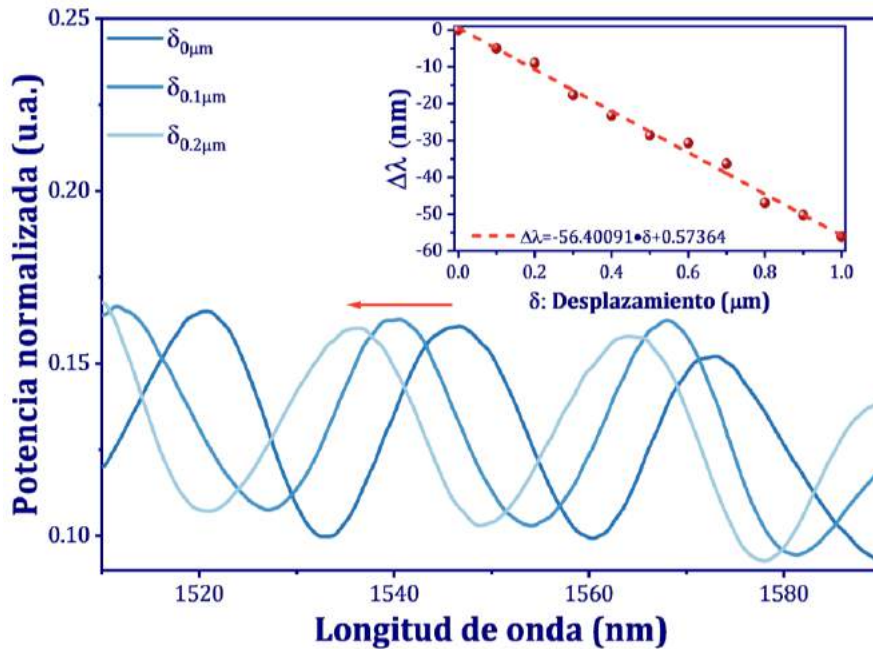


Figura 65. Espectros reflejado normalizados obtenidos a desplazamientos de $\delta=0.1 \mu\text{m}$. El recuadro es la curva de caracterización del SFO basado en una cavidad inmersa de PBS para el mecanismo de biodetección.

Con la curva característica del SFO descrita como $\Delta\lambda_{I\text{FPF}}(\text{nm}) = -56.4009 \cdot \delta(\mu\text{m}) + 0.5736$ se puede calcular la deflexión que se induce en el micro-cantiléver por la interacción que acontece en la biodetección del anti-BSA en el cantiléver funcionalizado. Para el proceso de la biodetección primero se registró una señal de referencia, es decir, cuando las estructuras micro-cantiléver se encontraron sumergidas en PBS, tal como se muestra en la gráfica (línea roja) de la Fig. 66 (a). Posterior a este paso, se introdujo la solución de PBS y anti-BSA a una concentración de $75 \mu\text{g/ml}$ a través de la entrada de la celda. En ese mismo instante, se monitoreó la señal reflejada donde se visualizó un desplazamiento hacia longitudes de onda largas, y después de un tiempo transcurrido el patrón de interferencia se estabilizó. En ese momento, se registró la señal óptica como se observa en la gráfica (línea azul) de la Fig. 66 (a). El desplazamiento del patrón de interferencia de esta última señal, en relación a la señal obtenida como referencia, fue de $\Delta\lambda = 20.12 \text{ nm}$, con dicho desplazamiento en longitud de onda y a través de la curva de caracterización se calculó que, para dicho evento, la deflexión del micro-cantiléver fue de 345.5 nm .

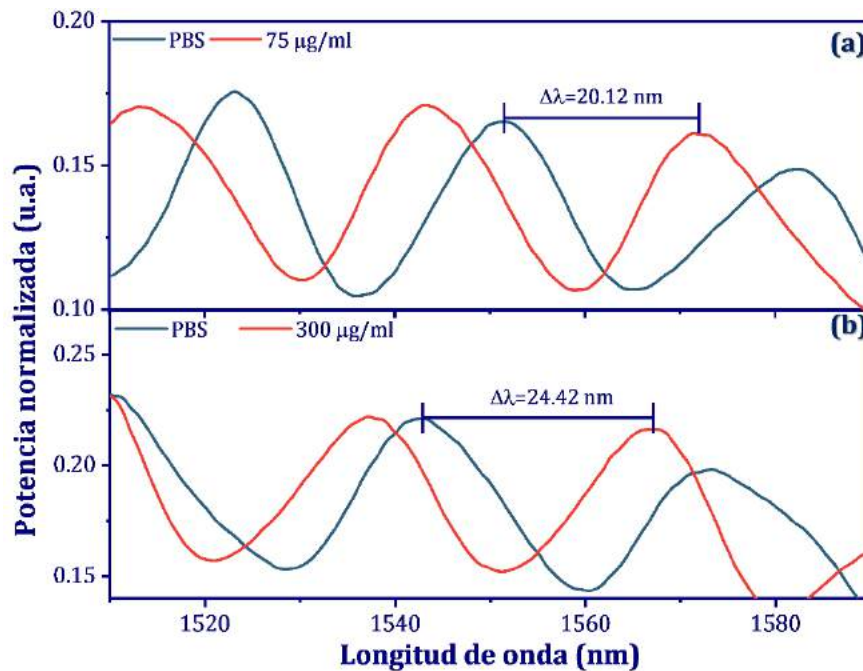


Figura 66. Desplazamiento del patrón de interferencia por la deflexión del micro-cantiléver cuando se encuentra inmerso en anti-BSA a una concentración de (a) 75 $\mu\text{g/ml}$ y (b) 300 $\mu\text{g/ml}$.

Por otro lado, se evaluó la plataforma de biosensado a una concentración mayor con la misma metodología del inmunoensayo realizado previamente. Primero se tomó la señal de referencia con las estructuras micro-cantiléver inmersas en PBS, y después se inyectó la solución de PBS y anti-BSA a una concentración de 300 $\mu\text{g/ml}$. En la Fig. 66 (b) se observan las señales registradas en cada uno de los eventos mencionados. De este ensayo se observó un desplazamiento del patrón de interferencia, gráfica (línea azul), respecto a la señal de referencia (línea roja) de $\Delta\lambda = 24.42 \text{ nm}$. En dicha concentración de anti-BSA, la deflexión calculada del micro-cantiléver fue de 422.8 nm. De esto se observa que cuanto mayor sea la concentración de anti-BSA, mayor será la deflexión del cantiléver. Esto es razonable debido al aumento de la carga de masa en la superficie del micro-cantiléver.

4.1.5 Caracterización de Muestras de Vidrio

El SFO de distancia fue implementado en un esquema de medición para la caracterización de muestras de vidrio las cuales fueron fabricadas en la Universidad de Guanajuato. En dichas muestras se requería conocer tanto su espesor como su índice de refracción. Siendo este último parámetro de gran importancia, ya que este permite relacionar y controlar los procesos o condiciones que se realizaron en la fabricación. Por ejemplo, estas muestras de vidrio basadas en borato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) se encuentran dopadas con elementos como Ce, Er, Cu o Ag a distintos porcentajes, las variaciones del índice de refracción que se presentan en relación a las condiciones de porcentaje permiten tomar acciones en el proceso de elaboración. En estas pruebas nos limitamos a etiquetar las muestras con las letras: H, I, J, K, L, M, N, O y P, cuya composición es únicamente conocida por el grupo de colaboración quien solicitó de dichas mediciones. Para esto se usó el sistema de la Fig. 42 con el proceso descrito en la sección 3.4.1.5. Para esta medición se utilizó el programa realizado en LabVIEW para el interrogador MicronOptics sm125. Una vez posicionado el ISPM_{9.2 mm} frente al espejo a una determinada distancia, la señal óptica vista y analizada en el dominio de Fourier en tiempo real fue registrada en ese instante. En la Fig. 67 se observa el espectro de referencia en línea naranja donde se aprecia un único pico debido a que este representa un esquema IFPF-E. Una vez realizada la toma de la referencia, el ISPM_{9.2 mm} se desplazó de forma horizontal hasta situarse sobre la muestra de vidrio, para este caso en la muestra H, donde el espectro de Fourier fue registrado como se muestra en la Fig. 65 en la gráfica con línea verde. En este espectro se observa tres picos los cuales corresponden a las componentes del esquema formado por un IFPF-2C. El primer pico corresponde a la cavidad del aire con una LCO_{aire} cuya L_{aire} equivale a la separación entre el ISPM_{9.2 mm} y la primera superficie de la muestra. El segundo pico se encuentra relacionado con la segunda cavidad, la muestra de vidrio, con una $\text{LCO}_{\text{vidrio}}$ determinada por los parámetros a conocer: n_{muestra} y h_{muestra} . Mientras que el tercer pico equivale a la suma de las LCOs de ambas cavidades, $\text{LCO}_{\text{aire}} + \text{LCO}_{\text{vidrio}}$.

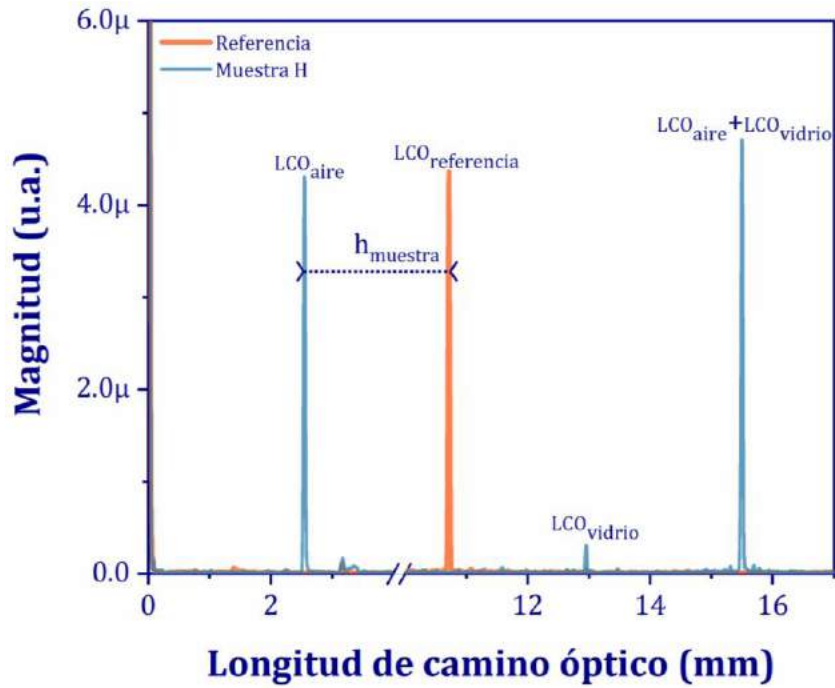


Figura 67. Espectros de Fourier de la señal óptica obtenida en el punto de referencia (línea naranja) y en la muestra H de vidrio (línea verde).

Una vez obtenidas las posiciones en el eje de la longitud de camino óptico de los picos de ambos espectros de Fourier vistos en la Fig. 67, se calculó tanto el $h_{muestra}$ y $n_{muestra}$ de la muestra H de forma simultánea. Para esto, el espesor de la muestra fue calculado por la diferencia definida por:

$$h_{muestra} = LCO_{referencia} - LCO_{aire} \quad (57)$$

Una vez obtenido el espesor, $h_{muestra}$, se calculó el índice de refracción de la muestra H tomando en cuenta que la LCO_{vidrio} es directamente proporcional a $n_{muestra}$ y $h_{muestra}$. Por lo tanto, conociendo LCO_{vidrio} y $n_{muestra}$ se pudo calcular el índice de refracción de la muestra como:

$$n_{muestra} = \frac{LCO_{vidrio}}{h_{muestra}} \quad (58)$$

Esta metodología se repitió 10 veces para obtener una estadística descriptiva en la relación a la desviación estándar del valor promedio obtenido de las mediciones

obtenidas con la técnica aplicada. Por otro lado, esta misma metodología fue realizada para la caracterización de las muestras de vidrio restanted. En la Fig. 68 se puede ver graficados el valor promedio y su desviación estándar del (a) h_{muestra} y (b) n_{muestra} de cada una de las muestras de vidrio proporcionadas por el grupo de colaboración; los valores obtenidos pueden ser vistos también en la Tabla 5.

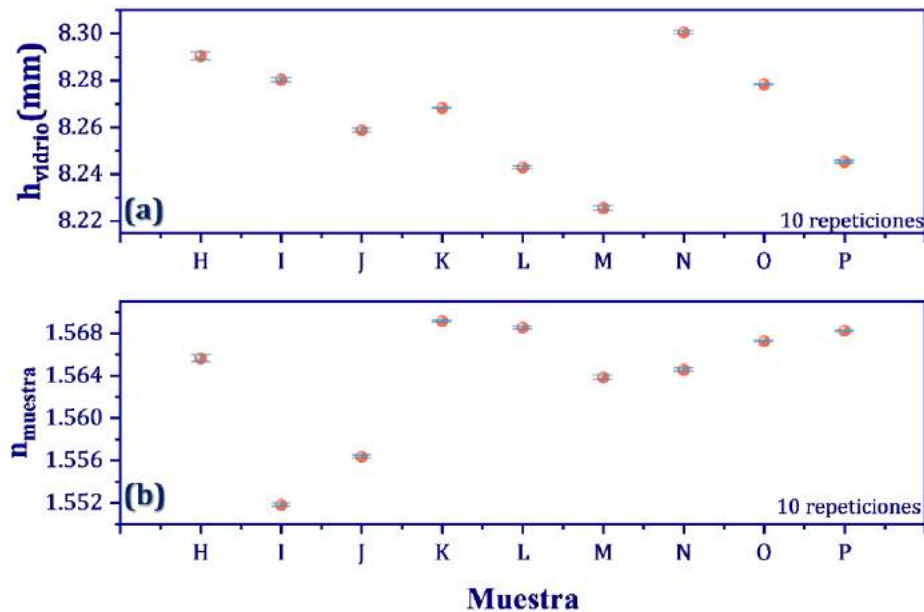


Figura 68. Valor promedio del (a) espesor e (b) índice de refracción de cada una de las muestras analizadas en 10 repeticiones.

Tabla 5. Datos del espesor e índice de refracción obtenidos con su desviación estándar de cada una de las muestras

Muestra de vidrio	Espesor	DS	Índice de refracción	DS
	mm	mm	-	-
H	8.2903	0.00168	1.5656	3.48E-04
I	8.2802	8.69E-04	1.5518	1.46E-04
J	8.2587	8.42E-04	1.5563	1.30E-04
K	8.2681	2.90E-04	1.5691	7.43E-05
L	8.2428	4.83E-04	1.5685	9.81E-05

M	8.2254	8.90E-04	1.5638	2.02E-04
N	8.3004	6.81E-04	1.5645	1.56E-04
O	8.2783	3.86E-04	1.5672	7.31E-05
P	8.2452	5.20E-04	1.5682	7.31E-05

4.1.6 Medición del Δn en Guías de Onda

El principio del SFO de distancia basado en un IFPF-2C fue aplicado en un proceso de fabricación de guías de onda inscritas (GO) por un láser femtosegundos en colaboración con un grupo interno del mismo centro de investigación dirigido por la Dra. Gloria Verónica Vázquez. El esquema de medición permitió caracterizar las GO fabricadas en un sustrato de vidrio sódico-cálcico tanto de forma cualitativa como cuantitativa. Dicho estudio permitió brindarle información al grupo de colaboración sobre la influencia de los parámetros de fabricación en el rendimiento de las GOs inscritas.

Para esto se utilizó el sistema representado en la Fig. 43 con la metodología descrita en la sección 3.4.1.6. En primer lugar, el ISPM_{9.2 mm} en punta fue colocado delante del sustrato para después alinearse con el centro de la GO inscrita a una velocidad del láser de 100 $\mu\text{m/s}$ (GO_{100}). Los espectros ópticos y de Fourier obtenidos se muestran en la Figura 69 (a) y (d), respectivamente. El espectro de reflexión de la Figura 67(a) muestra un patrón en el que es posible distinguir dos modulaciones con diferente FSR. La modulación con mayor FSR se debe a la cavidad de aire, ya que la punta de la fibra se colocó a una distancia corta de la sección transversal del sustrato. Así, la modulación con FSR más corto se relaciona a la cavidad conformada por el sustrato, en este caso de la GO_{100} . Por otro lado, se aprecian tres picos en el espectro de Fourier de la Fig. 69 (d), la posición de cada pico corresponde a la LCO de la cavidad de aire (LCO_{aire}), la cavidad del sustrato en este caso por el núcleo de la GO_{100} ($\text{LCO}_{\text{núcleo}}$), y la suma de ambas cavidades ($\text{LCO}_{\text{aire+núcleo}}$). Sin embargo, el segundo pico es el de mayor interés porque representa la información que describe el índice de refracción modificado que forma el núcleo de la GO_{100} . La $\text{LCO}_{\text{núcleo}}$ del GO_{100} resultó ser de 10.7624 mm; por tanto, conociendo la $L_{\text{sustrato}} = 7.08$ mm, el índice de refracción calculado del núcleo fue de 1.5201.

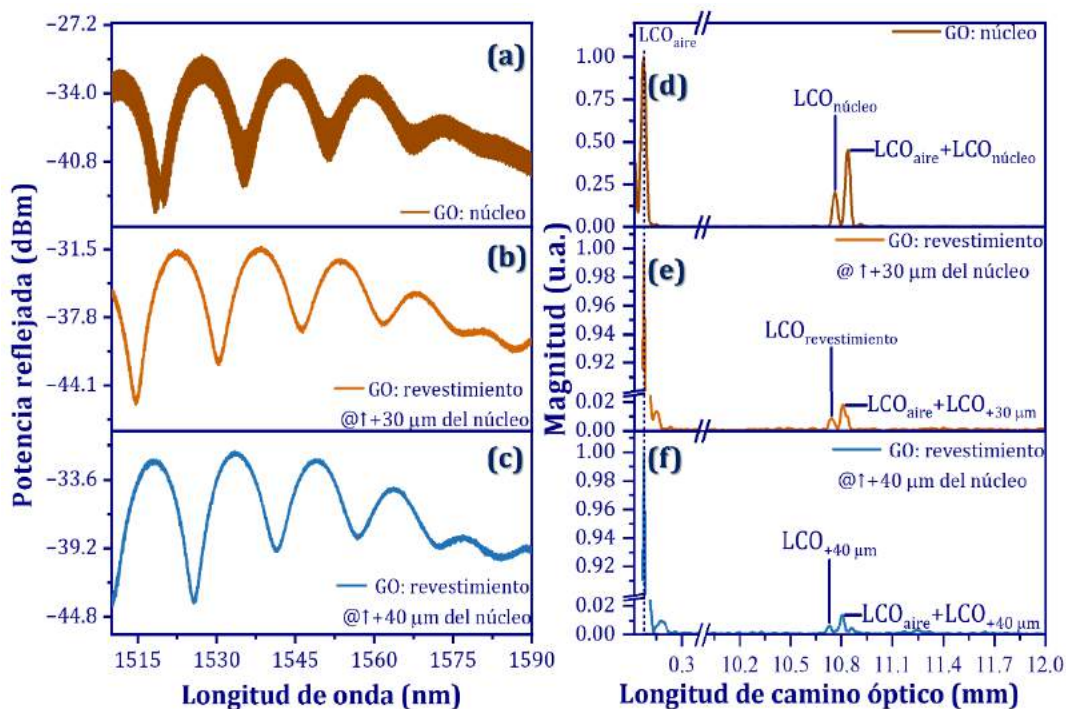


Figura 69. Espectros ópticos obtenidos de la luz reflejada desde el (a) núcleo de la GO inscrita a $100 \mu\text{m/s}$, desde el revestimiento de la GO inscrita a (b) $30 \mu\text{m}$ y (c) $40 \mu\text{m}$ fuera del núcleo. (d)-(f) Espectros de Fourier de cada uno de los espectros ópticos, respectivamente.

Para conocer en qué medida se modificaba el índice de refracción del sustrato que forma el núcleo de la GO debido a la absorción de múltiples fotones en el proceso de inscripción por un láser de fs, se llevó a cabo el análisis anterior, pero situando la punta de la fibra a $30 \mu\text{m}$ y $40 \mu\text{m}$ del centro de la GO_{100} , considerando estas dos regiones como el revestimiento de GO_{100} . Los espectros ópticos y de Fourier a la distancia de $30 \mu\text{m}$ se muestran en la Figura 69 (b) y (e), mientras que los obtenidos a $40 \mu\text{m}$ se muestran en la Figura 69 (c) y (f). En ambos espectros de Fourier, los picos de la $\text{LCO}_{\text{revestimiento}}$ se localizan a un valor menor que el pico de la $\text{LCO}_{\text{núcleo}}$ visto en la Fig. 69 (d). Además, la magnitud del pico disminuye significativamente conforme la medida es tomada a más distancia del núcleo de la GO_{100} . También se observa en el espectro óptico de la Fig. 69 (b) y (c) que la modulación con menor FSR presenta un bajo contraste de sus franjas de interferencia en comparación con el espectro óptico de la Figura 69 (a). Esto se debe a la divergencia del haz al propagarse dentro del sustrato, ya que en estas posiciones no se cumplen las condiciones para el confinamiento de la luz como en el caso en el que se localiza el núcleo de la GO_{100} . El $n_{\text{revestimiento}}$ calculado

en cada posición, +30 μm y +40 μm distante del núcleo, fue de 1.5159 y 1.5154. Puede observarse que estos valores son inferiores al $n_{\text{núcleo}}$ calculado para el GO₁₀₀. Por lo tanto, las diferencias de índice de refracción obtenidas, Δn_1 y Δn_2 , son 4.2×10^{-3} y 4.7×10^{-3} para cada posición. Las otras guías de onda inscritas a velocidades de 200 $\mu\text{m/s}$ (GO₂₀₀) y 300 $\mu\text{m/s}$ (GO₃₀₀) fueron evaluadas bajo el mismo procedimiento y sus diferencias de índice de refracción se resumen en la Tabla 6. Como puede observarse, estos valores tienden a aumentar ligeramente a medida que aumenta la velocidad de escritura.

Δn ($n_{\text{GO}} - n_{\text{revestimiento}}$)	Índice de refracción relativo a diferentes velocidades de escaneo del láser fs.		
	100 $\mu\text{m/s}$	200 $\mu\text{m/s}$	300 $\mu\text{m/s}$
Δn_1 (@30 μm)	4.2×10^{-3}	4.6×10^{-3}	5.3×10^{-3}
Δn_2 (@40 μm)	4.7×10^{-3}	4.9×10^{-3}	5.7×10^{-3}

Tabla 6. Índice de refracción relativo obtenido para cada una de las guías de onda inscritas a diferentes velocidades de barrido del láser.

La técnica de caracterización fue aplicada también en la medición del Δn de una fibra óptica comercial, SMF-28, cuyo valor calculado fue comparada con el dato otorgado por el fabricante. Primero, la punta del ISPM_{9.2 mm} se alineó al núcleo de la una sección corta de una SMF-28, dejando una separación entre ambas fibras ópticas de 5 μm , en esta posición la señal reflejada de ambas cavidades es registrada tal como se muestra en la Fig. 70 (a). Después, se desplazó el ISPM_{9.2 mm} a 50 μm fuera del núcleo ubicándose sobre el revestimiento de la SMF-28. En dicha posición la señal óptica fue registrada, ver Fig. 70 (b), para finalmente proceder al cálculo de Δn . Ambos espectros ópticos obtenidos se analizaron en el dominio de Fourier de donde se localizó la posición de cada uno de los picos sobre el eje de la longitud de camino óptico, tal como se muestra en la Fig. 70 (c)-(d). Una de las limitaciones que se te tuvo en esta prueba fue la de conocer con precisión la longitud física de la sección de la SMF-28 analizada. No obstante, el Δn puede obtenerse en relación a la $LCO_{\text{núcleo}}$ y la $LCO_{\text{revestimiento}}$ como:

$$\Delta n = \frac{LCO_{\text{núcleo}} - LCO_{\text{revestimiento}}}{LCO_{\text{núcleo}}} \quad (59)$$

siendo $LCO_{\text{núcleo}} = 64.4035$ mm y $LCO_{\text{revestimiento}} = 64.2056$ mm, el Δn calculado es 0.003 o bien 0.3%. Este valor calculado corresponde a lo que el fabricante reporta para fibras ópticas comerciales.

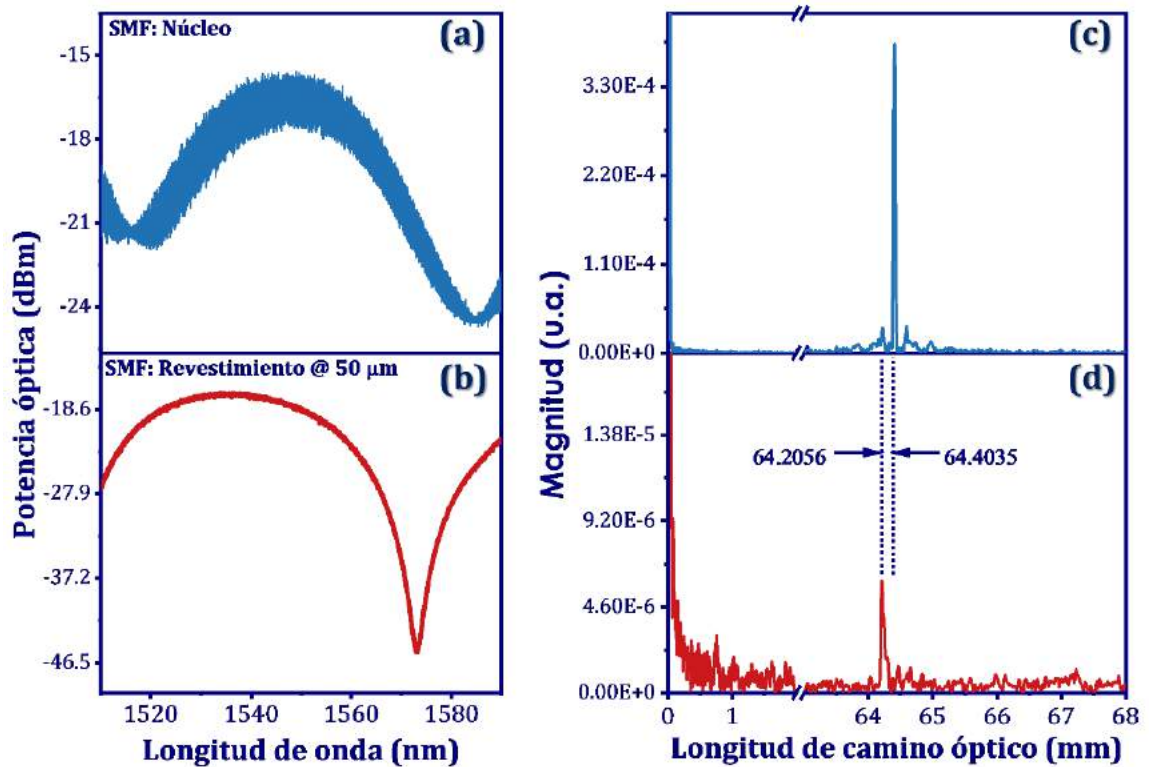


Figura 70. Espectros ópticos obtenidos de la luz reflejada desde el (a) núcleo y el (b) revestimiento de la SMF-28; 50 μm fuera del núcleo. (c)-(d) Espectros de Fourier de cada uno de los espectros ópticos, respectivamente.

4.2 Fibra multinúcleo (3 núcleos)

4.2.1 Fuerza

En la Fig. 71 se observa el espectro reflejado del DFOS descrito en la sección 3.3.2, dicha respuesta se genera por medio de una estructura en punta conformada por un ISPM en serie con una FBG. La FBG tiene una L_{FBG} de 5 mm y el máximo del pico está en $\lambda_B \approx 1549.98$ nm, situada sobre la pendiente formada entre el máximo y el mínimo del patrón de interferencia generado por el ISPM basado en una MCF_3 con una L_{MCF} de 6.2 mm. Esta configuración permite que el SFO de fuerza opere mediante la técnica de punto de cuadratura descrita en la sección 3.4.2. Cabe recalcar que el principio de funcionamiento del SFO de fuerza explota la sensibilidad que posee el ISPM para detectar doblamiento, identificando tanto la dirección como la magnitud de la fuerza aplicada. El ISPM basado en una MCF_3 fue previamente propuesto como SFO de doblamiento por el grupo de investigación del Dr. Joel Villatoro (Amorebieta et al., 2021). De este trabajo, se conoce que los núcleos de la MCF_3 varían sus índices de refracción de acuerdo al plano y orientación en los que se induce el doblamiento. Además, durante el doblamiento ejercido los núcleos son sometidos a distintos niveles de tensión/compresión, esto debido a la asimetría de la MCF_3 . En nuestro caso, el doblamiento ejercido por la fuerza aplicada en el DFOS genera un cambio del índice de refracción de los núcleos que conduce a cambiar la constante de propagación de los SPs, lo que da lugar a un desplazamiento del patrón de interferencia en términos de longitud de onda. Este desplazamiento del espectro junto con la técnica de cuadratura se aprecia sobre la respuesta de la FBG a λ_B como un cambio en la intensidad, mientras que dicha respuesta se mantiene fija en longitud de onda.

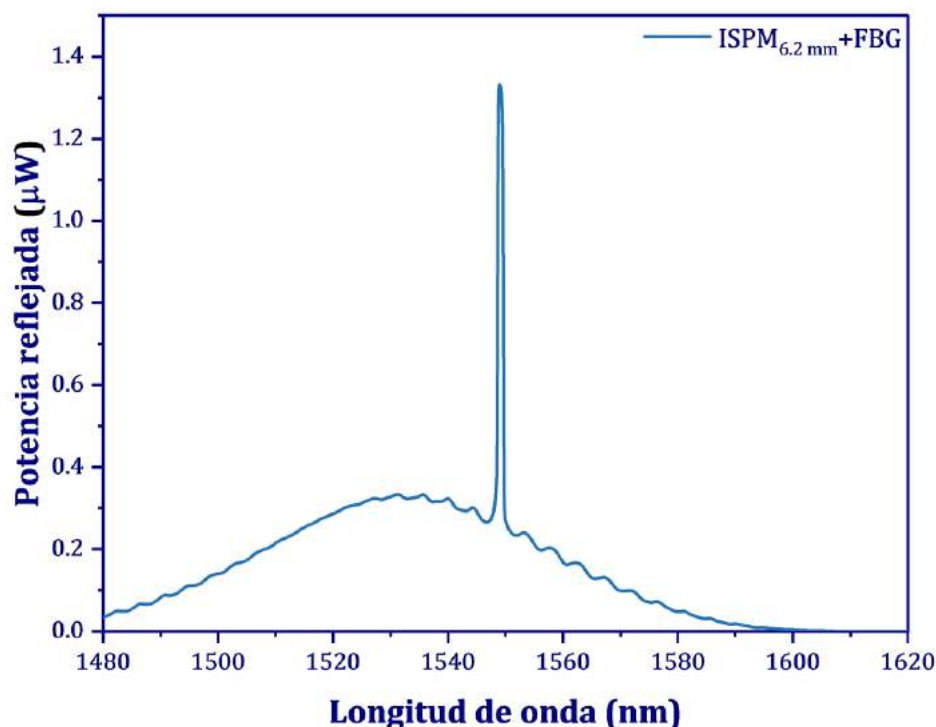


Figura 71. Espectro reflejado del ISPM en punta basado en una MCF₃ en serie con una FBG.

Bajo este principio se procedió a evaluar el rendimiento del SFO en la detección de fuerza estimadas en el rango de los μN , utilizando el sistema descrito en la sección 3.4.2.1. Es importante mencionar que al DFOS se le realizó un corte en ángulo en su extremo final con el fin de eliminar la reflexión de la superficie final de la fibra óptica y observar únicamente en la señal reflejada la respuesta de la FBG; esto no afecta el principio de cuadratura ya que el ISPM precede a la FBG. Primero, se colocó el DFOS con los núcleos orientados a 0° , es decir, cuando los núcleos se encuentran configurados en forma de V rotada, en esta posición se registró la señal reflejada en la posición inicial, es decir, sin ejercer una fuerza sobre el DFOS. Después, se aplicó una F^+ calculada de $38.80 \mu\text{N}$ sobre el DFOS, a través del desplazamiento en vertical de la viga colocada de forma perpendicular. Esto se repitió hasta ejercer una fuerza total de $\sim 400\text{-}500 \mu\text{N}$ y se registró cada una de las señales reflejadas en cada uno de los intervalos de la F^+ aplicada. Para evaluar la respuesta del SFO para detectar la dirección en la que se aplica la fuerza, este mismo procedimiento se realizó con una dirección opuesta, es decir, aplicando una F^- . De igual manera, se analizó el rendimiento del SFO de acuerdo a la orientación de los núcleos, rotando el DFOS en sentido horario a 30° ,

45°, 60°, 90°, 135° 150° y 180° y para cada caso se realiza el mismo procedimiento de evaluar su respuesta aplicando una fuerza tanto F^+ como F^- .

En la Fig. 72 se puede observar la respuesta del SFO evaluado cuando los núcleos se encuentran a 90°. Conforme se aumentó la F^+ aplicada al DFOS, la intensidad del espectro reflejado disminuyó, véase Fig. 72 (a). Esto se debe principalmente a la tensión ejercida en la MCF_3 generando un cambio en el índice de refracción en los núcleos, lo que cambia las condiciones en la función de transferencia vistas como el desplazamiento del patrón de interferencia a longitudes de onda cortas. Al incrementar la F^+ que se aplica sobre el DFOS se aproxima a tener una interferencia destructiva (potencia mínima) en λ_B , lo que lleva a incidir una potencia menor en la FBG. Ahora bien, con la asimetría de los núcleos se pudo observar que la respuesta del SFO no es la misma cuando se aplicó una F^- , véase la Fig. 72 (b) donde la señal reflejada presenta un aumento en la intensidad del pico en λ_B . Esto se debe a que las condiciones en el cambio del índice de refracción de los núcleos llevan a un desplazamiento del patrón de interferencia hacia longitudes de onda largas. De forma contraria al caso anterior, una interferencia constructiva se aproxima a ser generada en λ_B conforme se aumenta la F^- . Nótese que los espectros reflejados se encuentran normalizados, esto respecto a la señal obtenida cuando no se aplica ninguna fuerza sobre el DFOS. Se realizó un seguimiento de la variación de la potencia de acuerdo a la magnitud de fuerza aplicada. En la Fig. 72 (c) se muestra la relación obtenida de acuerdo a la fuerza y dirección aplicada para cuando los núcleos se encuentran a 90°, para ambos casos las curvas fueron ajustadas de forma lineal. El SFO presentó una sensibilidad de $S=-3.9092 \times 10^{-4}$ u. a./ μN cuando se aplicó una F^+ . Mientras que para una F^- aplicada, el SFO exhibe una sensibilidad de $S=3.8811 \times 10^{-4}$ u. a./ μN .

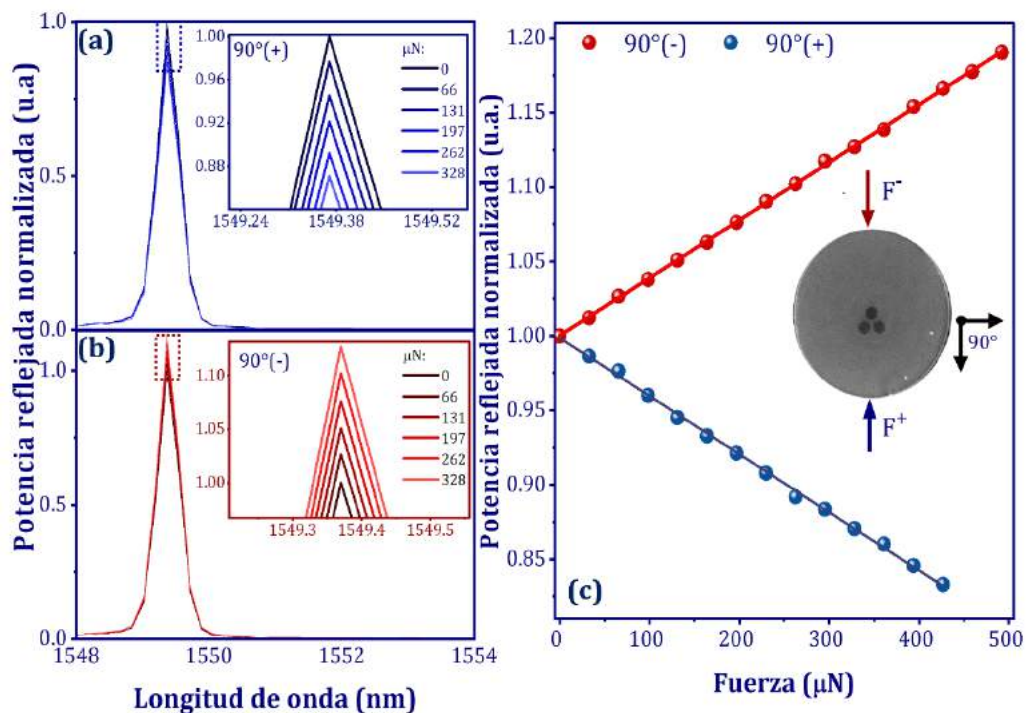


Figura 72. Espectros reflejados del SFO en respuesta a la dirección de la (a) F^+ y (b) F^- aplicados, cuando los núcleos se encuentran a 90° . (c) Curva de calibración del SFO de acuerdo a la dirección de la fuerza aplicada.

Por último, se analizó la relación entre los cambios en intensidad y la fuerza aplicada de acuerdo a la orientación de los núcleos sobre un rango de 180° . De este análisis se obtuvo la sensibilidad del SFO para cada caso evaluado. En la Fig. 73 se puede observar las diferentes sensibilidades que presenta el SFO conforme se encuentran orientados los núcleos de la MCF_3 en el instante en el que se aplicó cada una de las fuerzas. De ello se observa que para ángulos mayores a 0° la sensibilidad es mayor para ambas direcciones de fuerza aplicada, y son distintas debido a la asimetría de los núcleos los cuales son sometidos a tensión/compresión a diferentes magnitudes.

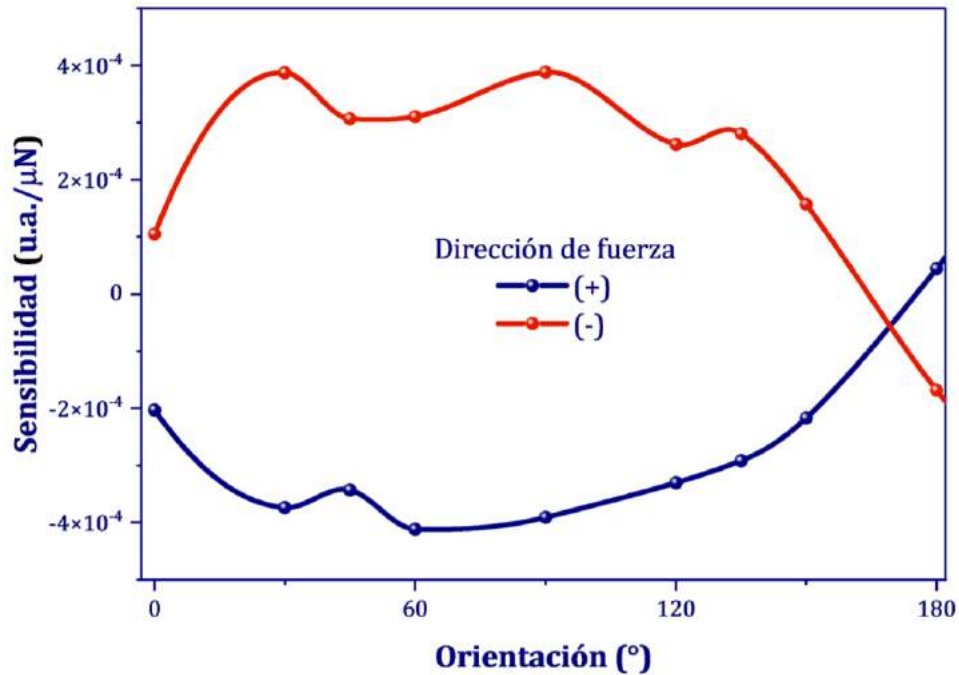


Figura 73. Relación de la sensibilidad del SFO cuando se aplica la fuerza de acuerdo a la orientación de los núcleos.

4.2.2 Temperatura

Como parte de esta investigación, se evaluó la respuesta del SFO en la detección de cambios de temperatura. Para esto se utilizó el sistema descrito en la sección 3.4.2.2. En estas pruebas se configuró el horno de temperatura de forma remota mediante el programa realizado en LabVIEW de la sección 3.5.2, se inició desde una temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ con intervalos de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, la señal reflejada del SFO fue monitoreada en tiempo real. En la Fig. 74 (a) se observa el comportamiento del espectro reflejado sobre el rango de temperatura el cual se desplazó hacia longitudes de onda largas conforme se aumentó la temperatura. Esto se debe principalmente a la modificación de la FBG, es decir, se modifica el índice efectivo del modo del núcleo y la longitud física de Λ_{FBG} debido a los coeficientes termo-óptico y de expansión térmica de la fibra óptica. Por otro lado, con el fin de evaluar la recuperación del SFO se aplicó un descenso de la temperatura una vez que se llegó a la temperatura de 80° . Durante el

calentamiento/enfriamiento del horno de temperatura se realizó el seguimiento de λ_B sobre el tiempo transcurrido en ambos eventos realizados. En la Fig. 74 (c) se observa el desplazamiento de λ_B en el tiempo observando que se forma una rampa durante el proceso. Se puede apreciar que el SFO responde de acuerdo al comportamiento interno del horno de temperatura, es decir, cuando se aumenta (disminuye) la temperatura, λ_B se desplaza a longitudes de onda largas (cortas) formando un escalón sobre el tiempo en el que el horno llega a la temperatura asignada. En la Fig. 74 (b) se observan las curvas características del SFO durante el calentamiento y enfriamiento del horno de temperatura. En ambas curvas se relaciona el desplazamiento de λ_B con la temperatura y las cuales fueron ajustadas de forma lineal. La sensibilidad para ambos casos es de $S=9.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, esto determina que el SFO no presenta histéresis en su respuesta a temperatura.

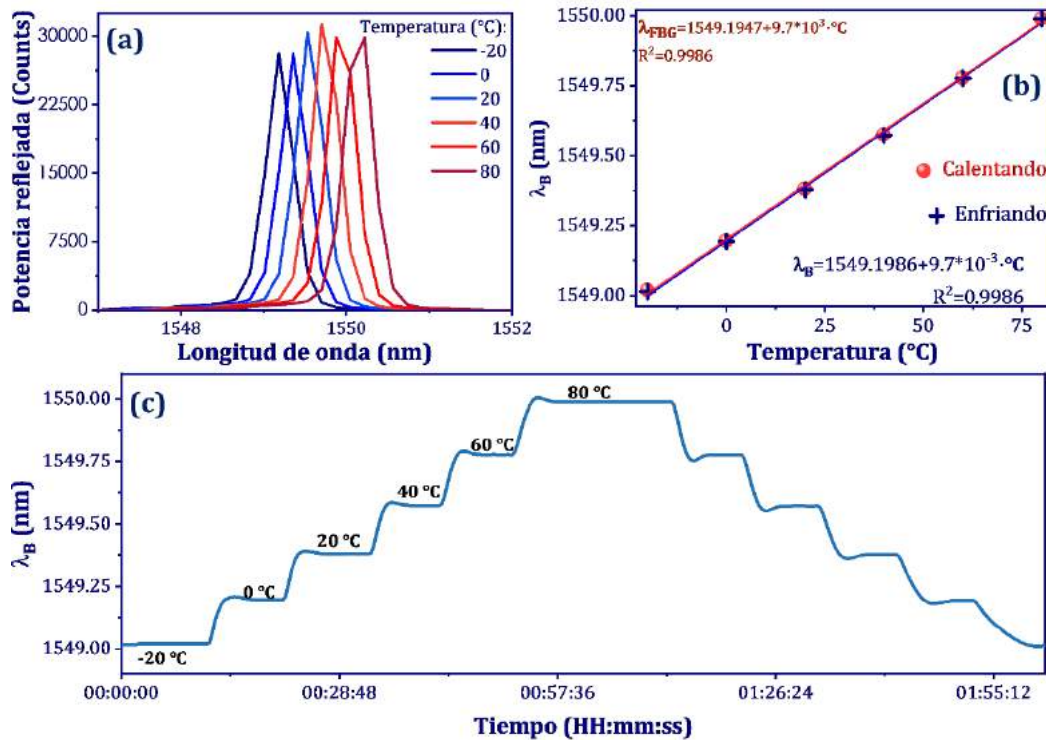


Figura 74. (a) Espectros reflejados del SFO a cambios de temperatura. (b) Relación entre la temperatura y el desplazamiento de la λ_B . (c) Respuesta en longitud de onda del SFO sobre el tiempo.

4.2.3 Detección de Impacto

El SFO de fuerza fue aplicado junto con su principio de funcionamiento en la detección de impactos con distintas energías. Estas pruebas se realizaron utilizando el sistema descrito en la sección 3.4.2.3. En estas pruebas se toma ventaja de las variaciones en intensidad que se generan cuando una fuerza, o en este caso un impacto, es inducido sobre el DFOS. Bajo esta premisa, se prescindió del uso del interrogador I-MON 512 por un fotodetector conectado a un osciloscopio con el que se registraron las variaciones de la intensidad en términos de voltaje, tal como se muestra en la Fig. 46 (a). El dispositivo fue probado utilizando distintas bolas de acero, las cuales fueron liberadas a distintas alturas, ya que variando la masa o altura se puede obtener distintos valores de energía de impacto de acuerdo a la Ec. 52. Para el impacto de menor energía, de 0.1 mJ, se usó la bola de 0.1 g que fue liberada a una altura de 2 cm. Mientras que para producir el impacto de mayor energía se utilizó la bola de 1.4 g liberada a 6 cm de altura. La respuesta del SFO se muestra en la Fig. 75 (a)-(c) para tres valores distintos de energía producidos durante el impacto. Las señales se encuentran normalizadas (Δ Voltaje) y posicionadas en la base igual a 0, al restar el voltaje inicial (Voltaje_{offset}) registrado antes de cada impacto. Los impactos inducen un doblamiento de la pieza en voladizo en la que el DFOS se encuentra adherido. En consecuencia, un cambio en la intensidad de la luz reflejada es generado y visto como una variación en el voltaje registrado por el osciloscopio. Con una energía de impacto de 0.1 mJ sobre el voladizo se puede apreciar que, en un instante de tiempo, el voltaje aumenta y desciende de forma abrupta, tal como se muestra en la gráfica de la Fig. 75 (a). Este comportamiento es debido a la vibración que se genera tras la onda de choque; sin embargo, el cambio en el voltaje disminuye en el tiempo hasta llegar a estabilizarse en el nivel inicial. Es importante notar que el SFO tiene la capacidad de detectar tanto el momento del impacto como el evento dinámico que ocurre después hasta que el voladizo se estabiliza. El aumento de la señal al impulso se debe principalmente al doblamiento que se genera sobre la MCF y considerando que el DFOS fue colocado con los núcleos colocados a 90°. Por otro lado, se observa que conforme se aumentaba la energía del impacto este generaba un cambio mayor en el voltaje, tal como se aprecia en las gráficas de la Fig. 75 (b)-(c). El SFO fue sometido a diferentes impactos, en el rango de 0.1 a 8.3 mJ, con 10 repeticiones para cada valor. En la Fig. 75 (d), se grafica la amplitud del voltaje promedio ($\Delta V_{\text{promedio}}$) registrada con respecto a la energía de impacto aplicado, observando que conforme la energía de impacto es mayor, la amplitud aumenta. No obstante, para impactos con energías mayores a 4 mJ la amplitud

aumenta en menor proporción que para valores menores de impacto. Este comportamiento se debe en gran medida al diseño y material de la pieza impresa en 3D ya que este no es suficientemente flexible ocasionando un límite en el doblamiento del DFOS.

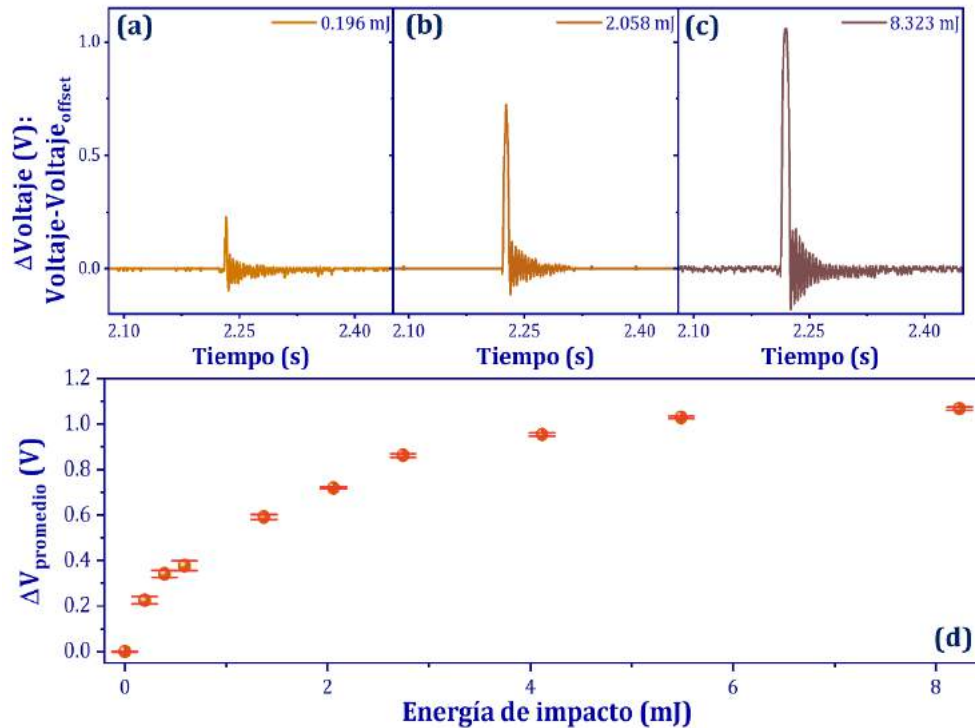


Figura 75. (a)-(c) Variación en el voltaje sobre el tiempo a diferentes valores de energía de impacto. (d) Cambio en el voltaje a diferentes valores de energías de impacto (valor promedio y desviación estándar obtenidos de 10 repeticiones).

4.2.4 Detección de Contacto con Sentido de Dirección

El SFO fue aplicado en la detección de una fuerza de contacto. Para esta prueba se utilizó el sistema descrito en la sección 3.4.2.4. Bajo el mismo esquema en voladizo de la sección previa, el SFO fue configurado para tomar ventaja de su principio de

funcionamiento basado en la variación de la intensidad cuando se somete a un doblamiento. Para este caso en particular, el doblamiento fue generado al aplicar una fuerza de contacto en dos direcciones inducida por el dedo de una mano, llevando a una variación en el voltaje en forma de picos tal como se muestra en la Fig. 76. En la respuesta del SFO se observó que iniciando en una posición estable, es decir, sin aplicar un contacto, el voltaje se mantuvo constante sobre el tiempo. Sin embargo, cuando se tocó el SFO en un sentido negativo, llevándolo a un doblamiento hacia abajo de la estructura, se observó un pico en ese instante cuyo valor máximo aumenta respecto al voltaje base. Esto ocurre de forma inversa cuando se tocó el SFO en un sentido positivo, doblando hacia arriba la estructura, lo que generó en ese mismo instante un pico de forma inversa lo que corresponde a una disminución del voltaje respecto al voltaje base. En ambos casos se pudo observar que los picos no tienen la misma amplitud esto debido a la magnitud de la fuerza de contacto que fue aplicada sobre el SFO. Una de las limitaciones que se tuvo en esta investigación fue la de poder caracterizar el SFO a valores conocidos de la fuerza de contacto aplicada con el fin de obtener su curva de calibración. No obstante, se demostró de forma cualitativa el funcionamiento del SFO pudiendo aplicarse como un dispositivo de presencia; o bien, un switch óptico de tipo ON/OFF.

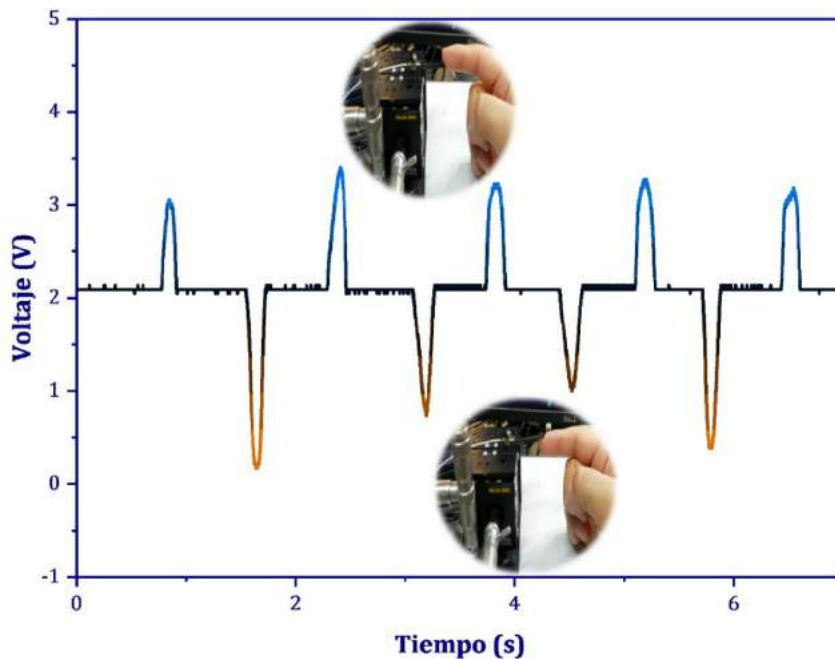


Figura 76. Variación del voltaje en la detección de una fuerza de contacto distinguiendo el sentido en el que se aplica.

4.3 Fibra multinúcleo (2 núcleos)

4.3.1 Doblamiento

El DFOS descrito en la sección 3.3.3 se basa en una MCF₂ en cuyos núcleos se albergan FBGs inscritas, y el cual fue evaluado como SFO de doblamiento utilizando el sistema detallado en la sección 3.4.3.2. El principio de funcionamiento es similar al SFO de fuerza descrito previamente donde se combinan las respuestas del ISPM con la FBG, donde el doblamiento inducido en el DFOS lleva a un desplazamiento del patrón de interferencia que se aprecia en un cambio en la potencia de la FBG en λ_B , longitud de onda en la que se accede a la técnica de punto de cuadratura.

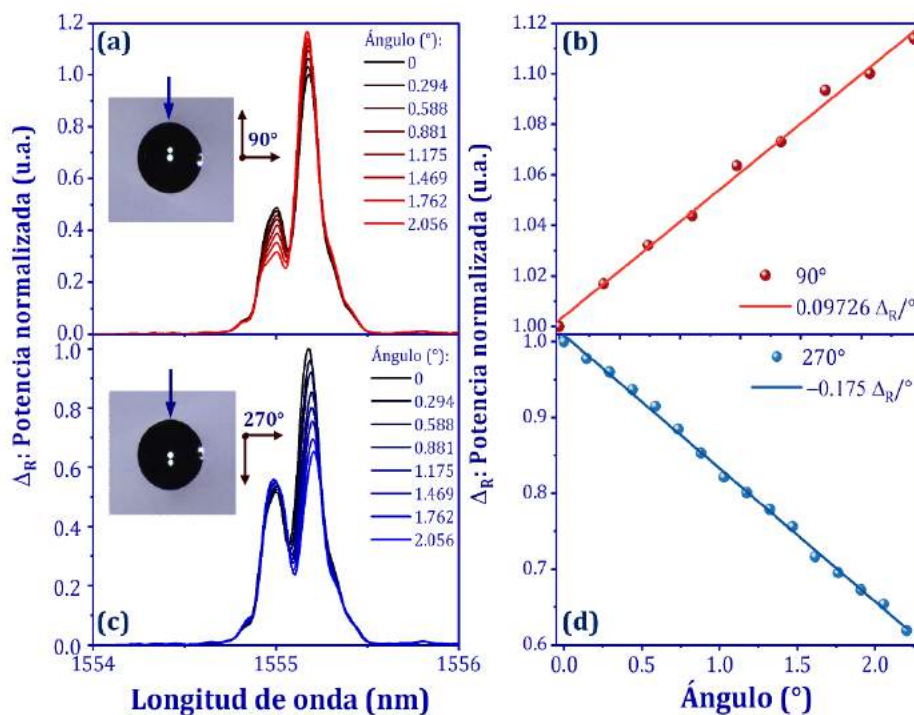


Figura 77. Espectros reflejados del SFO sometido a doblamiento cuando los núcleos son orientados a (a) 90° y (c) 270°. (b), (d) Curvas de calibración del SFO relacionando los cambios en la potencia (normalizada) y el doblamiento aplicado de (a) y (c) respectivamente.

Una vez posicionado el DFOS con los dos núcleos a 0° (en horizontal) se procedió a registrar la señal reflejada cuando no se induce ninguna perturbación. Después, una

viga de acero fue apoyada sobre el DFOS induciendo un doblamiento de 0.125° y la señal reflejada fue registrada. Esto se repitió hasta alcanzar un ángulo de 2.250° - 3.625° en un intervalo de 0.125° . La misma metodología fue aplicada para evaluar al SFO cuando los núcleos se encontraron a 90° , 180° y 270° . En la Fig. 77 (a) se observa el espectro reflejado del SFO evaluado a doblamiento cuando los núcleos se encuentran a 90° , en el extremo final del DFOS se realizó un corte en ángulo con el fin de apreciar únicamente la señal reflejada de la FBG. En el espectro óptico se observan dos picos con diferentes amplitudes siendo el segundo pico el más óptimo para analizar, el cual se localiza en $\lambda_B = 1555.184$ nm. En este sentido, se observa que la potencia de la señal aumenta conforme el doblamiento en el SFO es mayor; las señales se encuentran normalizadas respecto a la señal inicial. Esto debido al doblamiento inducido en la sección de la MCF_2 que se encuentra previo a la zona donde la FBG se encuentra inscrita. El doblamiento produce un cambio en el índice de refracción de los núcleos lo que lleva a un cambio en las condiciones de propagación de los supermodos, visto como un desplazamiento en longitud de onda del patrón de interferencia. Este desplazamiento genera un cambio en la porción de luz que incide en la FBG. En la Fig. 77 (b) se observa la relación entre los cambios en la potencia reflejada respecto al valor inicial (Δ_R) y la magnitud del doblamiento que se aplicaron como entrada al SFO. Dicha relación es ajustada a una curva lineal de la que se obtiene la sensibilidad del SFO de $S=0.09726 \Delta_R/^\circ$. La respuesta del SFO cuando los núcleos se encuentran a 270° se observa en la Fig. 77(c) donde se aprecia que la potencia reflejada es menor conforme el doblamiento aplicado aumenta. En la Fig. 77 (d) se aprecia la relación entre el cambio en la potencia reflejada normalizada respecto al doblamiento inducido como entrada al SFO formando así una curva la cual fue ajustada de forma lineal. Para esta configuración el SFO presentó una sensibilidad de $S=-0.175 \Delta_R/^\circ$. Mientras que las curvas características que se obtuvieron del SFO cuando el doblamiento es aplicado con los núcleos orientados a 0° y 180° son vistas en la Fig. 78, de las cuales se tiene una sensibilidad de $S=-0.005 \Delta_R/^\circ$ y $S=0.013 \Delta_R/^\circ$; respectivamente. De estas pruebas se demuestra la mayor sensibilidad del SFO es alcanzada cuando los núcleos se encuentran orientados a 270° , siendo de un orden superior a las demás sensibilidades obtenidas a las distintas orientaciones.

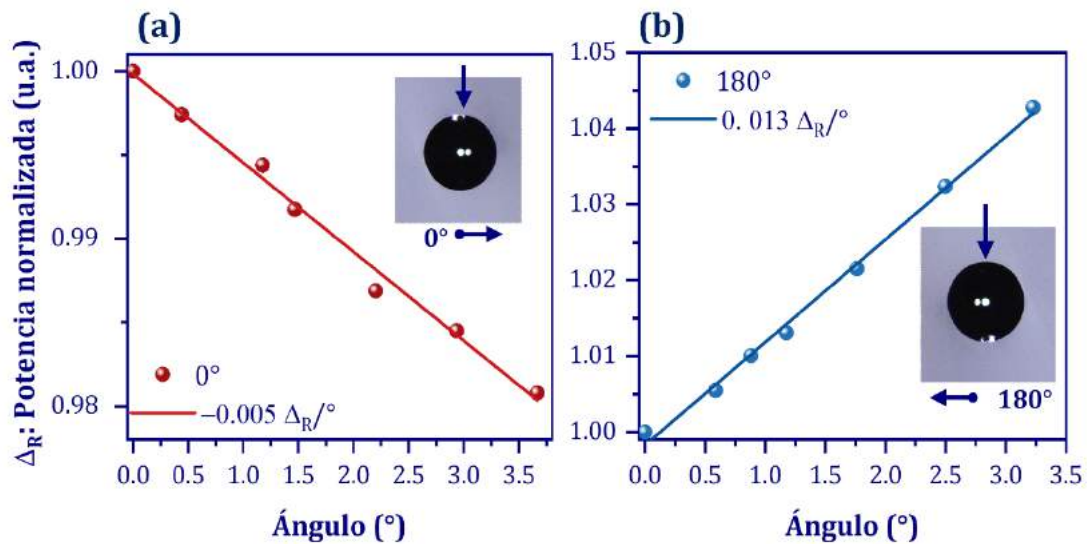


Figura 78. Relación entre el cambio de la potencia reflejada (normalizada) y el ángulo de doblamiento inducido en la entrada del SFO.

4.3.2 Temperatura

El mismo esquema del DFOS de la sección anterior fue evaluado como SFO de temperatura. Es importante mencionar que para estas pruebas se utilizó otro DFOS considerando que en la sección 3.3.3 se mencionó que fueron fabricados 12 de estos dispositivos. El DFOS seleccionado para esta prueba posee una $\lambda_B = 1548.37$ nm. Estas pruebas fueron realizadas utilizando el sistema descrito en la sección 3.4.3.1 junto con la adquisición y control automatizado del interrogador Hyperion si255 y el horno de temperatura a través de los programas desarrollados en la LabVIEW detallados en las secciones 3.5.3 y 3.5.4. El DFOS fue colocado dentro del horno de temperatura configurándose para calentar desde una temperatura de -20 °C a 80 °C en intervalos de 10° . Una vez que se alcanzó la temperatura máxima, el programa controló el enfriamiento del horno para regresar a la temperatura inicial con el mismo intervalo de 10° . En la Fig. 79 (a) se observa el espectro reflejado del SFO a cambios de temperatura. Se puede notar que los espectros se encuentran sobrepuestos en las mismas temperaturas alcanzadas durante el calentamiento y enfriamiento del horno de calibración. Durante la adquisición de la señal reflejada su análisis fue realizado en

tiempo real trazando el desplazamiento en longitud de onda de λ_B sobre el tiempo en el que transcurren los cambios de temperatura durante el calentamiento/enfriamiento interno del horno, tal como se muestra en la Fig. 79 (c). El desplazamiento de λ_B respecto al cambio de temperatura es relacionada mediante una curva que fue ajustada de forma lineal, tal como se muestra en la Fig. 79 (b). De dicha relación se obtuvo la sensibilidad del SFO de $S=9.81 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ y $S=9.77 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ de acuerdo a su respuesta cuando aumenta y disminuye la temperatura, respectivamente. Las sensibilidades son casi similares para ambos casos lo que indica que el SFO posee una histéresis baja.

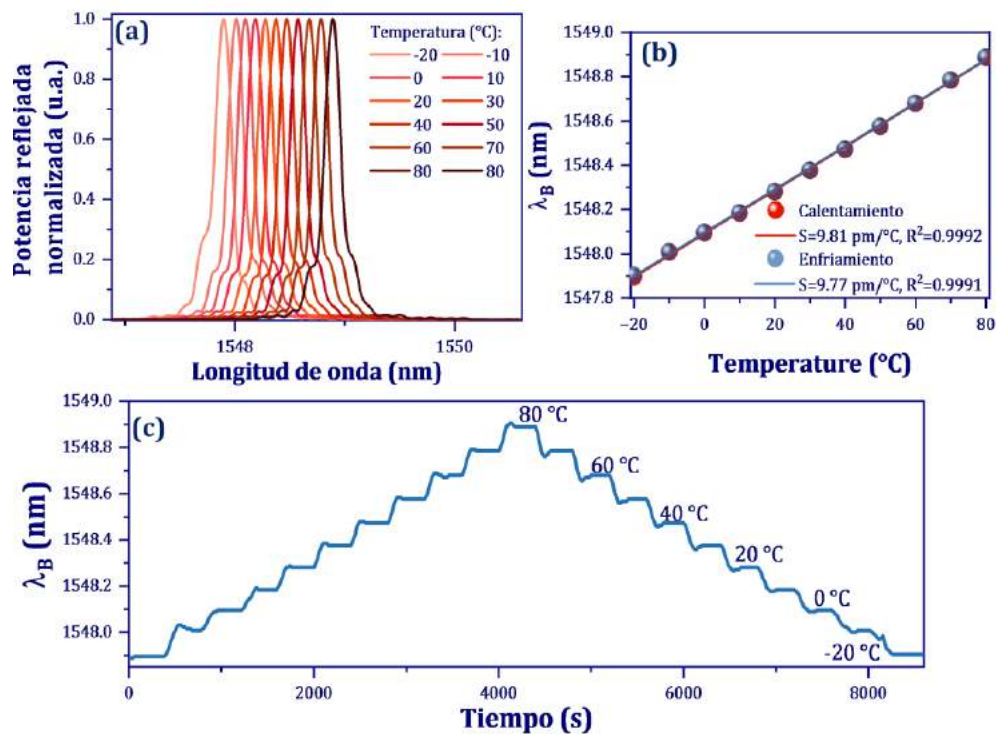


Figura 79. Espectros reflejados del SFO a cambios de temperatura. (b) Relación entre la temperatura y el desplazamiento de la λ_B . (c) Respuesta en longitud de onda del SFO sobre el tiempo.

Contribuciones, Conclusiones y Recomendaciones

Antes de realizar una conclusión sobre cada uno de los resultados alcanzados en este proyecto doctoral, es importante mencionar que en un principio el trabajo se enfocaba en explotar el fenómeno de resonancia de plasmón superficial generado en dispositivos de fibra óptica con el propósito de desarrollar sensores de fibra óptica para el monitoreo de parámetros químicos y/o biológicos. Sin embargo, a raíz de la contingencia sanitaria por el CORONAVIRUS (COVID-19) las actividades dentro de la institución fueron suspendidas. Debido a la incertidumbre del tiempo, así como de las limitaciones que se tuvieron para utilizar equipos externos al laboratorio, nos vimos en la necesidad de modificar los objetivos del proyecto. Entre los cambios realizados fue la de prescindir del uso de este fenómeno enfocándonos únicamente a trabajar con el fenómeno de interferencia óptica para el desarrollo de sensores físicos. No obstante, durante el primer año del doctorado se realizó un manuscrito con los resultados que se obtuvieron explotando la técnica de resonancia de plasmón superficial, y el cual fue publicado en la revista *Journal of Physics: Photonics (IOP)* como:

M. Alonso-Murias, D. Monzón-Hernández, A. M. Gravagnuolo, S. Márquez, P. Giardina, and E. Morales-Narváez, 'Graphene oxide biohybrid layer enhances sensitivity and anticorrosive properties in refractive index sensor', Journal of Physics: Photonics, vol. 3, no. 3, p. 034009, Jun. 2021, doi: 10.1088/2515-7647/ABFA78.

Bajo estas condiciones, durante el aislamiento al que nos vimos sometidos, nos enfocamos en documentarnos sobre el fenómeno de interferencia óptica en fibras ópticas para el desarrollo de dispositivos de fibra óptica sensibles a perturbaciones externas. Para ello se planteó el uso de fibras ópticas convencionales, así como de fibras ópticas especiales, con las que se desarrolló dos tipos de interferómetros: Fabry-Perot y supermodal, siendo este último desarrollado utilizando tres distintos tipos de MCF. En esta sección se discute los resultados obtenidos de tres vertientes que se plantearon en el proyecto doctoral: (1) el diseño de dispositivos de fibra óptica novedosos con buena sensibilidad y resolución para la detección de múltiples parámetros, (2) la instrumentación para interrogar los dispositivos de fibra óptica fabricados y (3) las aplicaciones de estos dispositivos de fibra óptica en problemas reales.

Diversos métodos han sido propuestos para mejorar el rango dinámico del SFO de distancia basado en un IFPF-E. Entre estos métodos se encuentran el empalmar secciones micrométricas de una fibra multimodal de índice gradual a una SMF, incorporar colimadores a la punta de una SMF o el adelgazamiento de una sección de la punta de una SMF. Sin embargo, estos métodos requieren de procesos de fabricación complicados, costosos y difíciles de replicar. Bajo esta premisa, en este trabajo se desarrolló un SFO de distancia basado en un IFPF-E como alternativa a los mecanismos propuestos antes mencionado. En el IFPF-E se toma ventaja de la sección transversal, por primera vez, de un ISPM conformado por una MCF₇, con el que se consigue un rango dinámico de medición de distancia de 0 a 50 mm y una resolución de 500 nm. Los resultados de esta investigación fueron reportados en la revista *Optics Letters* (Optica) indexada al JCR y presentados en el congreso *Frontiers in Optics + Laser Science 2021* (Optica):

M. Alonso-Murias, D. Monzón-Hernández, E. Antonio-Lopez, A. Schülzgen, R. Amezcua-Correa, and J. Villatoro, 'Long-range multicore optical fiber displacement sensor', Opt Lett, vol. 46, no. 9, p. 2224, May 2021, doi: 10.1364/ol.421004.

M. Alonso-Murias, D. Monzón-Hernández, E. Antonio-Lopez, A. Schülzgen, R. Amezcua-Correa, and J. Villatoro, 'Extrinsic Fabry-Perot Interferometer With Supermode Interference', in Frontiers in Optics + Laser Science 2021, Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2021, p. JTu1A.81. doi: 10.1364/FIO.2021.JTu1A.81.

En la estructura del IFPF-E se integró una segunda cavidad conformando así un esquema híbrido compuesto por aire y vidrio a fin de generar una técnica mas sensible basada en el efecto Vernier. Con esta técnica se accede a tener una función envolvente formada en el patrón de interferencia modulado. El seguimiento de esta función brinda en la respuesta del sensor una mejora en su sensibilidad y resolución para la detección de desplazamientos nanométricos a distancias largas y sin contacto. En este estudio se consiguió una resolución estimada entre 0.47 y 1.1 nm. Un SFO de desplazamiento con un rendimiento similar puede ser obtenida a través de un IFPF, pero solamente cuando la cavidad es de unos cuantos micrómetros. Sin embargo, resulta complicado su implementación. En contraste, se demostró que este rendimiento puede ser alcanzado con cavidades macroscópicas apoyándonos en la técnica del efecto Vernier. Las dimensiones utilizadas en las cavidades del IFPF-2C generan un patrón de interferencia

con un gran número de franjas sobre el rango de longitudes de onda en el que se interroga. Este factor contribuye a tener un gran número de mínimos/máximos que son ajustados para obtener la función de la envolvente formada y, en consecuencia, se tiene una mayor precisión en el seguimiento de su desplazamiento en longitud de onda. Aunque aquí se demuestra la detección de desplazamientos generados a través de una montura mecánica motorizada, este concepto puede ser utilizado para la detección de otros parámetros. Por ejemplo, el medio de una de las cavidades puede ser sustituido por un medio que sea sensible a cambios de temperatura, humedad, o presión generando cambios sub nanométricos en la longitud de camino óptico de la cavidad. Los resultados de este trabajo fueron publicados en la revista *Optics & Laser Technologies*:

M. Alonso-Murias, D. Monzón-Hernández, E. Antonio-Lopez, A. Schülzgen, R. Amezcua-Correa, and J. Villatoro, 'Hybrid optical fiber Fabry-Perot interferometer for nano-displacement sensing', Opt Laser Technol, vol. 155, p. 108426, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2022.108426.

El SFO de distancia conformado por un esquema IFPF-E fue evaluado en diversas aplicaciones, tomando ventaja de su principio de funcionamiento basado en el cambio inducido en el tamaño de su cavidad por un parámetro externo. Entre estos se encuentra las pruebas llevadas a cabo para determinar la pertinencia que tiene esta estructura como perfilómetro de fibra óptica para la caracterización de superficies reflejantes. Mediante esta técnica se demostró la posibilidad de trazar el relieve de una superficie bajo prueba a través de un barrido controlado en el plano. Las variaciones de la superficie, en este caso en forma de escalones, inducen un cambio en la cavidad en cada uno de los puntos registrados. El desplazamiento en el plano y la variación de la distancia en la cavidad formada entre la punta del ISPM y la superficie a evaluar permiten recrear el perfil de dicha superficie. Además, del análisis de la señal óptica se puede cuantificar espesor que presenta la superficie. Con el fin de validar la técnica, se utilizó un patrón de calibración que al ser evaluado los datos obtenidos de su perfil concuerdan con los otorgados por el fabricante. No obstante, la precisión para trazar el perfil de la superficie de forma más detallada depende del diámetro del haz incidente ya que la señal reflejada lleva consigo la información de un promedio del área que abarca. Es importante tener presente que el haz incidente depende del diámetro con el que emerge de la sección transversal de la fibra óptica, así como de la divergencia que se tiene por la distancia que recorre desde la punta de la fibra óptica hasta la superficie a evaluar. Bajo este entendido se evaluó el desarrollo del perfilómetro usando una SMF

sustituyendo al ISPM. De esto se observó que se adquiere con mayor precisión el perfil de la superficie ya que el relieve es trazado de forma más homogénea en comparación al obtenido con el ISPM. El sistema utilizado para realizar estas pruebas es voluminoso y costoso; en este sentido, se puede considerar para un futuro mudar la técnica de perfilometría a un sistema de bajo costo con un entorno amigable para cualquier usuario.

Otra de las aplicaciones donde el SFO de distancia basado en un IFPF-E fue utilizado en el desarrollo de una técnica de biosensado donde se combina la óptica con la tecnología de dispositivos MEMS a través de una colaboración con un grupo de investigación del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (Santiago de Querétaro, Qro.) Las estructuras micro-cantiléver se funcionalizaron e inmovilizaron con diferentes concentraciones de la proteína BSA, lo que dio lugar a diferentes magnitudes proporcionales en los desplazamientos mecánicos y que se pueden atribuir a cambios en la tensión superficial. Esto derivado de la reacción inmunológica entre la BSA inmovilizada y la anti-BSA. No obstante, la alta sensibilidad que se puede tener con el IFPF-E también conduce a aumentar la susceptibilidad para percibir variaciones mínimas tanto desde el exterior como desde el interior; por ejemplo, en el medio de trabajo acuoso. Esto lleva a plantear retos a un futuro que incluyen la comprensión del flujo interno del medio acuoso mediante un análisis computacional de la dinámica de fluidos, así como el rediseño de la celda de flujo de inmunoensayo para minimizar las perturbaciones sobre las estructuras micro-cantiléver. Parte de los resultados de esta primera aproximación fue presentada en el congreso XIV International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum de forma virtual:

F. de J. García Paredes, M. Alonso-Murias et. al, 'Quantitative Surface Stress determination in microcantilevers using a fiber-based Fabry-Perot Interferometer for BSA protein detection', in XIV International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum, Virtual Event, Zacatecas, Zac., Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales, October 2021.

Además, el SFO fue utilizado como técnica refractométrica para la caracterización de muestras y dispositivos compuestos de materiales transparentes (vidrio). En el primer caso se caracterizó distintas muestras de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ dopadas con distintos elementos a diferentes concentraciones. El gran alcance que se dispone con el ISPM dentro del esquema del IFPF-E permitió evaluar las muestras sin ninguna limitación de tener una baja señal reflejada por las dimensiones de las cavidades formadas. Caso contrario de

lo que ocurre utilizando una SMF. En las pruebas de forma simultánea se obtuvo tanto el índice de refracción como el espesor de cada una de las muestras evaluadas.

En el segundo caso se caracterizó distintas guías de ondas fabricadas mediante la técnica de inscripción por láser de femtosegundos. Estas fueron inscritas a distintas velocidades del barrido del láser. La caracterización consistió en calcular la diferencia del índice de refracción entre la región modificada por el láser, siendo este el núcleo, y la región a su alrededor conformada por el sustrato de vidrio sódico-cálcico, siendo este el revestimiento. Las pruebas realizadas permitieron visualizar las condiciones de fabricación de forma cualitativa, así como cuantitativa. A través del espectro óptico reflejado se puede observar cualitativamente la calidad que la guía de onda fabricada que posee para transmitir la luz, visto sobre la visibilidad de las franjas del patrón de interferencia. Mientras que el análisis de la señal reflejada en el dominio de Fourier otorga valores que cuantifican las condiciones de la guía de onda por su longitud de camino óptico, del cual se deriva el valor de índice de refracción. No obstante, de estas primeras pruebas se reconoce que un estudio más profundo con una metodología más controlada debe ser realizado para concluir las condiciones más óptimas de los parámetros de fabricación. Por ejemplo, como con condición inicial antes de todo proceso se debe caracterizar el sustrato de vidrio que albergará la inscripción de la guía de onda. Una vez inscrita una guía de onda con determinadas características de fabricación sería ideal realizar su caracterización. Considerando que en el mismo sustrato se pueden inscribir otras guías de ondas es pertinente analizar si existe una modificación adicional del índice de refracción que pueda inducirse en las guías ya inscritas debido al proceso de inscripción de guías de onda circundantes. Sin embargo, estas estrategias deben ser coordinadas con el grupo en colaboración encargado de la fabricación de guías de onda. La técnica aplicada para evaluar la fabricación de las guías de onda y los resultados de este estudio fueron presentados en el Workshop on Optical Fibre Sensors:

M. Alonso Murias, A. Saldaña Sánchez, G. V. Vázquez, J. Villatoro, and D. Monzón Hernández, 'Extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer for measuring the refractive index of waveguides inscribed in glass', in European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFs 2023), M. Wuilpart and C. Caucheteur, Eds., SPIE, May 2023, p. 40. doi: 10.1117/12.2678186.

Entre las actividades complementarias del programa de doctorado se realizó una estancia de investigación internacional (6 meses) participando en el proyecto:

“Advances in multicore fiber sensing” el cual fue realizado en el Applied Photonics Group de la Universidad del País Vasco, Bilbao, España. Esta investigación fue dirigida por el Dr. Joel Villatoro siendo el experto en el tema de los SFOs basados en interferómetros supermodales. Durante esta estancia, se trabajó en el desarrollo de un SFO de fuerza tomando ventaja de la investigación previamente realizada por el grupo de investigación respecto a un SFO de doblamiento.

El SFO de fuerza se conforma de un ISPM en punta basado en una MCF de 3 núcleos y de una FBG en serie. La combinación de ambos dispositivos de fibra óptica brinda la posibilidad que el SFO opere mediante la técnica de cuadratura lo que lleva a una interrogación basada en la intensidad reflejada. El SFO fue diseñado para operar en la ventana de las telecomunicaciones (1550 nm) debido a la disponibilidad en las componentes y su fiabilidad. El uso de una FBG en la condición de cuadratura permitió tener un esquema de interrogación en intensidad de forma simple mejorando también la respuesta del ISPM que presenta en longitud de onda cuando se le induce a un doblamiento. El SFO demostró tener una sensibilidad para detectar una fuerza lateral de μN a través del cambio en la intensidad de la señal, y también tiene la característica de distinguir la dirección en la que la fuerza es aplicada. También el SFO demostró tener una sensibilidad a temperatura, parámetro que es conveniente detectar ya que se encuentra presente en todos los escenarios de medición. La respuesta del SFO a temperatura produce un cambio de longitud de onda del espectro reflejado. Esto permite que bajo este esquema el SFO no tenga una respuesta de forma cruzada en la medición simultánea de la temperatura y la detección de fuerza, es decir, un cambio en longitud de onda representa que el SFO detectó un cambio de temperatura en su medio circundante y un cambio en la intensidad indica la presencia de una fuerza aplicada.

El esquema del SFO de fuerza fue también utilizado en la detección de impactos tomando ventaja de su funcionamiento en intensidad para incorporar un sistema de interrogación simple y rápido. El DFOS fue colocado en forma de voladizo integrado a una pieza impresa en 3D de PLA. El impacto sobre el mismo resultaba en un doblamiento rápido del voladizo y, por lo tanto, del SFO. El SFO fue capaz de detectar impactos con energías hasta 8.3 mJ, y como mínimo de 0.1 mJ. El cambio en intensidad, tras un impacto, ocurre en una fracción de tiempo que se registra de forma fácil y efectiva, siguiendo el comportamiento de la estructura tras el evento de impacto hasta su estabilización. Este SFO puede ser aplicado para la caracterización de estructuras hechas de polímeros o materiales compuestos; o bien, puede fungir como un elemento arterial para el desarrollo de estructuras inteligentes. Bajo el mismo

esquema y sistema de detección, se realizó una demostración del funcionamiento del SFO aplicado en la detección de contacto con la posibilidad de distinguir la dirección. Las pruebas realizadas demuestran de forma cualitativa la magnitud y la forma en la que el contacto es aplicado sobre la estructura. Como un trabajo a futuro se plantea realizar una caracterización respecto a un sistema de referencia con el fin de obtener una curva característica que permita calcular de forma directa la fuerza de contacto aplicada. Hoy en día los SFOs de contacto son ampliamente requeridos para el desarrollo de sistemas inteligentes en áreas como la automatización y robótica.

Otro de los trabajos realizados fue el desarrollo de un SFO de doblamiento basado en un ISPM conformado por una MCF de 2 núcleos y operando con la técnica de cuadratura. A diferencia del esquema del SFO de fuerza las FBGs fueron inscritas en los núcleos de la MCF, esto permite disponer de un dispositivo más compacto y robusto.

El SFO fue evaluado a distintos doblamientos presentando una máxima sensibilidad en los cambios de intensidad cuando los núcleos se encuentran orientados a 90° y 270° . Esto debido también a la asimetría en la distribución de sus núcleos. Este mismo SFO fue evaluado a cambios de temperatura observando un cambio en longitud de onda. Tal como el SFO de fuerza, el SFO de doblamiento demostró no tener una respuesta cruzada a la temperatura, pudiendo medir de forma simultánea dos parámetros. Por cuestiones de tiempo, no se pudo investigar el SFO de doblamiento en aplicaciones reales. No obstante, los resultados alcanzados fueron presentados en el congreso *IEEE SENSORS*.

M. Alonso-Murias et al., 'Live Demonstration: Coupled-Core Fiber Bragg Grating Sensors', in 2023 IEEE SENSORS, IEEE, Oct. 2023, pp. 1–1. doi: 10.1109/SENSORS56945.2023.10325036.

Una parte esencial de este proyecto doctoral estuvo enfocada en la instrumentación de los SFOs desarrollados. En esta etapa se trabajó en el desarrollo de programas con los que se estableció una comunicación entre el equipo de interrogación y una computadora para visualizar la respuesta del SFO en tiempo real. Además, los programas están diseñados para analizar en el dominio óptico (longitud de onda, intensidad) o el dominio de Fourier según se requiera en las mediciones realizadas. El funcionamiento de los programas en conjunto con los SFOs desarrollados fue demostrado en aplicaciones particulares. Es importante resaltar que la instrumentación realizada fue adaptada a las necesidades del proyecto pero que sin ningún problema es apta para su

uso en otros dispositivos de fibra óptica. La instrumentación es un recurso que queda para ser explotado en el Laboratorio de Sensores de Fibra Óptica y el cual ha marcado la pauta para acelerar y facilitar los procesos de caracterización de los dispositivos que son desarrollados e investigados dentro del grupo.

Dentro de las actividades realizadas en el grupo de investigación se encuentra la de apoyar al investigador en la asesoría e inducción de estudiantes dentro del laboratorio. Así mismo participando, en la colaboración de proyectos relacionados a las líneas de investigación del efecto Vernier y perfilometría de fibra óptica, y cuyos resultados fueron publicados en las revistas *Polymers* (MDPI) y *IEEE Sensors*, y un tercer manuscrito publicado en la revista *Journal of Lightwave Technology* (Optica/IEEE).

M. Ramírez-Hernández, M. Alonso-Murias, and D. Monzón-Hernández, 'Highly Sensitive Temperature Sensor Based on Vernier Effect Using a Sturdy Double-cavity Fiber Fabry-Perot Interferometer', Polymers (Basel), vol. 15, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/polym15234567.

E. D. Galván-Navarro, M. Alonso-Murias, D. Monzón-Hernández, and H. Pérez-Aguilar, 'Optical fiber curvature sensor used to measure the surface profile of 3D printing objects', IEEE Sens J, pp. 1–1, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3336273.

Á. Ramírez-Hernández, M. Alonso-Murias, M. Monzón-Hernández, D. (2024). Polymer-capped fiber Fabry-Perot interferometer for large range displacement sensing. Journal of Lightwave Technology, 1–7. <https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3357624>

Referencias

- Agrawal, G. P. (2012). *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley.
<https://books.google.com.mx/books?id=yGQ4n1-r2eQC>
- Allil, A. S., Dutra, F. D. S., Dante, A., Carvalho, C. C., Allil, R. C. D. S. B., & Werneck, M. M. (2021). FBG-Based Sensor Applied to Flow Rate Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3014751>
- Amorebieta, J., Durana, G., Ortega-Gomez, A., Fernández, R., Velasco, J., Sáez De Ocariz, I., Zubia, J., Antonio-López, J. E., Schülzgen, A., Amezcua-Correa, R., & Villatoro, J. (2019). Packaged Multi-Core Fiber Interferometer for High-Temperature Sensing. *Journal of Lightwave Technology*, 37(10), 2328–2334. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2903595>
- Amorebieta, J., Ortega-Gomez, A., Durana, G., Fernández, R., Antonio-Lopez, E., Schülzgen, A., Zubia, J., Amezcua-Correa, R., & Villatoro, J. (2020). Highly sensitive multicore fiber accelerometer for low frequency vibration sensing. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73178-x>
- Amorebieta, J., Ortega-Gomez, A., Durana, G., Fernández, R., Antonio-Lopez, E., Schülzgen, A., Zubia, J., Amezcua-Correa, R., & Villatoro, J. (2021). Compact omnidirectional multicore fiber-based vector bending sensor. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85507-9>
- Amorebieta, J., Pereira, J., Durana, G., Franciscangelis, C., Ortega-Gomez, A., Zubia, J., Villatoro, J., & Margulis, W. (2022). Twin-core fiber sensor integrated in laser cavity. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16103-8>
- Antonio-Lopez, J. E., Eznaveh, Z. S., LiKamWa, P., Schülzgen, A., & Amezcua-Correa, R. (2014). Multicore fiber sensor for high-temperature applications up to 1000°C. *Optics Letters*, 39(15), 4309. <https://doi.org/10.1364/ol.39.004309>
- Arianfard, H., Juodkazis, S., Moss, D. J., & Wu, J. (2023). Sagnac interference in integrated photonics. In *Applied Physics Reviews* (Vol. 10, Issue 1). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0123236>
- Arrizabalaga, O., Sun, Q., Beresna, M., Lee, T., Zubia, J., Velasco Pascual, J., Sáez de Ocariz, I., Schülzgen, A., Antonio-Lopez, J. E., Amezcua-Correa,

- R., Villatoro, J., & Brambilla, G. (2020). High-performance vector bending and orientation distinguishing curvature sensor based on asymmetric coupled multi-core fibre. *Scientific Reports*, *10*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70999-8>
- Bae, H., Yun, D., Liu, H., Olson, D. A., & Yu, M. (2014). Hybrid miniature fabry-perot sensor with dual optical cavities for simultaneous pressure and temperature measurements. *Journal of Lightwave Technology*, *32*(8), 1585–1593. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2308060>
- Baldwin, C. S. (2005). Multi-parameter sensing using fiber Bragg grating sensors. *Fiber Optic Sensor Technology and Applications IV*, 6004, 60040A. <https://doi.org/10.1117/12.630728>
- Barrera, D., Villatoro, J., Finazzi, V. P., Cárdenas-Sevilla, G. A., Minkovich, V. P., Sales, S., & Pruneri, V. (2010). Low-loss photonic crystal fiber interferometers for sensor networks. *Journal of Lightwave Technology*, *28*(24), 3542–3547. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2090861>
- Bettahar, H., Cleavy, C., Behague, F., Courjal, N., & Lutz, P. (2018). Novel Strategy for High Precision Automated Robotic Positioning based on Fabry-Perot Interferometry Principle. *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 1441–1447. <https://doi.org/10.1109/COASE.2018.8560700>
- Bogris, A., Nikas, T., Simos, C., Simos, I., Lentas, K., Melis, N. S., Fichtner, A., Bowden, D., Smolinski, K., Mesaritakis, C., & Chochliouros, I. (2022). Sensitive seismic sensors based on microwave frequency fiber interferometry in commercially deployed cables. *Scientific Reports*, *12*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18130-x>
- Cheng, L.-K., Hagen, R., van Megen, D., Molkenboer, F., & Jansen, R. (2019). *1 MHz high-sensitivity FBG sensor system to measure low energy impact in droplet experiment*. 101. <https://doi.org/10.1117/12.2513765>
- Cheng, L., Tong, X., Wei, J., Zhang, C., Deng, C., & Chen, X. (2023). Highly accurate differential pressure FBG gas flow sensor. *Optical Fiber Technology*, *75*. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103189>
- Chen, H., Chen, Q., Wang, W., Zhang, X., Ma, Z., Li, Y., Jing, X., & Yuan, S. (2019). Fiber-optic, extrinsic Fabry–Perot interferometric dual-cavity sensor interrogated by a dual-segment, low-coherence Fizeau interferometer for simultaneous measurements of pressure and temperature. *Optics Express*, *27*(26), 38744. <https://doi.org/10.1364/oe.382761>

- Chen, M. qing, He, T. yue, & Zhao, Y. (2022). Review of femtosecond laser machining technologies for optical fiber microstructures fabrication. In *Optics and Laser Technology* (Vol. 147). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107628>
- Chen, Y., Wan, H., Lu, Y., Wang, Z., Fan, W., Zhang, Z., & Hu, F. (2022). An air-pressure and acoustic fiber sensor based on graphene-oxide Fabry-Perot interferometer. *Optical Fiber Technology*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102754>
- Chiang, K. S. (1994). Review of numerical and approximate methods for the modal analysis of general optical dielectric waveguides. *Optical and Quantum Electronics*, 26(3), S113–S134. <https://doi.org/10.1007/BF00384667>
- Cui, Y., Jiang, Y., Liu, T., Hu, J., & Jiang, L. (2020). A Dual-Cavity Fabry-Perot Interferometric Fiber-Optic Sensor for the Simultaneous Measurement of High-Temperature and High-Gas-Pressure. *IEEE Access*, 8, 80582–80587. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991551>
- Daud, S., & Ali, J. (2018). *Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-90463-4>
- Davé, D. P. (2009). Phase sensitive interferometry for biosensing applications. *Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.)*, 503, 179–187. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-567-5_9
- Deng, J., & Wang, D. N. (2019). Ultra-Sensitive Strain Sensor Based on Femtosecond Laser Inscribed In-Fiber Reflection Mirrors and Vernier Effect. *Journal of Lightwave Technology*, 37(19), 4935–4939. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2926066>
- Deng, M., Zhang, T., Nan, X., Tang, Y., Feng, D., Guo, N., Deng, S., & Zhu, T. (2021). Enhanced sensitivity of optical fiber vibration sensor based on radio-frequency Michelson interferometer. *Optics Letters*, 46(24), 6079. <https://doi.org/10.1364/ol.445425>
- Di Palma, P., Iadicicco, A., & Campopiano, S. (2021). Curvature Sensor Based on FBGs Embedded in 3D Printed Patches. *IEEE Sensors Journal*, 21(16), 17868–17874. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3083961>
- Fan, P., Yan, W., Lu, P., Zhang, W., Zhang, W., Fu, X., & Zhang, J. (2020). High sensitivity fiber-optic Michelson interferometric low-frequency acoustic sensor based on a gold diaphragm. *Optics Express*, 28(17), 25238. <https://doi.org/10.1364/oe.402099>

- Feit, M. D., & Fleck, J. A. (1981). Propagating beam theory of optical fiber cross coupling. *Journal of the Optical Society of America*, 71(11), 1361. <https://doi.org/10.1364/JOSA.71.001361>
- F. Graham Smith, Terry A. King, & Dan Wilkins. (2007). *Optics and Photonics: An Introduction* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Flores-Bravo, J. A., Fernandez, R., Antonio Lopez, E., Zubia, J., Schulzgen, A., Amezcua Correa, R., & Villatoro, J. (2021). Simultaneous Sensing of Refractive Index and Temperature with Supermode Interference. *Journal of Lightwave Technology*, 39(22), 7351–7357. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3113863>
- Floris, I., Adam, J. M., Calderón, P. A., & Sales, S. (2021). Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review. In *Optics and Lasers in Engineering* (Vol. 139). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106508>
- Freise, A., & Strain, K. (2010). Interferometer Techniques for Gravitational-Wave Detection. In *Living Rev. Relativity* (Vol. 13). <http://www.livingreviews.org/lrr-2010-1><http://www.gwoptics.org>
- Fuerbach, A., Bharathan, G., & Ams, M. (2019). Grating Inscription into Fluoride Fibers: A Review. In *IEEE Photonics Journal* (Vol. 11, Issue 5). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2940249>
- Gang, T., Wang, D., Bian, C., Zhang, C., Zheng, Z., Fu, B., Wei, H., & Sun, R. (2023). A novel FPI with hollow core taper structure for strain and inclination measurements. *Optik*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170302>
- Ghatak, A. K., & Thyagarajan, K. (1998). *An Introduction to Fiber Optics*. Cambridge University Press. <https://books.google.com.mx/books?id=pG34VZMil7IC>
- Gomes, A. D., Kobelke, J., Bierlich, J., Dellith, J., Rothhardt, M., Bartelt, H., & Frazão, O. (2020). Giant refractometric sensitivity by combining extreme optical Vernier effect and modal interference. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76324-7>
- Gong, H., Song, H., Li, X., Wang, J., & Dong, X. (2013). An optical fiber curvature sensor based on photonic crystal fiber modal interferometer. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 195, 139–141. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.02.022>

- Guo, C., Zhang, Y., Klegseth, M., Gao, J., & Chen, G. (2020). Micrometer-accuracy 2D displacement interferometer with plasmonic metasurface resonators. *Optics Letters*, *45*(23), 6474. <https://doi.org/10.1364/ol.412130>
- Habel, W. R., & Krebber, K. (2011). Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering. In *Photonic Sensors* (Vol. 1, Issue 3, pp. 268–280). <https://doi.org/10.1007/s13320-011-0011-x>
- Han, Z., Xin, G., Nan, P., Liu, J., Zhu, J., & Yang, H. (2021). Hypersensitive high-temperature gas pressure sensor with Vernier effect by two parallel Fabry-Perot interferometers. *Optik*, *241*. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166956>
- Hernández-Romano, I., Cruz-Garcia, M. A., Moreno-Hernández, C., Monzón-Hernández, D., López-Figueroa, E. O., Paredes-Gallardo, O. E., Torres-Cisneros, M., & Villatoro, J. (2016). Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay. *Optics Express*, *24*(5), 5654. <https://doi.org/10.1364/oe.24.005654>
- Hong, C., Yuan, Y., Yang, Y., Zhang, Y., & Abro, Z. A. (2019). A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *285*, 269–274. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.024>
- Hong, C., Zhang, Y., & Borana, L. (2019). Design, fabrication and testing of a 3D printed FBG pressure sensor. *IEEE Access*, *7*, 38577–38583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2905349>
- Hou, L., Zhao, C., Xu, B., Mao, B., Shen, C., & Wang, D. N. (2019). Highly sensitive PDMS-filled Fabry–Perot interferometer temperature sensor based on the Vernier effect. *Applied Optics*, *58*(18), 4858. <https://doi.org/10.1364/ao.58.004858>
- Hsu, C.-C., Tsai, Y.-S., Chang, S., Huang, T.-H., Chuang, W.-C., Shieh, J.-Y., & Leung, C.-Y. (2000). Heterodyne Interferometric Measurement of the Thermo-Optic Coefficient of Single Mode Fiber. In *Article in Chinese Journal of Physics* (Vol. 38, Issue 3). <https://www.researchgate.net/publication/228599044>
- Huang, W.-P. (1994). Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview. *Journal of the Optical Society of America A*, *11*(3), 963. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.11.000963>
- Jha, R., Villatoro, J., Badenes, G., & Pruneri, V. (2009). *Refractometry based on a photonic crystal fiber interferometer*.

- Kim, T. H. (2023). Analysis of Optical Communications, Fiber Optics, Sensors and Laser Applications. *Journal of Machine and Computing*, 3(2), 115–125. <https://doi.org/10.53759/7669/jmc202303012>
- Kim, Y. S., Dagalakis, N. G., & Choi, Y. M. (2018). Optical fiber Fabry-Pérot micro-displacement sensor for MEMS in-plane motion stage. *Microelectronic Engineering*, 187–188, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.11.010>
- Kumar, S., & Deen, M. J. (2014). *Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications*. Wiley. <https://books.google.com.mx/books?id=yxvnAgAAQBAJ>
- Leal-Junior, A., Díaz, C., Frizera, A., Lee, H., Nakamura, K., Mizuno, Y., & Marques, C. (2021). Highly Sensitive Fiber-Optic Intrinsic Electromagnetic Field Sensing. *Advanced Photonics Research*, 2(1). <https://doi.org/10.1002/adpr.202000078>
- Lee, C. L., Lu, Y., Chen, C. H., & Ma, C. T. (2020). Microhole-pair hollow core fiber Fabry-Pérot interferometer micromachining by a femtosecond laser. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111798>
- Lemaire, P. J., Atkins, R. M., Mizrahi, V., & Reed, W. A. (1993). High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres. *Electronics Letters*, 29(13), 1191. <https://doi.org/10.1049/el:19930796>
- Leng, J., & Asundi, A. (n.d.). *Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors*.
- Li, H. N., Li, D. S., & Song, G. B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. In *Engineering Structures* (Vol. 26, Issue 11, pp. 1647–1657). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.018>
- Li, H., Xu, G., Gui, X., Liang, L., & Li, Z. (2021). An FBG Displacement Sensor in Deformation Monitoring of Subway Floating Slab. *IEEE Sensors Journal*, 21(3), 2963–2971. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3022466>
- Lin, S., Qu, Y., Zhang, H., Wang, F., Han, X., & Zhang, Y. (2023). Tip-Packaged High-Temperature Fiber-Optic Sensor Based on Parallel Fabry-Perot Interferometers and the Vernier Effect. *IEEE Sensors Journal*, 23(17), 19351–19358. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3298947>

- Li, S., Yu, B., Wu, X., Shi, J., Ge, Q., Zhang, G., Guo, M., Zhang, Y., Fang, S. S., & Zuo, C. (2020). Low-cost fiber optic extrinsic Fabry–Perot interferometer based on a polyethylene diaphragm for vibration detection. *Optics Communications*, 457. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124332>
- Li, T., Guo, J., Tan, Y., & Zhou, Z. (2020). Recent Advances and Tendency in Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensor: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 20(20), 12074–12087. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3000257>
- Li, T., & Ren, H. (2017). A hybrid FBG displacement and force sensor with a suspended and bent optical fiber configuration. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 268, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.11.032>
- Liu, H., Hu, D. J. J., Sun, Q., Wei, L., Li, K., Liao, C., Li, B., Zhao, C., Dong, X., Tang, Y., Xiao, Y., Keiser, G., & Shum, P. P. (2023). Specialty optical fibers for advanced sensing applications. *Opto-Electronic Science*, 2(2), 220025–220025. <https://doi.org/10.29026/oes.2023.220025>
- Liu, Y., Wang, Y., Yang, D., Wu, J., Zhang, T., Yu, D., Zhenan, J., & Fu, H. (2019). Hollow-Core Fiber-Based All-Fiber FPI Sensor for Simultaneous Measurement of Air Pressure and Temperature. *IEEE Sensors Journal*, 19(23), 11236–11241. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2934738>
- Liu, Z., Zheng, D., Madrigal, J., Villatoro, J., Antonio-Lopez, E., Schülzgen, A., Amezcua-Correa, R., Zou, X., Pan, W., & Sales, S. (2020). Strongly coupled multicore fiber with FBGs for multipoint and multiparameter sensing. *Optical Fiber Technology*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102315>
- Li, Z., Zhang, Y. X., Zhang, W. G., Kong, L. X., Yan, T. Y., Geng, P. C., & Wang, B. (2019). High-Sensitivity Gas Pressure Fabry-Perot Fiber Probe with Micro-Channel Based on Vernier Effect. *Journal of Lightwave Technology*, 37(14), 3444–3451. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2917062>
- Ma, J., Wu, S., Cheng, H., Yang, X., Wang, S., & Lu, P. (2021). Sensitivity-enhanced temperature sensor based on encapsulated S-taper fiber Modal interferometer. *Optics and Laser Technology*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106933>
- Ma, X., Chen, Y., Wang, W., Cao, Y., Zhu, L., Huang, H., & Li, Z. (2023). Angular accelerometer based on a dual-polarization fiber-optic Sagnac interferometer. *Optics Letters*, 48(4), 859. <https://doi.org/10.1364/ol.481009>
- McClelland, D. E., Mavalvala, N., Chen, Y., & Schnabel, R. (2011). Advanced interferometry, quantum optics and optomechanics in gravitational wave detectors. In *Laser and Photonics Reviews* (Vol. 5, Issue 5, pp. 677–696). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000034>

- McIntyre, P. D., & Snyder, A. W. (1973). Power transfer between optical fibers. *Journal of the Optical Society of America*, 63(12), 1518. <https://doi.org/10.1364/JOSA.63.001518>
- Men, L., Lu, P., & Chen, Q. (2008). Intelligent multiparameter sensing with fiber Bragg gratings. *Applied Physics Letters*, 93(7). <https://doi.org/10.1063/1.2975186>
- Monnier, J. D. (2003). Optical interferometry in astronomy. In *Rep. Prog. Phys.* 66 789 ON PROGRESS IN PHYSICS *Rep. Prog. Phys* (Vol. 66). <http://iopscience.iop.org/0034-4885/66/5/203>
- Monzón-Hernández, D., Luna-Moreno, D., & Martínez-Escobar, D. (2009). Fast response fiber optic hydrogen sensor based on palladium and gold nanolayers. In *Sensors and Actuators, B: Chemical* (Vol. 136, Issue 2, pp. 562–566). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.12.019>
- Monzon-Hernandez, D., Martinez-Rios, A., Torres-Gomez, I., & Salceda-Delgado, G. (2011). *Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers*.
- Mo, Z., & Xu, W. (2016). Temperature-Compensated Optical Fiber Force Sensing at the Tip of a Surgical Needle. *IEEE Sensors Journal*, 16(24), 8936–8943. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2619383>
- Nguty, T. A., & Potton, R. J. (1997). Photochemical changes in hydrogen-loaded optical fibres with application to Bragg grating formation. In *Meas. Sci. Technol* (Vol. 8). <http://iopscience.iop.org/0957-0233/8/10/004>
- Niu, X., Huang, Y., Zhang, L., Wang, L., Hu, C., Deng, C., Wu, P., Lu, Y., Li, Q., Zhang, Q., Zhang, X., & Wang, T. (2023). A Sensitivity-Enhanced Fiber Optic Fabry-Perot Acoustic Sensor Based on Grooved Diaphragm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 35(8), 422–425. <https://doi.org/10.1109/LPT.2023.3253714>
- Noman, A. Al, Dash, J. N., Cheng, X., Tam, H.-Y., & Yu, C. (2022). Mach-Zehnder interferometer based fiber-optic nitrate sensor. *Optics Express*, 30(21), 38966. <https://doi.org/10.1364/oe.468944>
- Othonos, A. (1997). Fiber Bragg gratings. In *Review of Scientific Instruments* (Vol. 68, Issue 12, pp. 4309–4341). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.1148392>
- Paixão, T., Araújo, F., & Antunes, P. (2019). Highly sensitive fiber optic temperature and strain sensor based on an intrinsic Fabry-Perot

- interferometer fabricated by a femtosecond laser. *Optics Letters*, 44(19), 4833. <https://doi.org/10.1364/ol.44.004833>
- Peng, J., Zhang, S., Jia, S., Kang, X., Yu, H., Yang, S., Wang, S., & Yang, Y. (2022). A highly sensitive magnetic field sensor based on FBG and magnetostrictive composite with oriented magnetic domains. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110667>
- Przhiialkovskii, D. V., & Butov, O. V. (2021). High-precision point-by-point fiber Bragg grating inscription. *Results in Physics*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104902>
- Robalinho, P., & Frazão, O. (2021). Giant displacement sensitivity using push-pull method in interferometry. *Photonics*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.3390/photonics8010023>
- Rodríguez-Quiroz, O., Domínguez-Flores, C. E., Monzón-Hernández, D., & Moreno-Hernández, C. (2019). Hybrid fiber fabry-perot interferometer with improved refractometric response. *Journal of Lightwave Technology*, 37(17), 4268–4274. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2922836>
- Rong, Q., & Qiao, X. (2019). FBG for oil and gas exploration. *Journal of Lightwave Technology*, 37(11), 2502–2515. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2866326>
- Rugeland, P., & Margulis, W. (2012). *Revisiting twin-core fiber sensors for high-temperature measurements*.
- Saitoh, K. (2022). Multi-Core Fiber Technology for SDM: Coupling Mechanisms and Design. *Journal of Lightwave Technology*, 40(5), 1527–1543. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3145052>
- Salceda-Delgado, G., Monzon-Hernandez, D., Martinez-Rios, A., Cardenas-Sevilla, G. A., & Villatoro, J. (1974). Optical microfiber mode interferometer for temperature-independent refractometric sensing. In *OPTICS LETTERS* (Vol. 230, Issue 11).
- Schukar, V., Köppe, E., Hofmann, D., Westphal, A., Sahre, M., Gong, X., Bartholmai, M., & Beck, U. (2016). Magnetic Field Detection with an Advanced FBG-based Sensor Device. *Procedia Engineering*, 168, 1270–1274. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.445>
- Sengupta, S., & Ghorai, S. K. (2015). An efficient method for determining transmission characteristics of superstructure fiber Bragg grating and its use

- for multiparameter sensing. *Optical Fiber Technology*, 21, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2014.11.009>
- Shou Huang, H., & Chang, H. (1990). Analysis of Optical Fiber Directional Coupling Based on the H Ell Modes-Part I: The Identical-Core Case. In *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY* (Issue 6).
- Shuhao, C., Sergeev, M., Petrov, A., Varzhel, S., Sheng, C., & Li, L. (2022). Highly sensitive vector magnetic field sensors based on fiber Mach–Zehnder interferometers. *Optics Communications*, 524. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128725>
- Slangen, P., Aprin, L., Heymes, F., Equis, S., & Jacquot, P. (2010). Liquid blending: an investigation using dynamic speckle interferometry. *Speckle 2010: Optical Metrology*, 7387, 738719. <https://doi.org/10.1117/12.870746>
- Snyder, A. W. (1972). Coupled-Mode Theory for Optical Fibers. *Journal of the Optical Society of America*, 62(11), 1267. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.001267>
- Starodumov, A. N., Zenteno, L. A., Monzon, D., & De La Rosa, E. (1997). Fiber Sagnac interferometer temperature sensor. *Applied Physics Letters*, 70(1), 19–21. <https://doi.org/10.1063/1.119290>
- Thomas, J., Rajanna, T. R., & Asokan, S. (2020). Temperature Compensated FBG Displacement Sensor for Long-Range Applications. *IEEE Sensors Letters*, 4(1). <https://doi.org/10.1109/LSENS.2019.2959377>
- Tian, S., Qiao, Y., Liang, M., Feng, M., Gao, Y., Li, L., & Shan, C. (2023). Sensitivity-enhanced Fabry-Perot interferometric fiber-optic microphone using hollow cantilever. *Optics Express*, 31(13), 21796. <https://doi.org/10.1364/oe.492026>
- Varguez-Flores, A., Beltrán-Perez, G., Muñoz-Aguirre, S., & Castillo-Mixcóatl, J. (2009). Thermally tunable all-fiber filter based on two series connected sagnac interferometers with different loop lengths. *Journal of Lightwave Technology*, 27(23), 5365–5369. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2027215>
- Villatoro, J., Amorebieta, J., Ortega-Gomez, A., Antonio-Lopez, E., Zubia, J., Schülzgen, A., & Amezcua-Correa, R. (2020). Composed multicore fiber structure for direction-sensitive curvature monitoring. *APL Photonics*, 5(7). <https://doi.org/10.1063/1.5128285>
- Villatoro, J., Antonio-Lopez, E., Zubia, J., Schülzgen, A., & Amezcua-Correa, R. (2017). Interferometer based on strongly coupled multi-core optical fiber for

- accurate vibration sensing. *Optics Express*, 25(21), 25734. <https://doi.org/10.1364/oe.25.025734>
- Villatoro, J., Finazzi, V., Coviello, G., & Pruneri, V. (2009). *Photonic-crystal-fiber-enabled micro-Fabry-Perot interferometer*.
- Villatoro, J., Finazzi, V., Minkovich, V. P., Pruneri, V., & Badenes, G. (2007). Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing. *Applied Physics Letters*, 91(9). <https://doi.org/10.1063/1.2775326>
- Villatoro, J., Van Newkirk, A., Antonio-Lopez, E., Zubia, J., Schülzgen, A., & Amezcua-Correa, R. (2016). Ultrasensitive vector bending sensor based on multicore optical fiber. *Optics Letters*, 41(4), 832. <https://doi.org/10.1364/ol.41.000832>
- Wang, C., Zhang, X., Jiang, J., Liu, K., Wang, S., Wang, R., Li, Y., & Liu, T. (2019). Fiber optical temperature compensated anemometer based on dual Fabry-Perot sensors with sealed cavity. *Optics Express*, 27(13), 18157. <https://doi.org/10.1364/oe.27.018157>
- Wang, F., Zou, M., Liao, C., Li, B., Liu, D., Zhou, J., Huang, H., Zhao, J., Liu, C., Chu, P. K., & Wang, Y. (2023). Three-dimensional printed microcantilever with mechanical metamaterial for fiber-optic microforce sensing. *APL Photonics*, 8(9). <https://doi.org/10.1063/5.0159706>
- Wang, H., Zheng, L., Zhang, J., & Liu, J. (2022). Orientation-dependent fiber-optic inclinometer based on core-offset michelson interferometer. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12089-5>
- Wang, J., Kou, Y., Wang, A., Hao, J., Niu, C., Jiang, H., Meng, H., Sun, W., & Geng, T. (2023). Lab-on-fiber: laser-induced micro-cavity for a relative humidity measurement. *Optics Letters*, 48(20), 5261. <https://doi.org/10.1364/OL.500699>
- Wang, J., Wei, L., Li, R., Liu, Q., Yu, L., Li, T., & Tan, Y. (2017). An FBG-based 2-D vibration sensor with adjustable sensitivity. *IEEE Sensors Journal*, 17(15), 4716–4724. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2715066>
- Wang, Y., Xie, F., Ma, S., & Dong, L. (2017). Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry. In *Optics and Lasers in Engineering* (Vol. 93, pp. 164–170). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.02.004>
- Wei, H., Wu, Z., Wei, Y., Wang, C., Zhang, H., Pang, F., Marques, C., Caucheteur, C., & Hu, X. (2024). 3D printed Fabry-Perot acoustic probe with

- a glass horn tube. *Optics and Laser Technology*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109977>
- Wolf, A., Bronnikov, K., Dostovalov, A., Simonov, V., Terentyev, V., & Babin, S. (2020). *Multiparameter point sensing with the FBG-containing multicore optical fiber*. 18. <https://doi.org/10.1117/12.2555325>
- Wu, Q., Okabe, Y., & Wo, J. (2015). Fiber sensor based on interferometer and bragg grating for multiparameter detection. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(12), 1345–1348. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2421350>
- Xiong, C., Liao, C., Li, Z., Yang, K., Zhu, M., Zhao, Y., & Wang, Y. (2020). Optical Fiber Integrated Functional Micro-/Nanostructure Induced by Two-Photon Polymerization. In *Frontiers in Materials* (Vol. 7). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.586496>
- Xiong, C., Zhou, J., Liao, C., Zhu, M., Wang, Y., Liu, S., Li, C., Zhang, Y., Zhao, Y., Gan, Z., Venturelli, L., Kasas, S., Zhang, X., Dietler, G., & Wang, Y. (2020). Fiber-Tip Polymer Microcantilever for Fast and Highly Sensitive Hydrogen Measurement. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(29), 33163–33172. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c06179>
- Xue, P., Liu, Q., Lu, S., Xia, Y., Wu, Q., & Fu, Y. (2023). A review of microstructured optical fibers for sensing applications. *Optical Fiber Technology*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103277>
- Xu, H., Li, F., Gao, Y., & Wang, W. (2020). Simultaneous Measurement of Tilt and Acceleration Based on FBG Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 20(24), 14857–14864. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3010851>
- Yao, T., Pu, S., Zhao, Y., & Li, Y. (2019). Ultrasensitive refractive index sensor based on parallel-connected dual Fabry-Perot interferometers with Vernier effect. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 290, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.011>
- Yi, D., Liu, F., Geng, Y., Li, X., & Hong, X. (2021). High-sensitivity and large-range fiber optic temperature sensor based on PDMS-coated Mach-Zehnder interferometer combined with FBG. *Optics Express*, 29(12), 18624. <https://doi.org/10.1364/oe.428384>
- Yi, X., Li, Y., Zhao, K., Wu, Z., Wang, Q., Liu, B., Buric, M., Wright, R., & Chen, K. P. (2023). CO₂Laser Tapering of Intrinsic Fabry-Perot Interferometers for Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 23(6), 5824–5830. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3241046>

- Yu, J., Xu, S., Jiang, Y., Chen, H., & Feng, W. (2020). Multi-parameter sensor based on the fiber Bragg grating combined with triangular-lattice four-core fiber. *Optik*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164094>
- Yun-Jiang Rao, Zeng-Ling Ran, & Yuan Gong. (2017). *Fiber-Optic Fabry-Perot Sensors: An Introduction*. CRC Press.
- Zhang, L., Jiang, Y., Gao, H., Jia, J., Cui, Y., Ma, W., Wang, S., & Hu, J. (2019). A diaphragm-free fiber Fabry-Perot gas pressure sensor. *Review of Scientific Instruments*, 90(2). <https://doi.org/10.1063/1.5055660>
- Zhang, P., Tang, M., Gao, F., Zhu, B., Fu, S., Ouyang, J., Shum, P. P., & Liu, D. (2014). Cascaded fiber-optic Fabry-Perot interferometers with Vernier effect for highly sensitive measurement of axial strain and magnetic field. *Optics Express*, 22(16), 19581. <https://doi.org/10.1364/oe.22.019581>
- Zhang, Q., Zhu, T., Zhang, J., & Chiang, K. S. (2013). Micro-fiber-based FBG sensor for simultaneous measurement of vibration and temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*, 25(18), 1751–1753. <https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2272934>
- Zhang, T., Liu, Y., Yang, D., Wang, Y., Fu, H., Jia, Z., & Gao, H. (2019). Constructed fiber-optic FPI-based multi-parameters sensor for simultaneous measurement of pressure and temperature, refractive index and temperature. *Optical Fiber Technology*, 49, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.02.007>
- Zhang, W., Wang, R., Rong, Q., Qiao, X., Guo, T., Shao, Z., Li, J., & Ma, W. (2017). An Optical Fiber Fabry-Perot Interferometric Sensor Based on Functionalized Diaphragm for Ultrasound Detection and Imaging. *IEEE Photonics Journal*, 9(3). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2694480>
- Zhao, X., Wu, X., Zuo, C., Mu, S., Zhang, W., Shi, J., Gui, L., Guang, D., & Yu, B. (2022). Miniatured Fabry-Perot strain probe based on anti-resonant hollow core fiber. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111775>
- Zhao, Y., Lin, Z., Dong, S., & Chen, M. (2023). Review of wearable optical fiber sensors: Drawing a blueprint for human health monitoring. In *Optics and Laser Technology* (Vol. 161). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109227>
- Zhao, Y., Song, N., Xu, X., & Gao, F. (2023). Research on the Fabrication of Ultrasensitive Fabry-Pérot Pressure Sensor Based on Dip-Coating Method. *IEEE Sensors Journal*, 23(14), 15614–15621. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3281778>

- Zhao, Y., Wang, P., Lv, R., & Liu, X. (2016). Highly Sensitive Airflow Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer and Vernier Effect. *Journal of Lightwave Technology*, 34(23), 5351–5356. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2615054>
- Zhao, Y., Zheng, H. kun, Lv, R. qing, & Yang, Y. (2018). A practical FBG pressure sensor based on diaphragm-cantilever. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 279, 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.004>
- Zheng, H. K., Zhao, Y., Lv, R. Q., Lin, Z. T., Wang, X. X., Zhou, Y. F., & Chen, S. Z. (2021). Reflective Optical Fiber Sensor Based on Dual Fabry Perot Cavities for Simultaneous Measurement of Salinity and Temperature. *IEEE Sensors Journal*, 21(24), 27495–27502. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3123387>
- Zhu, C., Chen, Y., Du, Y., Zhuang, Y., Liu, F., Gerald, R. E., & Huang, J. (2017). A Displacement Sensor with Centimeter Dynamic Range and Submicrometer Resolution Based on an Optical Interferometer. *IEEE Sensors Journal*, 17(17), 5523–5528. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2729281>
- Zhu, C., Chen, Y., Zhuang, Y., Du, Y., Gerald, R. E., Tang, Y., & Huang, J. (2017). An optical interferometric triaxial displacement sensor for structural health monitoring: Characterization of sliding and debonding for a delamination process. *Sensors (Switzerland)*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/s17112696>
- Zhu, W., Cheng, B., Li, Y., Nygaard, R., & Xiao, H. (2017). A Fluidic-Based High-Pressure Sensor Interrogated by Microwave Fabry-Perot Interferometry. *IEEE Sensors Journal*, 17(14), 4388–4393. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2712684>
- Zou, M., Liao, C., Chen, Y., Gan, Z., Liu, S., Liu, D., Liu, L., & Wang, Y. (2022). Measurement of Interfacial Adhesion Force with a 3D-Printed Fiber-Tip Microforce Sensor. *Biosensors*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/bios12080629>

Anexos

Anexo A

Cálculo del coeficiente de acoplamiento, de una MCF de dos núcleos, considerando la relación de la Ec. 24. Los índices efectivos de los supermodos son obtenidos de la simulación de la MCF con los parámetros de diseño de la Tabla 2. Para un Λ fijo y variando λ se obtiene los siguientes datos:

Tabla A1. Valores del coeficiente de acoplamiento variando la longitud de onda.

Λ (μm)	λ (nm)	n_{s_1}	n_{s_2}	C (m^{-1})
12	1300	1.448384	1.448296	212.6616
	1350	1.448253	1.448146	249.0003
	1400	1.448124	1.447996	287.2313
	1450	1.447997	1.447845	329.3255
	1500	1.447872	1.447694	372.8023
	1600	1.44763	1.447392	467.3119
	1650	1.447512	1.447241	515.9827
	1700	1.447398	1.447091	567.3346

Se analiza el coeficiente de acoplamiento para un λ fijo y variando Λ del cual se obtiene los siguientes datos:

Tabla A2. Valores del coeficiente de acoplamiento variando la separación entre núcleos.

$\lambda(\text{nm})$	$\Lambda (\mu\text{m})$	n_{s_1}	n_{s_2}	$C(\text{m}^{-1})$
1550	10	1.447911	1.447393	1049.899996
	11	1.44781	1.447484	660.7478742
	12	1.447749	1.447543	417.5277978
	13	1.447712	1.447581	265.5152501
	14	1.447688	1.447605	168.2272195

Anexo B

Para el análisis de la ecuación de interferencia en un IFPF, sea un haz proveniente de una fuente óptica, cuyo campo eléctrico es E_0 , con una fase inicial ϕ_0 , incide normal a la superficie S_{R1} . El haz se refleja con una magnitud siendo este el haz de referencia

$$E_1 = r_1 E_0 \exp(-iT) \quad \text{Ec. B1}$$

donde

$$T = \begin{cases} 0, & n_i > n_t \\ \pi, & n_i < n_t \end{cases} \quad \text{Ec. B2}$$

Siendo n_i el medio por donde se propaga y n_t el medio al que se transmite. Por otra parte, el haz refractado tiene un campo

$$E_2 = t_1 E_0 \quad \text{Ec. B3}$$

Este se propaga por la cavidad e incide en S_{R2} como

$$E_3 = \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} n_{cav} L_{cav}\right) E_2 \quad \text{Ec. B4}$$

donde su fase porta las características del medio por el que se transmite, teniendo una fase acumulada de $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{cav} L_{cav}$, y al incidir en S_{R2} surge el haz reflejado con una magnitud

$$E_4 = r_2 E_3 \quad \text{Ec. B5}$$

El haz se transmite por la cavidad en dirección a S_{R1} donde incide como

$$E_5 = \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} n_{cav} L_{cav}\right) E_4 \quad \text{Ec. B6}$$

y su fase acumulada ϕ se duplica. Al incidir en S_{R1} , con un coeficiente de acoplamiento de la fibra óptica ($\sqrt{\eta_1}$), se transmite por el núcleo con un campo

$$E_6 = t_1 \sqrt{\eta_1} E_5 \quad \text{Ec. B7}$$

expresando E_6 en términos del campo inicial E_0 , se tiene

$$E_6 = \left(r_2 t_1^2 \sqrt{\eta_1} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} (2n_{cav} L_{cav})\right) \right) E_0 \quad \text{Ec. B8}$$

Dentro del núcleo de la fibra óptica, E_6 se superpone con E_1 expresando el campo eléctrico total como

$$E_T = E_1 + E_6 \quad \text{Ec. B9}$$

Expresando la interferencia en términos de intensidad

$$\begin{aligned} I_{Total} &= |E_T|^2 = E_T E_T^* = (E_1 + E_6) * (E_1^* + E_6^*) \\ I_{Total} &= E_1 E_1^* + E_1 E_6^* + E_6 E_1^* + E_6 E_6^* \end{aligned} \quad \text{Ec. B10}$$

Sustituyendo Ec. B1 y Ec. B8 en Ec. B10, se tiene

$$\begin{aligned} I_{Total} &= \left(r_1^2 + r_2^2 t_1^4 \eta_1 \right. \\ &\quad \left. + 2r_1 r_2 t_1^2 \sqrt{\eta_1} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} (2n_{cav} L_{cav})\right) \right) I_o \end{aligned} \quad \text{Ec. B11}$$

Considerando la reflectancia de las superficies, $R = r^2$ y $t^2 = (1 - R)$, se tiene la ecuación de interferencia de forma normalizada como

$$\begin{aligned} I_N &= \frac{I_{Total}}{I_o} = R_1 + R_2 (1 - R_1)^2 \eta_1 \\ &\quad + 2(1 - R_1) \sqrt{R_1 R_2 \eta_1} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} (2n_{cav} L_{cav})\right) \end{aligned} \quad \text{Ec. B12}$$

Anexo C

Los núcleos de las fibras fabricadas por el CREOL, MCF₃ y MCF₇, tienen una geometría hexagonal. En este sentido para la creación de los núcleos de las MCFs en el simulador MODE, se crea un hexágono regular inscrito en una circunferencia. En las configuraciones del polígono se agregan los valores de cada uno de sus vértices, en términos de posición en el plano XY. Los vértices en X y Y pueden ser calculados a partir del radio de la circunferencia como: $X=r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot m\right)$, $Y=r \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot m\right)$ donde $0 < m \leq 6$. Los valores obtenidos son considerados a partir del punto central de la geometría. En la Fig. C1 se muestra la geometría del núcleo central de una MCF. Este mismo procedimiento se aplica para los núcleos distribuidos a su alrededor.

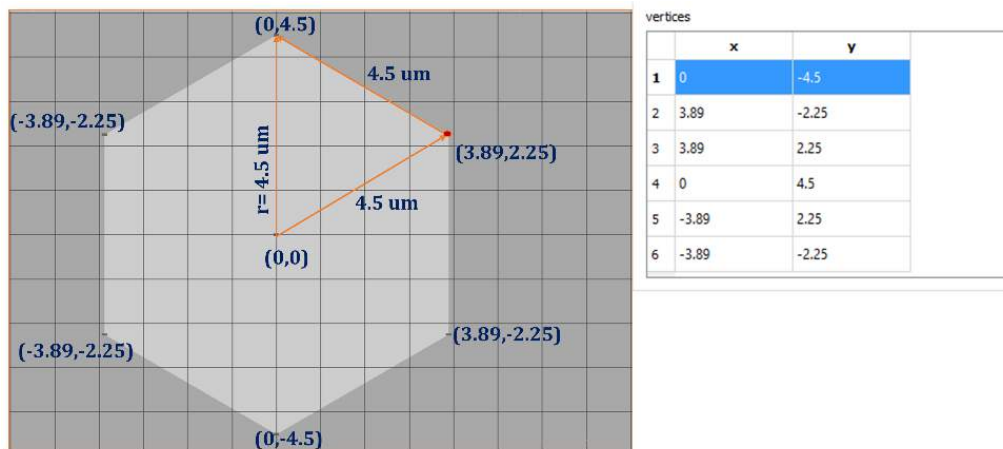


Figura C1. Diseño geométrico del núcleo de una MCF de N=3 y 7 núcleos.

De acuerdo a la separación Λ entre los núcleos, de centro a centro, los núcleos son distribuidos alrededor del núcleo central colocando cada uno de sus centros en las coordenadas X y Y calculados a partir de la geometría que se requiera formar. Para una MCF₇ se crea en su distribución una geometría hexagonal tal como se aprecia en la Fig. C2. La posición de sus centros puede ser calculada como: $X= \Lambda \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot m\right)$, $Y= \Lambda \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot m\right)$ donde $0 < m \leq 6$. Esto aplica para la distribución de los núcleos con otras geometrías, donde el ángulo y m se debe ajustar a dicha configuración.

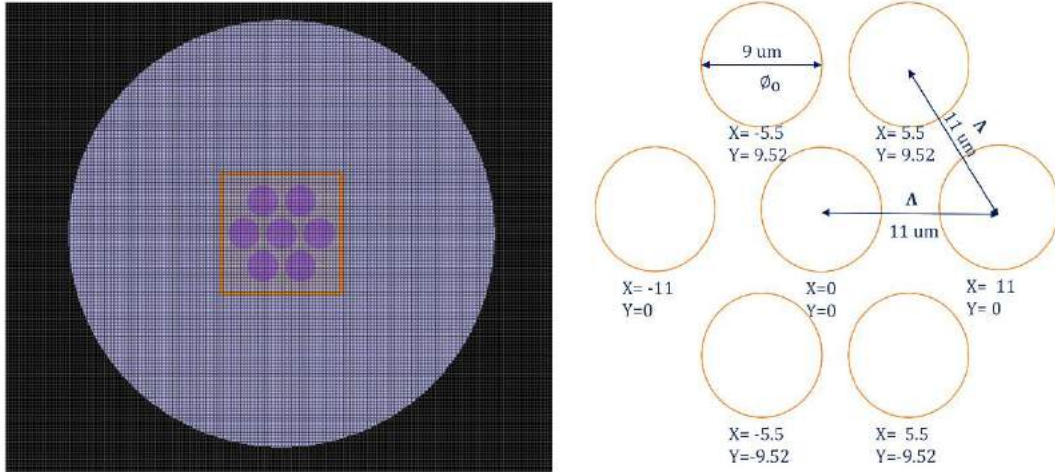


Figura C2. Diseño geométrico de la distribución de forma hexagonal de los núcleos en una MCF de $N=7$ núcleos.

Anexo D

Configuración para la comunicación en LabVIEW con el interrogador MicronOptics sm125 vía Ethernet.

Configuración del adaptador de Red

1. Entrar a *Panel de control* → *Redes e Internet* → *Centro de redes y recursos compartidos* → *Cambiar configuración del adaptador*

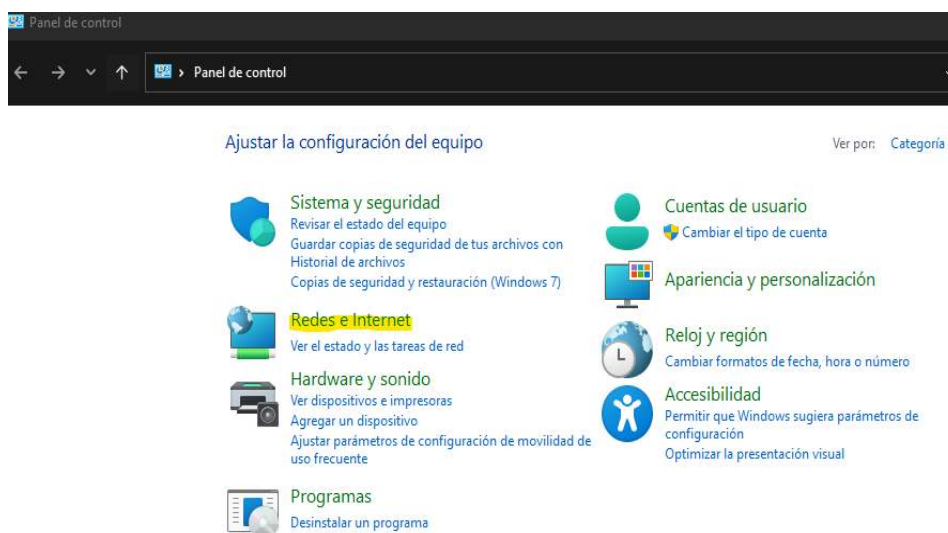


Figura D1. Panel de control

2. Seleccionar el adaptador de *Ethernet* → *click derecho* → *seleccionar propiedades*

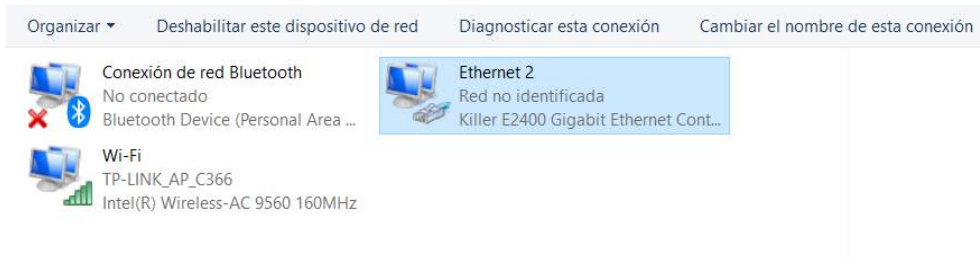


Figura D2. Panel de configuración del adaptador de Ethernet

3. Ubicarnos sobre la lista en la opción *Habilitar el protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)* → *Propiedades* → *Configurar: Dirección IP, Máscara de subred, y Puerta de enlace predeterminada*, tal como se muestra en la imagen de abajo.

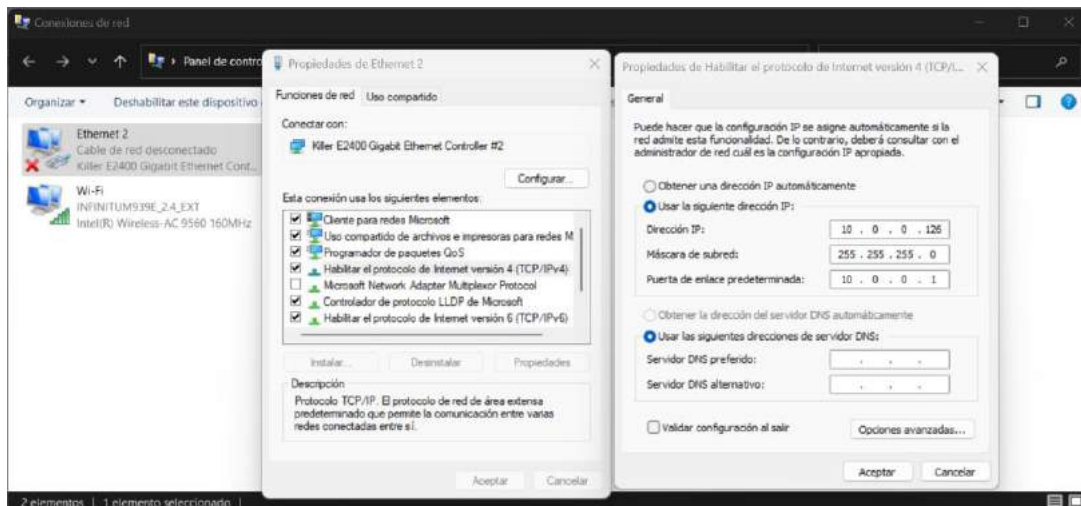


Figura D3. Panel de la propiedad de Ethernet: protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)

Configuración del MicronOptics sm125 como instrumento VISA en LabVIEW

1. Abrir NI MAX
2. Seleccionar *Devices and Interfaces (Azul)* → *Networking Devices (Amarillo)*

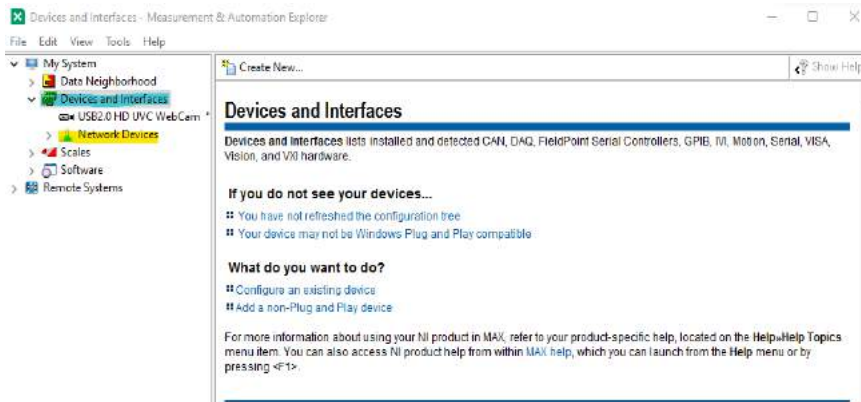


Figura D4. Panel del programa NI-MAX de LabVIEW

3. Seleccionar *Add Network Device* → *VISA TCP/IP Resource*

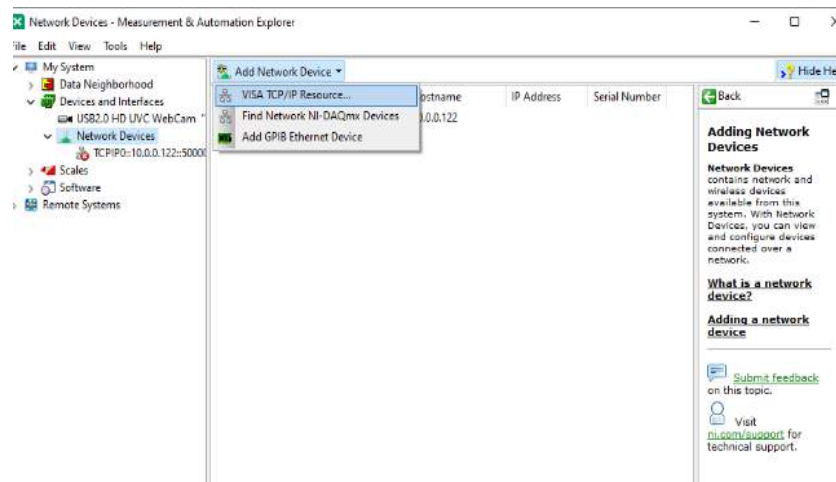


Figura D5. Panel de configuración del dispositivo de red en NI-MAX

4. En la ventana *Create New*, seleccionar *Manual Entry of Raw Socket* → *Next*

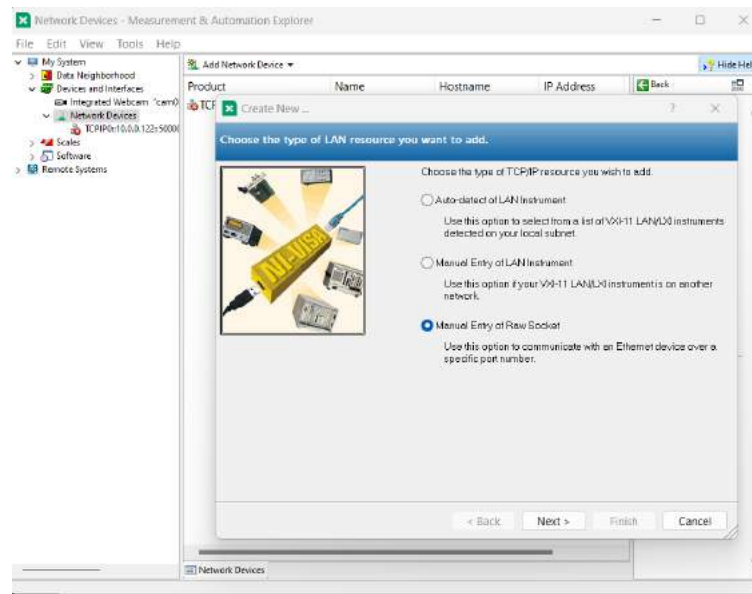


Figura D6. Panel de selección del tipo de la conexión LAN

5. En la ventana hay que configurar el *instrumento VISA*. Se coloca la *dirección IP* del instrumento (10.0.0.122) y el número de puerto (50000), siendo los valores vistos en la imagen de abajo. Finalmente, se da *Validate* y se espera un mensaje de *Successful*. Después se le asigna el nombre con el que se identificará dentro del diagrama de LabVIEW el interrogador. Este aparece como control *I/O VISA*.

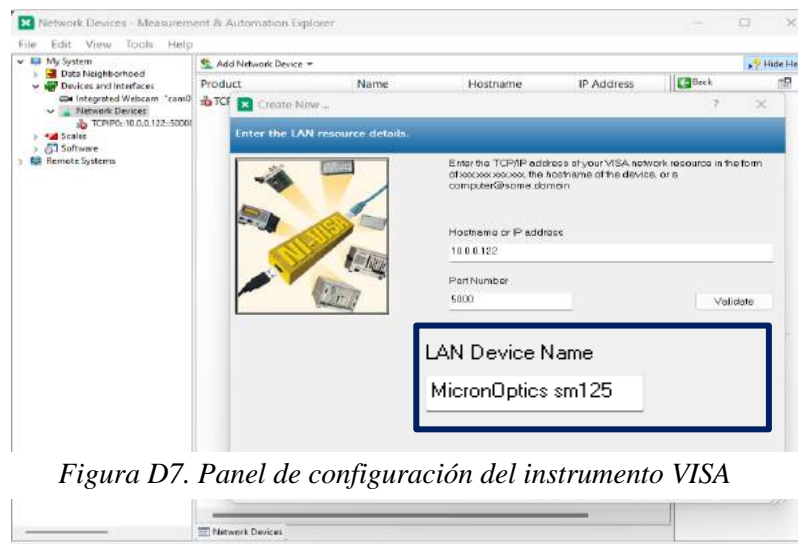


Figura D7. Panel de configuración del instrumento VISA

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 **2019** a **2024** bajo la supervisión del Dr. **David Monzón Hernández**.

León, Gto. a 14 de febrero 2024