



CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN ÓPTICA, A.C.

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE INFERFERÓMETROS  
FABRY-PEROT DE FIBRA ÓPTICA EXTRÍNSECOS Y SU APLICACIÓN EN  
SISTEMAS DE SENSADO DE VARIABLES FÍSICAS**

Como requisito para obtener el grado de:



**Maestro en Ciencias (Óptica)**

Presenta:

**Ing. Fís. Carmen Edith Domínguez Flores**

Asesor:

**Dr. David Monzón Hernández**

Julio de 2018

León, Guanajuato, México



***A mis padres:***

***Ma. del Carmen Flores García***

***David Domínguez Tapia***

***y a mis hermanos:***

***Iván Alejandro Domínguez Flores***

***Azael David Domínguez Flores***

***por su incondicional amor, apoyo y paciencia.***

*“En algún lugar, alguna cosa increíble aguarda a ser descubierta”*

Carl Sagan.

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por su infinita bondad y por el invaluable regalo de la vida.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme la oportunidad de recibir una beca durante la realización de mis estudios de maestría.*

*Al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) por haberme permitido ser su estudiante, por haberme facilitado el uso de sus instalaciones y por el apoyo humano de cada uno de sus trabajadores. También agradezco a todos los maestros que fueron parte de mi formación académica.*

*Al Dr. David Monzón Hernández por su portentosa labor como asesor de este trabajo. Gracias por su paciencia, su apoyo, sus consejos y sus acertadas ideas. Sin duda usted es un ejemplo a seguir humana y profesionalmente.*

*A los doctores Iván Hernández Romano y Daniel López Cortés por su valiosa colaboración como revisores de este trabajo. Gracias por su tiempo y aportaciones.*

*Al Dr. Raúl Ochoa Valiente, por seguir siendo parte de mi formación contribuyendo con sus recomendaciones y sus acertadas palabras de ánimo.*

*Al Dr. Juan Antonio Rayas, por sus contribuciones, y sus útiles consejos de laboratorio.*

*Al Ing. José Ramón Cruz, por haberme apoyado en la realización del programa de LABVIEW.*

*Al M.I. Osvaldo Rodríguez, por tus aportaciones en el laboratorio.*

*A mi familia, a quienes tengo presente a cada paso que doy. Soy muy afortunada de contar con su amor y con poder recibir un abrazo que me llena de energía cada que nos vemos. Ustedes son mi fuerza y mi motor.*

*A mis entrañables amigos Rocío, Carlos, Paola, Karen, Cyntia, Erika, Fer y Horacio, quienes aún en la distancia siempre han estado al pendiente de mi dándome ánimo y soporte.*

*A quienes conocí durante estos dos años y tengo la fortuna de considerar mis amigos: Karen, gracias por todo lo que aprendí de ti, por haberme apoyado en los tiempos difíciles y por haberle dado un valor especial a cada momento. Clarita, gracias por tu cariño, por escucharme y por las consideraciones que siempre has tenido conmigo. Sigi, por tus palabras de aliento, tu compañía, tus consejos y los memorables tiempos que compartimos. Dany, por tu apoyo incondicional, por tantas pláticas y buenos momentos. A Josué, por creer en mí y por compartir tu conocimiento y tus buenas ideas conmigo.*



## RESUMEN

En este trabajo se propone un método de fabricación de cavidades Fabry-Perot en fibra óptica, que básicamente consiste de dos superficies plano-paralelas parcialmente reflectoras separadas una distancia, con los cuales es posible construir esquemas de sensado altamente sensibles propios del fenómeno de interferencia; compactos, bio-compatibles, para realizar mediciones in-situ y en tiempo real, aprovechando la características inherentes de las fibras ópticas. Para esto se diseñó y construyó una plataforma semi-automática, modular y reconfigurable para la fabricación de interferómetro Fabry-Perot de fibra óptica (FFPI por sus siglas en inglés) con una o dos cavidades utilizando únicamente el corte y fusión de fibras ópticas. Se fabricaron FFPI con cavidades de 5 hasta 500 $\mu\text{m}$  de manera fácil, rápida, repetible y con una desviación de  $\pm 0.97\mu\text{m}$  del valor deseado. Es de destacar que los espectros de reflexión de los dispositivos son altamente estables y con un contraste de hasta 20 dB.

Se desarrolló la ecuación general del espectro de reflexión de un FFPI con n-cavidades que se utilizó para definir las dimensiones y la estructura de los FFPI a fabricar. Este modelo sirvió también para calcular el tamaño de las cavidades de los FFPI fabricados, así como los cambios que ocurren debido a perturbaciones externas, de una manera simple y automática en el dominio de Fourier.

Se diseñaron y fabricaron diferentes estructuras de FFPI y se caracterizó la respuesta de los interferómetros con una sola cavidad a esfuerzo longitudinal obteniendo una sensibilidad máxima de 28 pm/ $\mu\epsilon$ . Esta propiedad única se aprovechó para proponer un sensor de temperatura novedoso. Los FFPI con dos cavidades se utilizaron para medir el índice de refracción de líquidos, se demuestra que se puede medir de manera simultánea la temperatura y el índice de refracción. Finalmente se hace una propuesta de biosensor, aprovechando la capacidad de los FFPI fabricados para medir cambios en el índice de refracción.

Los resultados experimentales demuestran que los sensores diseñados y fabricados con los FFPI tienen sensibilidad y resolución comparables a otras tecnologías, lo que los hace altamente competitivos, pero además se demuestra que son de costo más bajo y más simple de fabricar que otros esquemas de Fabry-Perot propuestos o que las Rejillas de Bragg.

## ABSTRACT

In this work, a method to fabricate optical fiber Fabry-Perot cavities, which basically consist of two partially reflective plane-parallel surfaces separated by a distance, is proposed and demonstrated. Such cavities can be used to build highly sensitive sensors (typical attribute of the interference phenomena); taking advantage of the inherent characteristics of the optical fibers these sensors are compact, bio-compatible, with capacity for in-situ and real time measurements. A semi-automatic, modular and resettable platform was designed and constructed to fabricate fiber optic Fabry-Perot interferometer (FFPI) with  $n$  inner cavities by just cleaving and splicing optical fibers. FFPI with cavities ranging from 5 to 500  $\mu\text{m}$  were fabricated in an easy, quick and repeatable way with a deviation about  $\pm 0.97\mu\text{m}$  from the desired length. It is noteworthy that the reflected spectra of the devices fabricated are highly stable with a high contrast of 20 dB.

A mathematical expression for the reflected spectra of an  $n$ -cavities FFPI was derived and was used to simulate the optical response of the FFPI designed prior to fabricate it. The computational simulation of the reflectance of the FFPI in the Fourier domain allowed us to calculate the optimal length of the cavities in a simple and automatic way as well as the effect of external perturbation.

Different FFPI structures were designed and built. Interferometers with a single cavity were mounted in an experimental setup to characterize its response to longitudinal stress obtaining a maximum sensitivity of 28  $\text{pm}/\mu\text{e}$ . This unique property was used to propose a novel temperature sensor. FFPIs with two inner cavities capable to measure the refractive index of liquid samples were used to demonstrate the simultaneous measurement of temperature and refractive index. Finally, the bio-functionalization of FFPI is demonstrated taking advantage of the exceptional capability of the FFPIs to measure refractive index changes.

The experimental results presented allowed us to demonstrate that FFPI sensors, designed and fabricated, have sensitivity and resolution comparable to other technologies, which makes them highly competitive. In this thesis is also demonstrated that the FFPIs here proposed are cheaper and simpler to fabricate than other Fabry-Perot schemes proposed so far or those based on fiber Bragg grating technology.



# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
1.1 OBJETIVO .....	12
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	13
<b>2. INTERFEROMETRÍA: LA PARADOJA DE LOS SISTEMAS ALTAMENTE SENSIBLES</b> .....	<b>14</b>
2.1 FUNDAMENTOS DE LA INTERFEROMETRÍA.....	15
2.2.1 <i>EL INTERFERÓMETRO DE FABRY-PEROT</i> .....	18
2.2 APLICACIONES DE LOS INTERFERÓMETROS CONVENCIONALES.....	19
2.3 INTERFERÓMETROS COMERCIALES .....	20
2.4 LAS NUEVAS APLICACIONES DE LA INTERFEROMETRÍA .....	21
<b>3. INTERFEROMETROS DE FIBRA ÓPTICA: EL ÉXITO COMERCIAL DEL FENÓMENO</b> .....	<b>23</b>
3.1 LOS INTERFERÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA.....	24
3.2 APLICACIONES DE LOS INTERFERÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA.....	27
3.3 INTERFERÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA COMERCIALES .....	28
3.4 LAS VENTAJAS DE LOS INTERFERÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA .....	30
<b>4. INTERFERÓMETRO FABRY-PEROT DE FIBRA ÓPTICA: LA SIMPLICIDAD ABSOLUTA</b> .....	<b>31</b>
4.1 LA ESTRUCTURA BÁSICA DEL INTERFERÓMETRO FABRY-PEROT DE FIBRA ÓPTICA .....	32
4.2 LA ESTRUCTURA DEL FFPI ELEGIDA Y LAS RAZONES PARA ELLO.....	34
4.3 LA REFLECTANCIA TEÓRICA DE LA CONFIGURACIÓN FFPI ELEGIDO .....	35
4.5 DISEÑO DE LA PLATAFORMA PARA FABRICAR LOS FFPI.....	42
4.6 CONCLUSIONES .....	46
<b>5. INTERFERÓMETRO DE FIBRA ÓPTICA HECHO EN EL CIO</b> .....	<b>47</b>
5.1 FABRICACIÓN DE LOS IFP .....	48
5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS IFPF .....	50
5.3 SENSOR DE ESFUERZOS.....	53
5.4 SENSOR DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN .....	62
5.5 SENSOR DE TEMPERATURA .....	67
5.6 SENSOR DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN Y TEMPERATURA .....	71

5.7 DEMOSTRACIÓN DE UN BIO-SENSOR .....	75
5.8 CONCLUSIONES.....	77
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>79</b>
<b>APÉNDICE A. CÁLCULO DE ECUACIÓN DE REFLECTIVIDAD PARA UNA CAVIDAD FABRY-PEROT .....</b>	<b>86</b>
<b>APÉNDICE B. PROGRAMAS DE MATLAB .....</b>	<b>88</b>
<b>APÉNDICE C. PROGRAMA DE LABVIEW .....</b>	<b>91</b>
<b>APÉNDICE D. ESPECIFICACIONES POLYTE 8016.....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Parámetros de una onda. ....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2. Cavidad Fabry-Perot. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3. Anillos formados por un FPI. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5. a) Interferograma y b) Análisis de superficie.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6. Estructura del interferómetro de LIGO.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8. Interferómetros de fibra óptica más comunes. ....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9. Interferómetros de fibra óptica comerciales: a) Posición (Altheris), b) Presión (Altheris), c) Esfuerzo (Micron Optics), d) Intrusión (Micron Optics), e) Temperatura (Altheris) y f) Aceleración (Micron Optics).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10. a) Crecimiento del mercado de sensores de fibra en USA y b) Usos más frecuentes de sensores de fibra. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 11. Interferómetros Fabry-Perot a) Intrínsecos y b) Extrínsecos.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 12. Estructura del FFPI.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 13. Modelo de una cavidad FP. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 14. Espectro de reflexión de tres FFPI con variación en la longitud de sus cavidades. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 15. Variación de longitud en una cavidad de 10 <math>\mu\text{m}</math>.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16. FFPI de dos cavidades. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 17. FFPI de doble cavidad con <math>L_1=7 \mu\text{m}</math> a distintas <math>L_2</math>. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 18. FFPI de doble cavidad con <math>L_2=200 \mu\text{m}</math> a distintas <math>L_1</math>. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 19. Variación teórica de <math>n_2</math> para distintos IRs.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 20. Plataforma de fabricación de cavidades FP.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 21. Programa para el control de la plataforma.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 22. a) Tarjeta de calibración y b) Empalme con respecto a navaja antes del corte. ...</i>	<i>44</i>
<i>Figura 23. Comparación de espectros experimentales y teóricos. ....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 24. Empalme por fusión.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 25. Fotografía transversal del HCF. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 26. Alineación de empalme y corte de cavidad. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27. Cavidades de distintas longitudes. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 28. Interrogación de cavidades FP.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 29. Espectros de reflexión a distintas longitudes de cavidades FP. ....</i>	<i>50</i>

<i>Figura 30. IFT del <math>\cos(\omega t_0)</math></i> .....	52
<i>Figura 31. Espectros de reflexión y sus IFT de a) 15.789 <math>\mu\text{m}</math> y b) 55.262 <math>\mu\text{m}</math>.</i> .....	53
<i>Figura 32. Arreglo para la medición de esfuerzo.</i> .....	54
<i>Figura 33. Espectro de reflexión de cavidad de <math>L=273.55 \mu\text{m}</math>.</i> .....	55
<i>Figura 34. Desplazamiento del espectro de reflexión sometido a esfuerzo.</i> .....	56
<i>Figura 35. Corrimiento del espectro en longitud de onda con respecto al esfuerzo sometido FFPI de <math>L=273.55 \mu\text{m}</math>.</i> .....	56
<i>Figura 36. Espectro de reflexión de cavidad de <math>L=17.541 \mu\text{m}</math>.</i> .....	57
<i>Figura 37. Desplazamiento del espectro de reflexión sometido a esfuerzo.</i> .....	57
<i>Figura 38. Corrimiento del espectro en longitud de onda con respecto al esfuerzo sometido FFPI de <math>L=17.541 \mu\text{m}</math>.</i> .....	58
<i>Figura 39. Sistema para interrogación en potencia.</i> .....	58
<i>Figura 40. Medición de esfuerzo en potencia para cavidad de <math>L=17.541 \mu\text{m}</math>.</i> .....	59
<i>Figura 41. Espectro de reflexión de cavidad de <math>L=6.76 \mu\text{m}</math>.</i> .....	59
<i>Figura 42. Espectro de reflexión con respecto al incremento en esfuerzo.</i> .....	60
<i>Figura 43. Corrimiento del espectro en longitud de onda con respecto al esfuerzo sometido FFPI de <math>L=6.76 \mu\text{m}</math>.</i> .....	60
<i>Figura 44. Medición de esfuerzo en potencia para cavidad de <math>L=6.76 \mu\text{m}</math>.</i> .....	61
<i>Figura 45. Comparación de esfuerzo a distintas longitudes de cavidades.</i> .....	62
<i>Figura 46. a) Espectro de reflexión en aire y b) Esquema del dispositivo.</i> .....	63
<i>Figura 47. Espectro de reflexión a distintos IR.</i> .....	63
<i>Figura 48. Índices de refracción encontrados para cada concentración de NaCl.</i> .....	64
<i>Figura 49. Espectro de reflexión en aire.</i> .....	65
<i>Figura 50. Espectros de reflexión calculados.</i> .....	65
<i>Figura 51. Espectros de reflexión a diferentes concentraciones de NaCl.</i> .....	66
<i>Figura 52. Curva de calibración para IR.</i> .....	66
<i>Figura 53. Proceso de fabricación de sensor de temperatura ambiente.</i> .....	67
<i>Figura 54. a) Esquema de interrogación y b) Espectro de reflexión de fuente.</i> .....	67
<i>Figura 55. Comparación espectros a) Experimentales y b) Teóricos de curado del polímero.</i> .....	68
<i>Figura 56. Espectros de reflexión con cambios de temperatura.</i> .....	68

<i>Figura 57. a) Posición del mínimo del espectro con cambios de temperatura de 10 a 35°C y b) Posición del mínimo del espectro para variaciones de temperatura de 20 a 35°C. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 58. Variación de potencia con respecto de la temperatura.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 59. Medición de potencia con cambios de temperatura de 1°C.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 60. Variación en potencia con cambios en temperatura de 2°C. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 61. a) Espectro de reflexión del FFPI híbrido y b) Esquema para medir cambios en IR y temperatura.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 62. Espectro de reflexión en aire variando la temperatura.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 63. Cambio de longitud de onda con respecto a la temperatura.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 64. Cambios del espectro de reflexión con respecto a temperatura. ....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 65. Corrimiento del espectro en longitud de onda con respecto a la temperatura.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 66. Cambio de visibilidad de las franjas de interferencia con respecto al IR. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 67. Proceso de biofuncionalización: a) Tratamiento de plasma y b) Aplicación de la hidrofobina Vhm2.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 68. Espectros de reflexión antes (negro) y después de la biofuncionalización (rojo). .</i>	<i>77</i>



## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Variantes de los FFPI y sus aplicaciones. ....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2. Longitudes de los FFPI calculado por dos métodos. ....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3. Comparación de sensibilidad a esfuerzo en FFPI.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 4. Comparación de sensibilidad a temperatura ambiente en FFPI.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 5. IR calculados. ....</i>	<i>74</i>





**1.**

# **INTRODUCCIÓN**

La fibra óptica es una guía de onda que se utiliza cotidianamente para la transmisión de datos con baja pérdida en telecomunicaciones. En los últimos años, se ha demostrado la factibilidad comercial de las fibras ópticas en la detección y medición de variables físicas, químicas y biológicas. Los sensores de fibra óptica tienen múltiples ventajas sobre otros sensores comerciales, son inmunes a campos electromagnéticos externos, son ligeros y compactos, pueden conectarse a una red de comunicación establecida por lo que se pueden hacer mediciones telemétricas y en tiempo real, son estables, precisos, tienen alta repetitividad, en algunas aplicaciones tienen la mayor sensibilidad y la mejor resolución reportada, etc. Gracias a estas características los sensores de fibra óptica han sido un éxito comercial y su mercado se ha ido expandiendo en todo el mundo en los últimos años.

Algunos de los esquemas de sensado de fibras ópticas más conocidos incluyen las rejillas de Bragg y los interferómetros de fibra óptica, en el caso de estos últimos, como es de esperarse se basan en el mismo principio físico que los interferómetros convencionales pero en un tamaño portátil, pero sin la inconveniente necesidad de una perfecta alineación de todos sus componentes. Estas ventajas facilitan su comercialización y amplían el campo de sus potenciales aplicaciones. Los sensores interferométricos de fibra óptica se han estudiado por más de 30 años, y año con año se publican nuevos esquemas con los que se busca mejorar sus cualidades de sensado, simplificar el proceso de fabricación o encontrar nuevas aplicaciones científicas e industriales.

El interferómetro Fabry-Perot de fibra óptica (FFPI por sus siglas en inglés) es uno de los sensores más conocidos y utilizados ya que tiene la estructura más simple y compacta. Se ha utilizado para detectar y medir variables físicas como esfuerzo, índice de refracción, presión, humedad, temperatura, entre otras. Una de las aplicaciones más importantes que se le ha dado a estos dispositivos actualmente es para detectar y medir agentes biológicos relacionados con enfermedades.

La investigación y el desarrollo de sensores de interferómetros de fibra óptica es un campo en el que actualmente se trabaja activamente a nivel mundial, y sorprendentemente se siguen encontrando aplicaciones nuevas que siguen dando paso a la creación de nuevos dispositivos comerciales.

## 1.1 OBJETIVO

---

El objetivo general de este trabajo es la construcción de dispositivos sensores de fibra óptica con cualidades mejoradas y aplicarlos para monitorear variables físicas.

Los objetivos particulares son:

- 1) Entender los fundamentos del fenómeno de interferencia en fibras ópticas.
- 2) Conocer el estado del arte de los interferómetros Fabry-Perot en fibra óptica.
- 3) Desarrollar un procedimiento para calcular la reflectancia de un interferómetro FFPI de n-cavidades.

- 4) Escribir un programa en MATLAB para simular el espectro de reflexión de un interferómetro de una cavidad, dos cavidades o n-cavidades.
- 5) Diseñar y construir una plataforma semi-automatizada para la fabricación de cavidades Fabry-Perot mediante el corte y fusión de fibras ópticas.
- 6) Proponer una metodología o procedimiento para fabricar cavidades Fabry-Perot.
- 7) Caracterizar el procedimiento para la fabricación de los interferómetros Fabry-Perot.
- 8) Desarrollar un sistema óptico para analizar y caracterizar el espectro de interferencia.
- 9) Estudiar los efectos de perturbaciones externas como la temperatura, el esfuerzo o el índice de refracción, que cambian las características de la cavidad y sus efectos en la función de transferencia de los interferómetros.
- 10) Diseñar y construir dispositivos sensores de interferómetros Fabry-Perot de fibra óptica para medir cambios en variables físicas como índice de refracción, temperatura y esfuerzo. Y fabricar un esquema para medir índice de refracción y temperatura simultáneamente.
- 11) Estudiar la aplicación de los sensores de fibra óptica con la configuración Fabry-Perot a los biosensores.
- 12) Realizar la demostración de un biosensor en fibra óptica con la estructura de interferómetros Fabry-Perot híbridos.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

---

El mercado de los sensores de fibra óptica ha ido creciendo en los últimos años debido a las múltiples ventajas que estos dispositivos ofrecen a comparación de sensores con otras configuraciones y tecnologías. Una de las configuraciones más conocidas en sensores de fibra óptica son los interferómetros. Utilizando esta técnica se pueden construir dispositivos con alta sensibilidad. De los esquemas interferométricos más simples se encuentra el de Fabry-Perot.

Sabiendo esto, en este trabajo se buscó diseñar y fabricar una plataforma para construir interferómetros Fabry-Perot de fibra óptica de manera simple y con un bajo error utilizando únicamente el corte y empalme de fusión de fibras ópticas. Con esta plataforma se pretende fabricar cavidades Fabry-Perot de longitudes menores de 10  $\mu\text{m}$ . Cavidades tan pequeñas se ha reportado en muy pocos trabajos, incluso utilizando técnicas más complicadas. En estas cavidades se tienen señales con baja pérdida lo que puede ayudar a mejorar las características del sensor. Con esta plataforma se amplían las posibilidades del laboratorio del grupo de sensores ópticos y microdispositivos ya que se pueden construir sensores interferométricos de manera simple, repetitiva, con una inversión baja y que pueden utilizarse para la medición de variables físicas, químicas y biológicas en diferentes esquemas.

**2.**

**INTERFEROMETRÍA: LA  
PARADOJA DE LOS  
SISTEMAS ALTAMENTE  
SENSIBLES**

La interferometría óptica es un fenómeno físico que se estudia y se utiliza ampliamente para desarrollar técnicas o métodos de medición tanto en laboratorios de investigación como en plantas de producción a nivel industrial [1]. Esta técnica ha sido objeto de estudio, investigación y desarrollado ampliamente durante más de cien años.

La tecnología de la interferometría óptica se basa en la superposición de haces de luz mutuamente coherentes que se propagan con diferentes trayectorias ópticas a través del espacio o medios dieléctricos que actúan como guías de onda. Las condiciones para que estas ondas sean mutuamente coherentes son que provengan de la misma fuente, que sean monocromáticas y tengan exactamente la misma frecuencia [2]. Éstos haces de luz, después de viajar por diferentes caminos ópticos, se encontrarán en algún punto del espacio, y como resultado de la interferencia la intensidad de la luz resultante tendrá una variación periódica que dependerá de la diferencia de trayectoria óptica, es decir, la diferencia de fase óptica, entre los haces [3]. El cambio periódico en la intensidad de la luz se conoce como patrón de interferencia o franjas de interferencia [4]. Un cambio muy pequeño en la diferencia de trayectoria óptica puede inducir un cambio mensurable en la intensidad del patrón de interferencia. Basado en este mecanismo, se han propuesto una serie de instrumentos en los que se hacen interferir dos haces de manera controlada, conocidos como interferómetros ópticos. Con estos dispositivos se miden los cambios en el patrón de interferencia para obtener información sobre los cambios de las trayectorias ópticas, y se usan ampliamente para mediciones precisas de cantidades físicas, como la distancia, el desplazamiento y la velocidad, así como para las pruebas de componentes ópticos.

## 2.1 FUNDAMENTOS DE LA INTERFEROMETRÍA

---

Una onda electromagnética, como la luz, se compone de un campo eléctrico  $E$  y un campo magnético  $H$  mutuamente perpendiculares y periódicos cuya dirección de propagación es perpendicular a ambos campos. Para representar matemáticamente esta onda basta con especificar el valor instantáneo del campo eléctrico como función del tiempo. Si esta onda, representada en la Figura 1, tiene una amplitud  $A$ , una longitud de onda  $\lambda$  y una velocidad de propagación  $v$  entonces es posible escribir al campo eléctrico como:

$$E(x, t) = A \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) + \phi_0 \right], \quad (2.1)$$

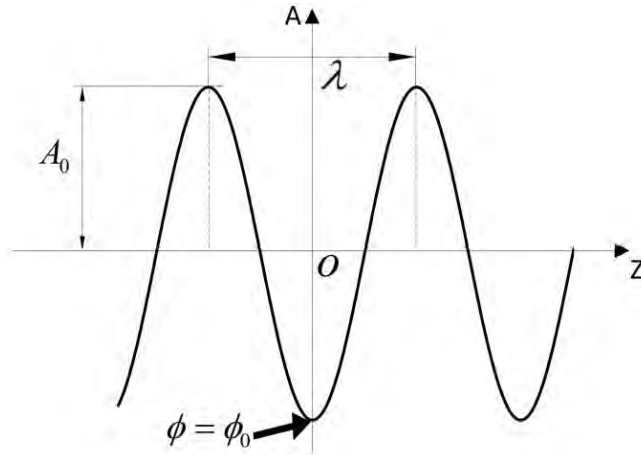
donde  $\phi_0$  es la fase de la onda para  $x = 0$  y  $t = 0$ .

Si  $\nu$  es la frecuencia de la onda, se puede relacionar con el periodo:

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad (2.2)$$

podemos vincular a la longitud de onda con la velocidad de la luz  $c$ :

$$\lambda = cT = c/\nu. \quad (2.3)$$



**Figura 1.** Parámetros de una onda.

Por otro lado, se define la magnitud  $|\vec{k}|$  del vector de propagación como:

$$k = |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.4)$$

y al índice de refracción  $n$  como:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (2.5)$$

donde  $v$  es la velocidad de propagación de la luz en un medio y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. Dado un material, el índice de refracción es función de la longitud de onda de la luz. En general, este índice aumenta al disminuir la longitud de onda. También se define a la velocidad angular  $\omega$  como:

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (2.6)$$

Utilizando estas relaciones, es posible escribir la ecuación (2.1) como:

$$E(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \phi). \quad (2.7)$$

La fase de la onda para un punto  $(x)$  en el instante  $t$  se define como:

$$\theta = kx - \omega t + \phi. \quad (2.8)$$

La ecuación (2.7) también puede ser escrita como [3]:

$$E(x, t) = \text{Re} \left\{ A e^{i(kx - \omega t + \phi)} \right\}, \quad (2.9)$$

donde  $\text{Re} \{ \}$  representa la parte real de la expresión e  $i = \sqrt{-1}$ . Esta representación tiene la ventaja de que el lado derecho se puede expresar como el producto de los factores que varían espacialmente y los que varían temporalmente.

Si suponemos que todas las operaciones en  $E$  son lineales, es más simple utilizar la forma compleja y tomar la parte real al final del resultado. Entonces es posible representar a una onda como:

$$E(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t + \phi)}. \quad (2.10)$$

De aquí, se puede calcular la amplitud mediante la expresión:

$$A^2 = EE^* = I. \quad (2.11)$$

El cuadrado de la amplitud es directamente proporcional al flujo de energía por unidad de tiempo y se define con el nombre de irradiancia.

Suponiendo ahora que dos ondas salen de la misma fuente luminosa y recorren caminos diferentes para después reunirse nuevamente en un punto. La fase de la interferencia puede definirse como:

$$\theta = kDCO, \quad (2.12)$$

de donde  $k$  está definido por la ecuación (2.4) y  $DCO$  es la diferencia de camino óptico entre los dos haces. Por lo tanto, la irradiancia en el punto de encuentro de las ondas quedaría dada por:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(kDCO), \quad (2.13)$$

donde  $I_1$  e  $I_2$  son las irradiancias de cada haz de manera independiente. Al término  $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(kDCO)$  se le conoce como término de interferencia. Otro parámetro importante en la señal de interferencia es la visibilidad que define el contraste en el patrón de interferencia, la cual se define por la ecuación [3]:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2.14)$$

donde  $I_{\max}$  corresponde al mayor valor en amplitud de la señal y análogamente  $I_{\min}$  al valor mínimo.

De la ecuación (2.13) se deduce que cuando  $kDCO = 2n\pi$  con  $(n=0,1,2,3,\dots)$  la intensidad resultante será igual a la suma de las dos intensidades individuales más el término de interferencia y será la máxima intensidad posible, en este caso las ondas tienen fases iguales; en este caso se dice que la interferencia es constructiva. La interferencia destructiva se presentará entonces cuando  $kDCO = (2n+1)\pi$  con  $(n=0,1,2,3,\dots)$ , cuando esto ocurre las ondas tienen fases opuestas, es decir, están desfasadas por media longitud de onda, el efecto será la cancelación de dichas ondas.

Existen dos métodos generales para producir interferencia: por división de frente de onda o por división de amplitud. Actualmente existen una amplia variedad de interferómetros, siendo más conocidos los de división de amplitud, en los que como su nombre lo indica, el haz original se

divide en dos haces de diferente amplitud sin disminuir la extensión del frente de onda. Entre estos tipos de interferómetros se encuentran el de Michelson, el tipo Mach-Zehnder, Sangac, el de Fabry-Perot, etc. En este trabajo nos centraremos en la descripción del Interferómetro de Fabry-Perot.

### 2.2.1 EL INTERFERÓMETRO DE FABRY-PEROT

El Interferómetro Fabry-Perot (FPI por sus siglas en inglés) fue propuesto en 1897 por Charles Fabry y sus colaboradores quienes buscaban realizar mediciones precisas de distancias muy pequeñas. Este arreglo fue llamado inicialmente por ellos como “etalon”, palabra que proviene del francés y significa “cálculo de medida” o “estándar”. Las propiedades únicas del dispositivo fueron apreciadas rápidamente y se comenzó a utilizar el arreglo para medir otros parámetros [5].

Debido a la alta resolución espectral de este interferómetro, el primer uso que se le dio fue para volver a medir las longitudes de onda del espectro solar y de algunas líneas de gases nobles [6]. También se utilizó para medir los efectos de viscosidad del aire, construir un voltímetro electrostático, estudiar el efecto Zeeman y medir el índice de refracción de gases.

El FPI consiste en dos espejos semitransparentes planos y paralelos separados por una distancia fija, como se muestra en la Figura 2. Una onda de luz monocromática que incide sobre un FPI a un ángulo arbitrario con respecto a la normal de las superficies, experimentará múltiples reflejos dentro de los espejos.

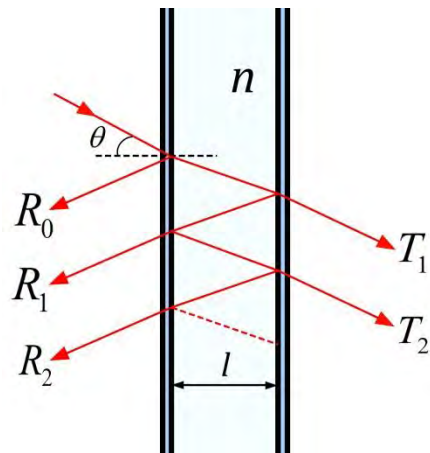
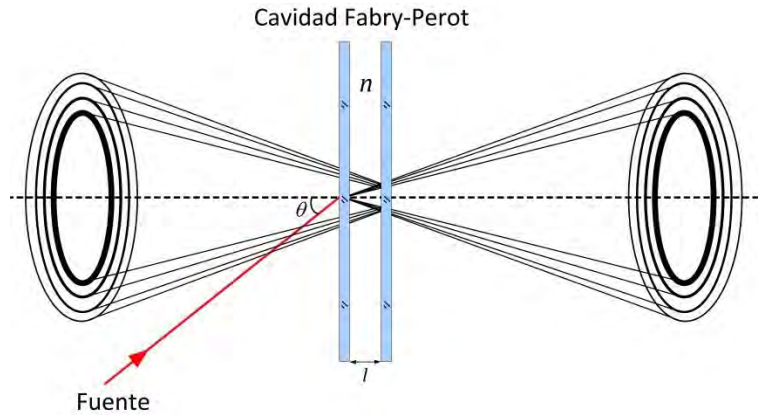


Figura 2. Cavidad Fabry-Perot.

La forma de la distribución de intensidad de los haces interferentes reflejados y transmitidos por el FPI, un conjunto de anillos concéntricos brillantes sobre un fondo oscuro para el caso de reflexión, es debido a la simetría circular del dispositivo como se puede observar en la Figura 3. El diámetro angular de estas franjas depende del espacio entre los espejos y de la longitud de onda de la fuente. Por lo tanto, la función básica de un FPI es transformar la longitud de onda en un desplazamiento angular.





**Figura 3.** Anillos formados por un FPI.

El FPI es una herramienta espectroscópica muy versátil y poderosa. La propiedad básica que distingue a este interferómetro de otros es su capacidad de trabajar con fuentes de alta y baja resolución. Esto gracias a la elevada precisión del interferómetro, ya que es posible determinar valores muy próximos de longitud de onda puesto que cada  $\lambda$  genera su propio sistema de anillos independiente.

Una de las aplicaciones más importante que se le da al FPI es para realizar espectroscopia de Fourier, la cual está fundamentada en la capacidad de obtener datos del espectro de una fuente a partir de un interferograma. En esto, el FPI es competitivo con el interferómetro de Michelson más comúnmente utilizado [3].

Actualmente, el FPI es uno de los arreglos más conocidos y utilizados en la rama de la óptica. Frecuentemente lo podemos encontrar en telecomunicaciones en multiplexación por división de longitud de onda [7], láseres [8] y filtrado de longitudes de onda [9].

## 2.2 APLICACIONES DE LOS INTERFERÓMETROS CONVENCIONALES

La que podría considerarse como la primera aplicación de un interferómetro es uno de los experimentos más famosos de la historia de la física, con el cual Michelson y Morley intentaron medir la velocidad de la Tierra en el supuesto éter. En dicho experimento, se encontró que la velocidad de la luz en el vacío es constante, independiente del observador, lo que es uno de los postulados de la Teoría de la Relatividad Especial de Albert Einstein.

Después de eso, este instrumento se ha utilizado para medir la longitud de onda de una fuente de luz, distancias pequeñas con alta precisión, índices de refracción de algunos medios y sustancias [1], etc. También se utilizan técnicas interferométricas para la detección de pequeñas fracturas en placas metálicas y otros materiales [10] y para determinar el módulo de Young de materiales como el hule látex [11].

Actualmente los interferómetros tienen múltiples aplicaciones en la medicina. La interferencia es el núcleo de muchos tipos de detección óptica en sistemas biológicos [12] y es una potente herramienta para el análisis de estructura celular en microscopía de interferencia [13] y en tomografía de coherencia óptica [14]. Para aplicaciones de biosensores, la sensibilidad inherente

de la interferometría permite la detección ultrasensible de moléculas en muestras biológicas para diagnósticos médicos [15].

### 2.3 INTERFERÓMETROS COMERCIALES

---

Actualmente, existen decenas de empresas que se dedican a construir y comercializar dispositivos que funcionan mediante el principio de interferometría. Algunos de estos dispositivos se utilizan para medir distancias a gran precisión y el sensado de algunas variables físicas como el índice de refracción de un medio [16].

También se utiliza esta técnica para analizar superficies. Esta técnica tiene numerosas ventajas sobre otras de medición de superficie. La interferometría tiene una sensibilidad muy alta a la topografía de la superficie, generalmente medida en nanómetros. Tampoco requiere contacto mecánico con la superficie bajo prueba. Por lo tanto, no hay riesgo de daño o deformación de la superficie, como a veces puede resultar del uso de placas de prueba o métodos de sonda de contacto. Además, los interferómetros pueden cubrir grandes áreas con alta resolución lateral, reuniendo cientos de miles de puntos de datos por medición. La resolución lateral está limitada solo por la difracción óptica y el número de píxeles en la cámara.

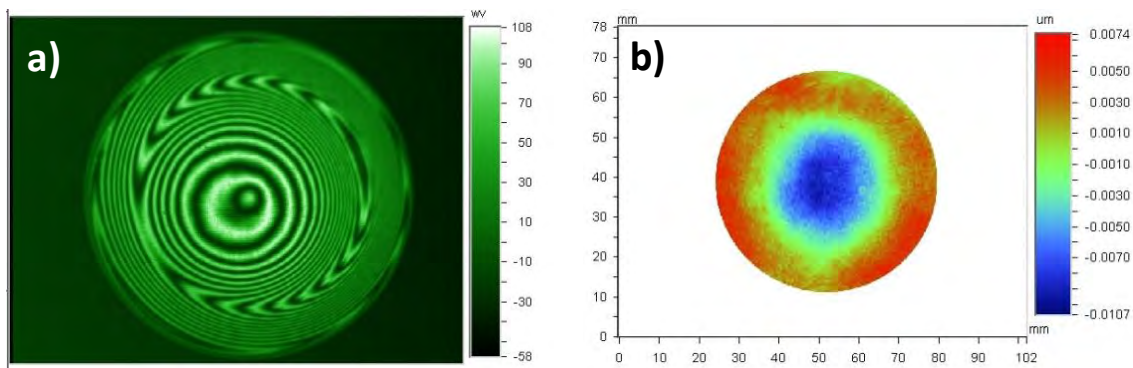
En el Centro de Investigaciones en Óptica existe un interferómetro láser Fizeau comercial *WYKO 6000* para analizar superficies, el cual se presenta en la Figura 4. Con este equipo se pueden analizar superficies planas y esféricas. Los únicos requerimientos que deben tener las superficies es ser especulares (que generen reflexión de la luz) y que la desviación entre sus rugosidades sea menor de los 5  $\mu\text{m}$ . Este es el único equipo certificado a nivel nacional para realizar la certificación y calibración en planicidad y paralelismo.



**Figura 4.** Interferómetro comercial Fizeau

En la Figura 5 se presentan dos mediciones tomadas con el sistema *WYKO* ubicado en CIO, en a) se observa un interferograma de una superficie plana con deformación esférica. Aquí se puede observar la distribución y deformación de los anillos de interferencia en el plano. En b) se presenta

el análisis en planicidad de otra superficie, en donde la zona azul representa el valle y en color rojo se ve la zona más alta en la cara del objeto analizado.



**Figura 5.** a) Interferograma y b) Análisis de superficie.

Estos sistemas son de gran resolución pero paradójicamente para su funcionamiento deben estar en ambientes altamente controlados en temperatura, alineación, vibración, etc.

La interferometría ha evolucionado a partir de instrumentos simples que producen imágenes estáticas de patrones de franjas para la interpretación manual a sistemas computarizados que digitalizan y analizan patrones de franjas estáticas a sofisticados instrumentos de medición de fase. Al capturar varios cuadros de datos de intensidad a medida que se modula el espaciado entre los elementos de referencia y prueba, los interferómetros de desplazamiento de fase calculan la fase en cada punto de la superficie, permitiendo un análisis de datos más preciso y una mayor resolución de medición [17].

Además, miles de interferómetros láser se instalan en todo el mundo y se utilizan a diario para proporcionar mediciones de producción precisas de componentes y conjuntos ópticos.

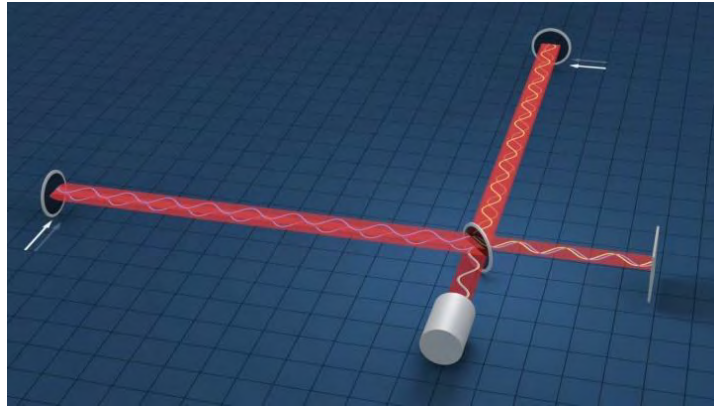
Son diversas las aplicaciones que se les dan a estos instrumentos y es una rama que no ha dejado de crecer, pues año con año se siguen publicando trabajos que le dan nuevos usos a esta técnica.

## 2.4 LAS NUEVAS APLICACIONES DE LA INTERFEROMETRÍA

Algunas de las nuevas aplicaciones de la interferometría son en la astrofísica. Éstos se han utilizado como medio para medir el diámetro de las estrellas más grandes, detectando pequeñas diferencias en el ángulo de incidencia, y poder observar así sus diferencias de brillo. Como los interferómetros modernos pueden medir ángulos extremadamente pequeños, se emplean también en este caso en estrellas gigantes cercanas para obtener imágenes de variaciones del brillo en la superficie de dichas estrellas. Recientemente ha sido posible, incluso, detectar la presencia de planetas fuera del Sistema Solar a través de la medición de pequeñas variaciones en la trayectoria de las estrellas. El principio del interferómetro se ha extendido a otras longitudes de onda y en la actualidad está generalizado su uso en radioastronomía [18].

Uno de sus usos más recientes y conocidos fue la detección de ondas gravitacionales, las cuales, son vibraciones en el espacio-tiempo producidas por fenómenos muy violentos como la

colisión de dos agujeros negros. Estas mediciones fueron reportadas el 14 de septiembre del 2015 en el *LIGO* (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) [19]. La instalación de este interferómetro consta de dos detectores láser con forma de *L* como se observa en la Figura 6, al final de estos brazos tiene espejos para reflejar la luz y combinar los rayos para crear un patrón de interferencia. Cada uno de los brazos mide aproximadamente de cuatro kilómetros de largo y están enterrados bajo tierra (para tener mediciones más precisas). La longitud de los brazos es particularmente importante porque cuanto más largos sean, más lejos pueden llevar el láser y el dispositivo será más sensible a vibración. Además, este interferómetro está conformado por cavidades Fabry-Perot (FP) en los brazos los cuales aumentan la sensibilidad del LIGO y aumenta la distancia que viaja cada láser de cuatro a 1,600 kilómetros.



**Figura 6.** Estructura del interferómetro de LIGO.

**3.**

**INTERFEROMETROS DE  
FIBRA ÓPTICA: EL  
ÉXITO COMERCIAL DEL  
FENÓMENO**

Al igual que los interferómetros clásicos de gran volumen, los interferómetros de fibra óptica siguen muchos principios físicos elementales. Aunque las fibras ópticas proporcionan muchas características únicas que mejoran enormemente las prestaciones del sistema interferométrico, algunas propiedades de la fibra óptica, como la birrefringencia, la dispersión y la dependencia de la temperatura, así como los efectos no lineales, siguen influyendo en el rendimiento final de un sistema de interferómetro de fibra.

Ha habido tres factores críticos que han sido fundamentales para el desarrollo de la tecnología de los interferómetros de fibra óptica. En primer lugar, fue la invención del láser la que proporcionó una fuente de luz de alta intensidad con fuertes propiedades de coherencia espacial y temporal. En segundo lugar, fueron los avances en la industria de la optoelectrónica los que facilitaron el desarrollo de detectores ópticos para realizar sofisticadas técnicas de detección de bajo nivel de ruido para registrar efectos de interferencia óptica con alta sensibilidad. Y finalmente, el desarrollo de fibras monomodo (SMF por sus siglas en inglés) de baja pérdida que hicieron posible confinar la luz en una guía de onda de fibra óptica flexible y lograr realizar interferómetros de fibra óptica compactos, de bajo costo, robustos y versátiles que de otra manera no serían prácticos con componentes de gran volumen. Dos de las principales contribuciones de la interferometría de fibra óptica han sido en sensores de fibra óptica y dispositivos de fibra óptica [20].

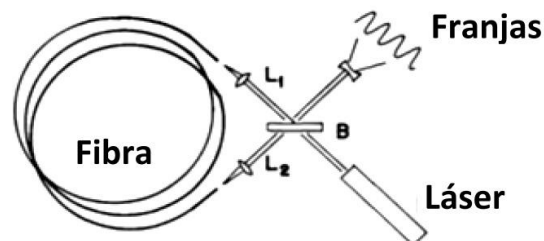
Una de las ventajas más importantes del uso de los interferómetros de fibra óptica son su rápida respuesta y su inmunidad a la interferencia electromagnética. Por lo tanto, cuando se diseña un nuevo sistema de interferómetro de fibra, es importante estudiar su rendimiento y se deben tener en cuenta las propiedades de la fibra. Los interferómetros de fibra ahora se emplean más comúnmente para mediciones industriales y aplicaciones de sensores.

### 3.1 LOS INTERFERÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA

---

Si bien el campo de la interferencia óptica se remonta a la segunda mitad del siglo XVII, la llegada de la tecnología de interferometría de fibra óptica es bastante reciente ya que surgió de los avances en la fibra óptica a fines de la década de 1970 y principios de la de 1980.

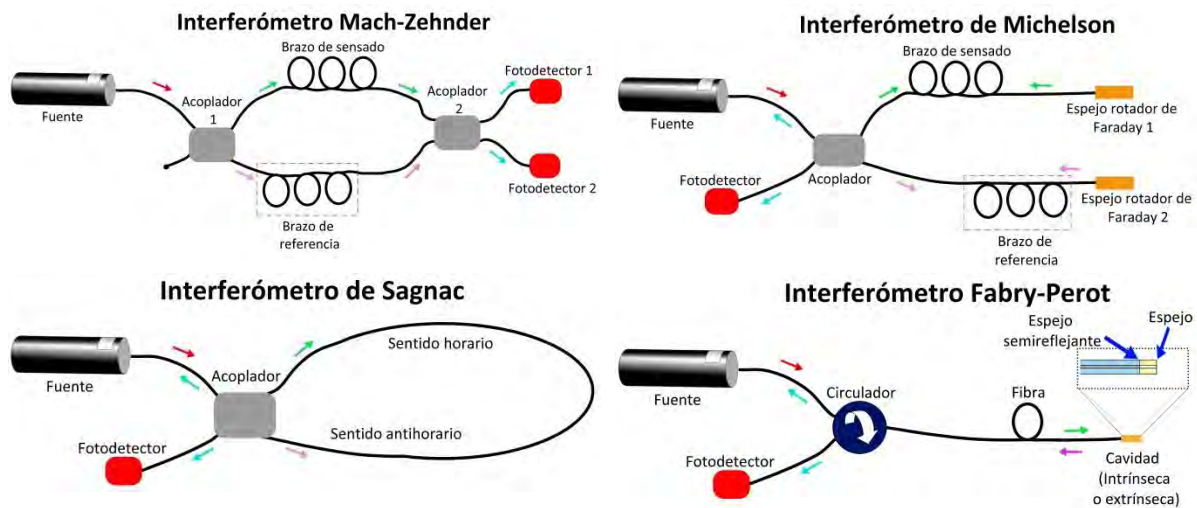
La primera vez que se integró una fibra óptica en un interferómetro fue en el año de 1976 por V. Vali y R. W. Shorthill [21]. Ellos demostraron que es posible construir un interferómetro de anillo (giroscopio) utilizando una fibra óptica monomodo funcionando como una guía de onda. Encontraron que esto es posible si la fibra óptica conserva un frente de onda bien definido y si la eficacia de acoplamiento de la luz en la fibra no es demasiado pequeña.



**Figura 7.** Primer interferómetro donde se utilizó una fibra óptica.

En este interferómetro, la luz láser, dividida por un divisor de haz, se enfocó en los extremos de la fibra. Después de atravesar la fibra y salir, el modo fundamental de la fibra única se convierte en un haz paralelo otra vez por la otra lente que también sirve como lente de enfoque para el haz que atraviesa la fibra en la dirección opuesta. Ambos haces se recombinan en el divisor de haz. Se encontró que ambas longitudes de trayectoria del haz son idénticas. Por lo tanto, moviendo un extremo de fibra axialmente uno cambia la longitud de trayectoria óptica de ambos haces en cantidades idénticas. Por lo tanto, nada cambia para el centro de los frentes de onda esféricos que emergen de los extremos de la fibra. La fibra monomodo utilizada en este experimento tenía 10m de longitud y estaba enrollada en un cilindro de 15 cm de diámetro. Con este experimento se observó que la sensibilidad del interferómetro mejoraba considerablemente al estar integrada la fibra óptica en el sistema. Este dispositivo tuvo aplicaciones para la navegación y para detectar velocidades angulares muy bajas.

Con los rápidos desarrollos de las tecnologías láser y de fibra óptica, la tecnología de interferometría óptica también tuvo un gran progreso y evolucionó de la óptica clásica de bulto a la fibra óptica. De acuerdo con sus arquitecturas, estos interferómetros de fibra se pueden clasificar en cuatro tipos dominantes, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 8. Éstos son los interferómetros de fibra Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac y Fabry-Perot.



**Figura 8.** Interferómetros de fibra óptica más comunes.

La estructura del interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica es relativamente simple y consta de dos acopladores que dividen la potencia óptica de entrada en dos partes iguales, que viaja por dos caminos diferentes, uno siendo el de referencia y el otro utilizado para el sentido. Es una ventaja si ambas fibras tienen la misma longitud. Esta condición no es necesaria, pero el contraste del patrón de interferencia será tan alto cuanto más iguales sean las longitudes de fibra [22]. En esta configuración, como se puede observar en el diagrama superior izquierda de la Figura 8, la luz incidente se divide en dos brazos mediante un acoplador de fibra y luego se recombinan mediante otro acoplador de fibra. La luz recombinada tiene el componente de interferencia según la diferencia de camino óptico entre los dos brazos. Para las aplicaciones de detección, el brazo de referencia se mantiene aislado de la variación externa y solo el brazo sensor está expuesto a la

variación. Entonces, la variación en el brazo de detección inducida por el cambio de alguna variable externa modifica la diferencia de camino óptico. De este modo, se puede detectar fácilmente mediante el análisis de la variación en la señal de interferencia. El patrón de interferencia es detectado por los dos fotodetectores para poder medir en uno la señal y en el otro la referencia [23]. Este interferómetro es comúnmente utilizado para medir temperatura [24], esfuerzo [25] e índice de refracción [26].

En el interferómetro de Michelson basado en fibra óptica, el acoplador divide la luz en dos trayectorias ópticas diferentes, véase el diagrama superior derecho en la Figura 8. La luz reflejada por los espejos se recombina en el acoplador para producir un patrón de interferencia en el fotodetector. Los sensores de fibra óptica basados en interferómetros Michelson son bastante similares a los interferómetros Mach-Zehnder. El concepto básico es la interferencia entre los haces en dos brazos, pero cada haz se refleja al final de cada brazo en un interferómetro de Michelson. De hecho, un Michelson es como la mitad de un Mach-Zehnder en configuración ya que utiliza solamente un acoplador y un fotodetector. La principal diferencia entre estos interferómetros son los reflectores. Por lo tanto, el método de fabricación y el principio de operación son casi los mismos en ambos interferómetros. La capacidad de multiplexación con conexión en paralelo de varios sensores es otro punto beneficioso de estos interferómetros [23]. En este dispositivo se utilizan espejos rotadores de Faraday para mantener el estado de polarización de los haces separados en la fibra. Estos cambios pueden imposibilitar la interferencia y se pueden deber a cambios aleatorios en temperatura, vibración o en la birrefringencia de la fibra. Este interferómetro tiene aplicaciones para el sensado de IR [27], velocidades de flujo [28], desplazamientos con alta resolución [29], entre otras.

En el interferómetro de Sagnac el haz ingresa al acoplador por una de las fibras de entrada como puede verse en el diagrama inferior izquierdo de la Figura 8. Luego, la luz se divide en dos partes con la misma intensidad y cada una de ellas se desplaza alrededor de la bobina de fibra óptica monomodo en direcciones opuestas. Finalmente, la salida de la bobina de Sagnac se dirige hacia un solo detector. Debido a esta configuración específica, el interferómetro de fibra Sagnac se ha utilizado principalmente para la detección de rotación. Esto se logra situando el dispositivo en una plataforma giratoria. Cuando la plataforma está girando, las líneas del patrón de interferencia son desplazadas en comparación con la posición del patrón de interferencia cuando la plataforma no gira. La cantidad de desplazamiento es proporcional a la velocidad angular de la plataforma giratoria. El efecto Sagnac hace que el espectro de interferencia dependa de la frecuencia angular de la configuración. La pérdida de intensidad en la fibra óptica y los criterios de empaquetado limitan la longitud total de la fibra y el radio de la bobina, respectivamente. Los interferómetros de fibra Sagnac también se pueden emplear para detectar fenómenos que varían con el tiempo [30].

En esta breve introducción a los interferómetros de fibra óptica se ha hablado de manera general sobre las versiones de dos brazos de los interferómetros Mach-Zehnder, Michelson y Sagnac. Pero no se puede dejar de mencionar que en la última década se han propuesto versiones de un solo brazo o una sola fibra óptica de los interferómetros Mach-Zehnder y Michelson, conocidos como interferómetros modales. En donde la interferencia no se produce por dos haces que viajan por dos trayectorias distintas, sino que se tiene una sola trayectoria por la que se



propagan dos o más modos, del núcleo o del núcleo y el revestimiento, que al final interfieren. Estos interferómetros son compactos y altamente estables. Sin embargo, su estructura y fabricación presenta algunas desventajas respecto de la de Fabry-Perot que también es una estructura de una sola fibra óptica.

El interferómetro Fabry-Perot es considerado el más simple ya que solo necesita de un acoplador (o un circulador) y un fotodetector. Esto es posible ya que la interferencia se produce en una cavidad al final de la fibra. El haz de luz de la fuente viaja por la fibra hacia el circulador, llega a la cavidad FP para producir la interferencia y luego regresa para ser interrogada por el fotodetector. Una cavidad FP generalmente se compone de dos superficies reflectoras paralelas separadas por una cierta distancia. La interferencia ocurre debido a las superposiciones múltiples de los haces reflejados y transmitidos en las superficies paralelas [23]. Algunas otras características de esta configuración y sus aplicaciones son presentadas en el capítulo 4 de este trabajo.

## 3.2 APLICACIONES DE LOS INTERFERÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA

---

Los avances en la tecnología de interferometría de fibra óptica pueden atribuirse a la utilización de este fenómeno para una amplia gama de aplicaciones comerciales e industriales, incluidos los sensores de tensión para el monitoreo estructural, imágenes médicas, medición de distancia o aplicaciones en las que se requiere de mediciones de alta precisión por nombrar algunos [31].

La tecnología de sensores de fibra óptica fue promocionada como un gran avance en los años 80 y principios de los 90. Aunque dio lugar a varias aplicaciones comerciales exitosas y su impacto en la investigación y las aplicaciones de ingeniería especializadas es inestimable, aún no ha logrado sustituir comercialmente a los sensores con otras configuraciones. La razón principal de esta falla es la dura competencia que ha enfrentado debido a la existencia de alternativas convencionales de bajo costo como sensores electrónicos, mecánicos o químicos. La industria de los sensores está muy fragmentada con varios sectores de mercado independientes donde cada uno tiene necesidades muy especializadas [32]. Aunque las tecnologías de fibra óptica podrían ofrecer mayor resolución y precisión, con frecuencia no se requieren tales sensibilidades altas para la mayoría de las aplicaciones comerciales.

Fue el fuerte crecimiento de la industria de las telecomunicaciones en la década de 1990 lo que alimentó la investigación y el desarrollo en tecnología de fibra óptica y condujo a la disponibilidad de componentes de fibra óptica menos costosos, eficientes y más sofisticados. Sin embargo, el costo de la tecnología del sensor de fibra óptica aún debe reducirse significativamente para ofrecer un incentivo convincente a la industria de sensores para la adopción de la tecnología más nueva.

Los precios de los componentes optoelectrónicos y de fibra óptica, como los diodos láser y las fibras monomodo, han experimentado un fuerte descenso de alrededor de cien veces en los últimos 30 años. Es probable que esta tendencia a la baja de los precios continúe a medida que la tecnología madure aún más, y esto puede abrir nuevas posibilidades para la tecnología de sensores de fibra óptica [33].

Los interferómetros de fibra óptica tienen múltiples aplicaciones en la ciencia y la tecnología gracias a su precisión y su alta sensibilidad. Éstos se pueden emplear para diseñar componentes ópticos para el procesamiento de señales en línea como filtros pasa banda en redes de comunicación óptica. También se pueden utilizar para detectar las propiedades lineales y no lineales en las fibras ópticas.

Como una de las aplicaciones más importantes, los interferómetros ópticos se utilizan para la detección de parámetros físicos desconocidos e incontrolados. Esto gracias a que las fibras ópticas son ligeras y se obtiene la información de detección directamente de la fibra.

Los interferómetros de fibra óptica se han convertido en los dispositivos adecuados para aplicaciones novedosas como monitoreo de tuberías de petróleo y gas, medición de distribución de temperatura en la profundidad del océano y sensores de intrusión [30].

También se han utilizado para realizar mediciones de voltaje y corriente dentro de sistemas de energía eléctrica y la monitorización de presión biomédica en cuerpos vivos.

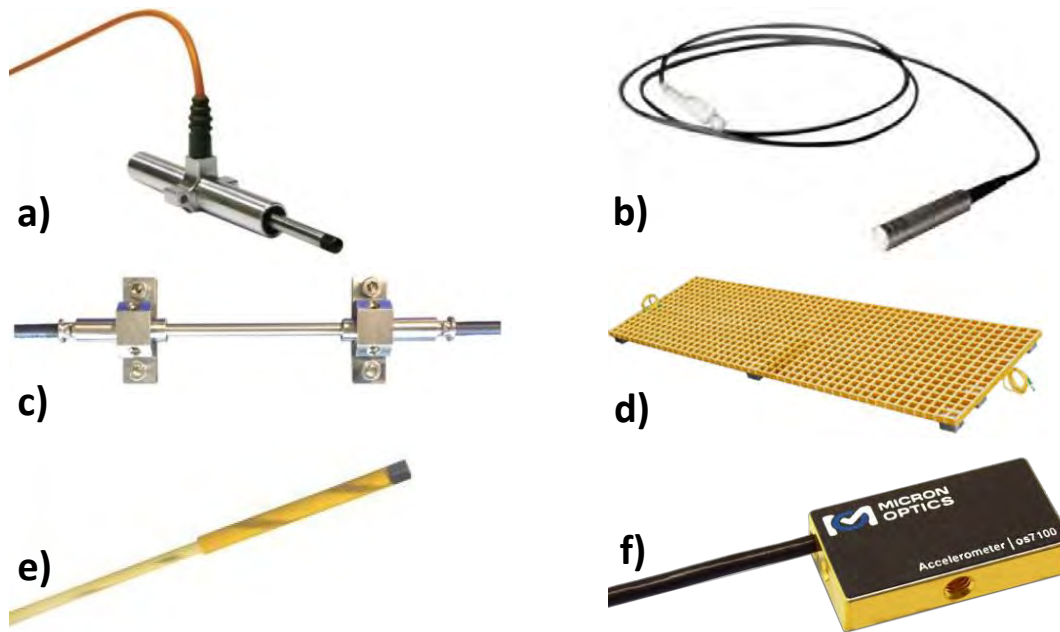
Otras de las variables físicas que se han medido con estos dispositivos han sido tensión, temperatura, índice de refracción, coeficientes de expansión térmica, humedad, etc.

### 3.3 INTERFERÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA COMERCIALES

---

Los interferómetros de fibra óptica nacen con un objetivo claro, simplificar o mejorar los instrumentos de medición basados en el fenómeno de interferencia óptica. La conjunción de la alta sensibilidad de los sistemas de medición que utilizan interferómetros y las propiedades únicas de las fibras ópticas, en referencia al tamaño y la inmunidad electromagnética, entre otras, ha dado como resultado una tecnología única dentro del campo de los sensores ópticos. Desde su descubrimiento los interferómetros de fibra óptica se han utilizado como elementos de medición o sensado en aplicaciones industriales y tecnológicas [21]. Esto ha llevado a que se desarrolle una industria importante que se dedica a la investigación, desarrollo e innovación de sensores basados en interferómetros de fibra óptica y por lo cual actualmente sea posible encontrar empresas que se dedican a comercializar estos dispositivos.

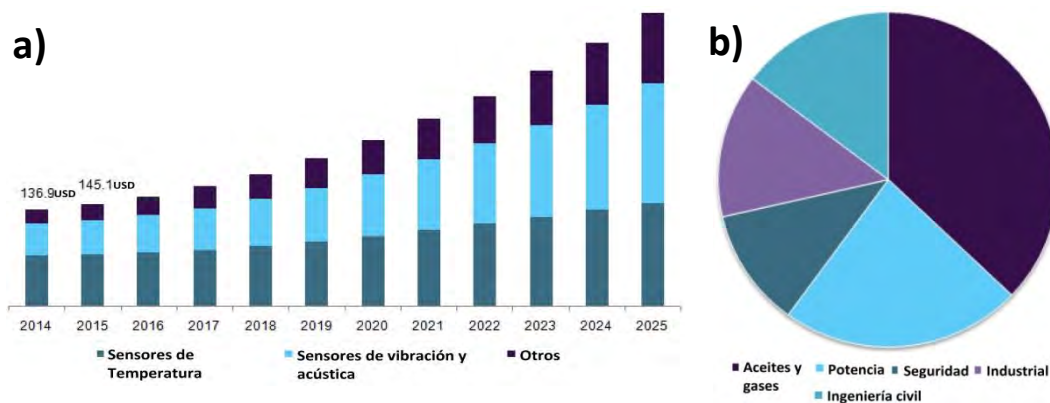
Uno de los usos comerciales más frecuentes es para medir algunas variables físicas como presión [34], temperatura [35], posición [36], esfuerzo [37], intrusión [38], etc. Algunos de los esquemas para medir estos parámetros se presentan en la Figura 9.



**Figura 9.** Interferómetros de fibra óptica comerciales: a) Posición (Altheris), b) Presión (Altheris), c) Esfuerzo (Micron Optics), d) Intrusión (Micron Optics), e) Temperatura (Altheris) y f) Aceleración (Micron Optics).

Las principales aplicaciones de estos sensores son para medir aceites y gases para la seguridad y la ingeniería civil e industrial. Sin duda es un mercado que no para de crecer, ya que las múltiples ventajas que presentan en comparación con los sensores fabricados con otras tecnologías han llevado a que sean remplazados por los sensores de fibra óptica.

El tamaño global del mercado del sensor de fibra óptica se valoró en 145.1 millones de dólares en 2015 y se espera que con los años siga en aumento, ver gráfico de la Figura 10. El mercado está impulsado principalmente por la creciente necesidad de crear instalaciones de monitoreo y sensado basadas en la tecnología óptica. La detección óptica está emergiendo como uno de los aspectos notables, en múltiples sectores comerciales, como la ingeniería civil y de energía, médica, automotriz, aeroespacial y manufacturera, etc.



**Figura 10.** a) Crecimiento del mercado de sensores de fibra en USA y b) Usos más frecuentes de sensores de fibra.

Algunos de los principales factores que impulsan el crecimiento de estos sensores son la dependencia de la tecnología de detección óptica en entornos desafiantes, el aumento de las aplicaciones en la industria petroquímica y la creciente demanda en los sectores de infraestructura de ingeniería civil y de transporte. Sin embargo, hay problemas que tienen que ver con aspectos mecánicos en la instalación de los sensores y que actúan como factores que limitan crecimiento del mercado [39].

### 3.4 LAS VENTAJAS DE LOS INTERFERÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA

---

A diferencia de los sistemas de medición que utilizan interferómetros de bulto, con los sensores interferométricos de fibra óptica es posible hacer detección in situ en el lugar de interés, ya que muchos de los sistemas son portátiles, compactos y livianos. Esto permite realizar mediciones de manera remota. Además, tienen otra serie de características atractivas como excelente sensibilidad, gran rango dinámico, de bajo costo y alta confiabilidad.

En general, las fibras ópticas están hechas con materiales dieléctricos que son químicamente inertes, biocompatibles e inmunes a la interferencia electromagnética. Las fibras ópticas hechas de sílice (vidrio) pueden soportar temperaturas relativamente altas gracias al alto coeficiente de dilatación pero además se pueden cubrir con materiales especialmente diseñados para estas condiciones. Estas propiedades los hacen adecuados para entornos hostiles y agresivos como en el interior de un sistema de generación y transmisión de electricidad en el que la fuerte interferencia electromagnética a menudo hacen que los sensores electrónicos convencionales funcionen de manera inestable y aumenten la tasa de fallas [40].

Otra característica importante es la flexibilidad para aplicaciones personalizadas. Por ejemplo, las fibras monomodo proporcionan una guía de onda óptica flexible y sin pérdidas para la transmisión, entrega y recolección de señales ópticas. Esto permite que se pueda usar una fibra flexible para guiar y medir la luz de los órganos internos del cuerpo mediante la integración de una fibra óptica con un endoscopio. También se pueden utilizar las propiedades de transmisión casi sin pérdidas de este tipo de fibra para operaciones de teledetección [41].

Una ventaja importante de estos dispositivos es la capacidad de multiplexación, esto permite su utilización en detecciones multipunto o cuasi-distribuidas [20].

Gracias a la tecnología de las fibras ópticas, las aplicaciones de los interferómetros ópticos se han expandido a áreas como las detecciones acústicas subacuáticas, las mediciones de voltaje y corriente dentro de sistemas de energía eléctrica y la construcción de biosensores para monitorización en cuerpos vivos [42].

**4.**

**INTERFERÓMETRO**

**FABRY-PEROT DE FIBRA**

**ÓPTICA: LA SIMPLICIDAD**

**ABSOLUTA**

En 1981, Douglas L. Frazen y Ernest M. Kim vincularon por primera vez las fibras ópticas a la configuración FP [43]. Luego, se utilizó la idea de implementar un FPI de fibra monomodo con los extremos de la fibra utilizándolos como espejos [44]. Después de esto, debido a las múltiples ventajas encontradas a los FFPI, como la inmunidad a la interferencia electromagnética, la capacidad de responder a una amplia variedad de parámetros, muy alta resolución, alta precisión y tamaño pequeño, se convirtió en un transductor ideal para muchas aplicaciones de detección.

A diferencia de otros sensores basados en interferometría de fibra (Match-Zehnder, Michelson y Sagnac), la configuración de Fabry-Perot utiliza pocos elementos (acopladores, controladores de polarización, filtros o moduladores) de fibra que puedan complicar el desarrollo del sensor.

Los sensores de fibra óptica basados en el interferómetro Fabry-Perot son en su gran mayoría más compactos y extremadamente sensibles a las perturbaciones que afectan la diferencia de trayectoria óptica entre dos espejos reflectantes. La región de detección puede ser muy compacta para ofrecer una supervisión multipunto gracias a que las franjas de interferencia, como resultado de reflejos múltiples del haz en la cavidad, son mucho más estrechas que las franjas normales de dos haces y se vuelven mucho más nítidas con el aumento de la reflectancia  $R$  [40].

Los FFPI han demostrado ser útiles para las mediciones de diversos parámetros físicos [45], químicos [46] y biológicos [47]. Es además el interferómetro que más variantes presenta. En la Tabla 1 se hace un recuento de algunas variantes de interferómetros Fabry-Perot que se han propuesto, las variables que son posibles medir con ellos y la aplicación que se les ha dado. Es importante resaltar que la estructura, de los FFPI mencionados en la tabla, sigue siendo bastante simple aunque algunos de los métodos de fabricación pueden ser un poco más complicados del que se propone y se demuestra en este trabajo.

**Tabla 1. Variantes de los FFPI y sus aplicaciones.**

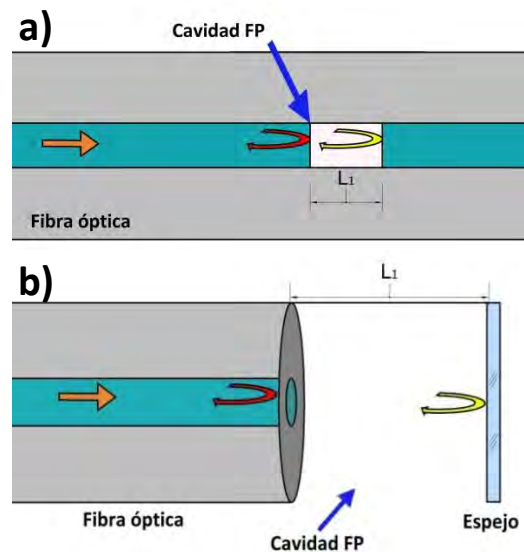
Estructura	Variables posibles a medir	Aplicación
Cavidad de aire [48]	Presión, temperatura, esfuerzo, vibración y aceleración	Monitoreo de estructuras y edificios
Tubo hueco que une la punta de la fibra con un diafragma [49]	Presión, aceleración e índices de refracción	Energía (Aceites, gases y electricidad)
Cavidad extrínseca con superficie reflejante [50]	Altas y bajas temperaturas	Aeroespacial (Aeronaves y motores)
Membrana de silicio micromecanizado adherida a una base de vidrio [51]	Presión	Biomedicina

#### 4.1 LA ESTRUCTURA BÁSICA DEL INTERFERÓMETRO FABRY-PEROT DE FIBRA ÓPTICA

Análogamente al FPI, el interferómetro Fabry-Perot de fibra consiste en dos reflectores ópticos con reflectancias  $R_1$  y  $R_2$  separadas una distancia  $L$ . Entre los reflectores se encuentra un medio óptico generalmente isotrópico y transparente con un índice de refracción  $n$ .

Hay varias formas de clasificar los sensores FFPI. En primer lugar, en términos de tipos de fibra, los FFPI más comunes utilizan fibra monomodo o multimodo, pero también existen reportes en las que se utilizan fibras microestructuradas [52] o estrechadas. Además de esta clasificación, los FFPI se dividen también en intrínsecos y extrínsecos [53], esta categorización es la más aceptada.

En un interferómetro Fabry-Perot de fibra intrínseco (IFFPI por sus siglas en inglés) los dos reflectores están separados por una longitud  $L$  de fibra monomodo, en este tipo de sensores la perturbación bajo estudio debe producir un cambio en la trayectoria óptica de la luz que se propaga en la propia fibra, en donde la trayectoria óptica se define como el producto del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica por la longitud física ( $L$ ) de la fibra entre los reflectores. En un interferómetro Fabry-Perot extrínseco de fibra (EFFPI por sus siglas en inglés), las dos superficies reflejantes están separados por un espacio de aire o por algún material sólido que no sea la fibra. En ambas configuraciones de FFPI, el patrón de interferencia se ve afectado por el cambio en la longitud óptica de la cavidad FP y, por lo tanto, se modulará en respuesta a cualquier perturbación externa [30]. En la Figura 11 se muestra una representación de un FFPI a) intrínseco y b) extrínseco. Como se puede ver en a) la estructura de la fibra óptica se modificó pero la luz permanece confinada dentro de la nueva estructura. En el caso de los sensores extrínsecos la luz sale de la fibra óptica y se propaga hasta que se refleja en una superficie externa a la fibra óptica. En ambos casos se realiza el mismo análisis y las ecuaciones resultantes son muy similares.



**Figura 11.** Interferómetros Fabry-Perot  
a) Intrínsecos y b) Extrínsecos.

En las últimas dos décadas se han hecho esfuerzos considerables en el desarrollo de FFPI intrínsecos para facilitar su manejo y evitar la pérdida de luz por difracción. Para esto se ha recurrido a diferentes tecnologías o procedimientos para generar las superficies reflejantes, por ejemplo, depositar una película delgada de un metal en la punta de una fibra óptica y después fusionar la fibra óptica con punta metalizada con otra fibra óptica de tal manera que se forme una cavidad dentro de la fibra óptica entre el espejo y el extremo de una de las fibras ópticas [54].

Una de las estructuras más utilizadas consiste en introducir un orificio de aire de unas cuantas micras de longitud como elemento reflectante. Esto porque suponiendo que la intensidad de la luz incidente es  $I$ , la reflexión de Fresnel entre el material de fibra y el aire da un reflejo de aproximadamente 4%, que es suficiente para formar un espejo de alto rendimiento. Por lo tanto, la transmisión será del 96% de la intensidad original. De esa luz transmitida el 4% se reflejará. Por lo tanto las dos señales que interfieren tiene prácticamente la misma intensidad y el patrón de interferencia generado va a tener la visibilidad más grande posible. Para lograr introducir la cavidad de aire se utilizan varios métodos, uno de los más simples, baratos y efectivos consiste en generar por medio de grabado químico un pequeño desbaste en la punta de la fibra óptica y después fusionarla a otra fibra [55]. Por otro lado, uno de los métodos más utilizando últimamente y más precisos, aunque de los más complicados y costosos, consiste en generar la cavidad de aire utilizando un láser de femtosegundo [56]. Otra alternativa simple y barata, si se dispone de la fibra especial, consiste en empalmar una sección corta de fibra óptica con núcleo hueco o una fibra de cristal fotónico entre las fibras ópticas estándar [52].

El interferómetro Fabry-Perot de fibra es compacto, estable, confiable y tiene una estructura muy simple, es extremadamente sensible a las perturbaciones externas que afectan la longitud y el índice de refracción  $n$  de la cavidad FP. Además, su interrogación es relativamente simple y tiene una rápida respuesta. Esto permite el desarrollo de sensores de alta resolución y versátiles en tiempo real. Algunos de los parámetros que se han medido exitosamente con los FFPI son temperatura [54], [57]–[60], esfuerzo [52], [61]–[63], índice de refracción (IR) [56], [64]–[67] y algunos otras variables como humedad [68], pH [69], etc.

## 4.2 LA ESTRUCTURA DEL FFPI ELEGIDA Y LAS RAZONES PARA ELLO

---

Algunos inconvenientes de algunas de las técnicas propuestas para fabricar FFPI [7], [52], [74]–[78], [55], [61], [62], [65], [70]–[73] son los múltiples y complicados pasos involucrados en el proceso de fabricación, imperfecciones de la superficie causado por la eliminación de material, baja resistencia mecánica, necesidad de programas especiales para empalmes, la necesidad de fibras ópticas especiales, implican el uso de nocivos materiales químicos, necesitan láseres costosos, etc.

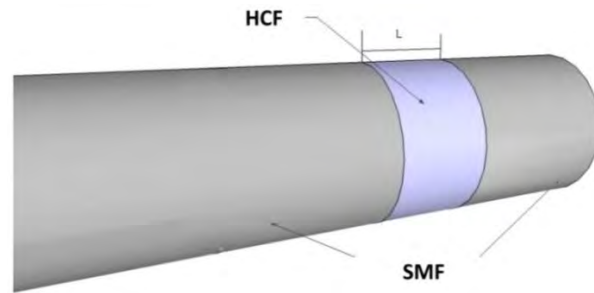
Una de las técnicas más simples para fabricar un FFPI se propuso en 2008 por Hae Young Choi [79] y consiste en construir por empalme de fusión una estructura de fibra óptica con una cavidad interna de aire, ya que es un método de bajo costo e introduce pocas pérdidas que puedan afectar la señal de reflexión. Este último, la poca pérdida en la señal a medir, es un aspecto muy importante porque al tener más señal se reduce la incertidumbre en las mediciones y esto favorece a tener mejores resultados y una mayor sensibilidad.

Entre todos los tipos de fibras ópticas, la SMF tiene la pérdida de transmisión más baja y también el costo más bajo, ya que esta es la más utilizada para las telecomunicaciones ópticas.

En este trabajo se construyeron FFPIs conformados por fibra monomodo estándar SMF y una cavidad de aire que se logra por la inclusión un trozo de longitud  $L$  de fibra de núcleo hueco (HCF por sus siglas en inglés). En la Figura 12 se muestra una representación de la estructura propuesta,



entre más pequeña sea la cavidad de aire, es decir, la sección de HCF, habrá menor pérdida de la luz y las superficies de las fibras monomodo funcionarán más como dos espejos de igual reflectividad, esto generará una señal de interferencia con la mayor amplitud de modulación.



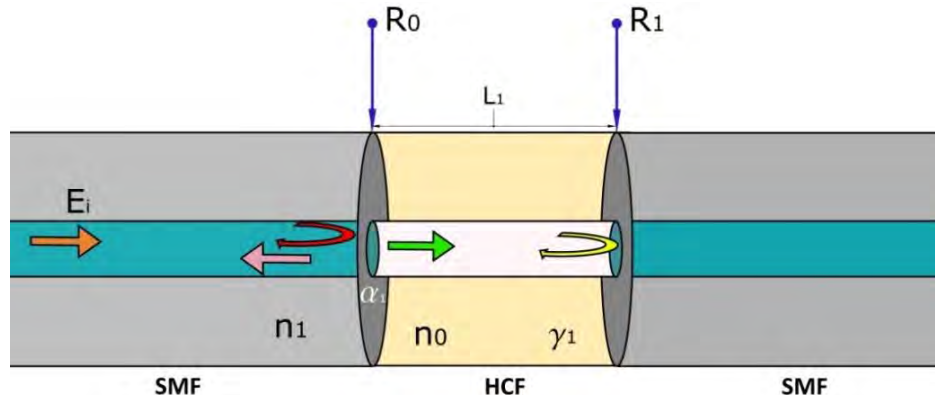
**Figura 12.** Estructura del FFPI.

Una de las ventajas más destacables de utilizar este esquema es que la SMF es de bajo costo, ya que un metro de este tipo de fibra óptica cuesta aproximadamente 0.5 USD (a junio de 2018). Un FFPI con esta configuración utiliza menos de 1m de fibra óptica. Por lo tanto, el costo de los materiales para construir este dispositivo es de menos de 1 USD (tomando en cuenta un conector y el trozo de HCF). Esto lo vuelve a su vez un sistema potencialmente comercial y accesible. Este es el dispositivo ideal si se van a usar para sensar en medios en los que ya no es posible recuperar los dispositivos o si se requiere utilizar varios dispositivos para medir una misma muestra para efectos de comparación del desempeño.

La versatilidad de este FFPI, se ha demostrado que pueden medir diferentes tipos de variables en cientos de aplicaciones diferentes [47], [68], [80]–[83], es otra de las cualidades sobresalientes que nos ha motivado en la elección de esta configuración.

#### 4.3 LA REFLECTANCIA TEÓRICA DE LA CONFIGURACIÓN FFPI ELEGIDO

Se estableció que una cavidad FP consta de dos superficies plano-paralelas semireflejantes, en la configuración que hemos elegido estas superficies son los extremos de la fibra óptica por la que se propaga la luz y la que se coloca en frente, separadas por una distancia  $L$  como se puede ver en la Figura 13.



**Figura 13.** Modelo de una cavidad FP.

La luz que se propaga por la fibra es parcialmente reflejada en la interface vidrio-aire, una porción de la luz se transmite y se propaga a través de la cavidad de aire. Ya que los medios son distintos el campo eléctrico del haz transmitido sufre un cambio de fase respecto del reflejado. En la segunda superficie aire-vidrio parte de la luz se refleja y el resto se transmite a través del núcleo de la segunda fibra óptica. La señal reflejada se propaga por la cavidad de aire, el campo adquiere otro cambio de fase adicional, y en la interfase aire-vidrio parte de la luz se transmite y se acopla al núcleo e interfiere con el primer haz reflejado. El resto de la luz se refleja. Este efecto se puede repetir varias veces dependiendo de la longitud de la cavidad, pero en este análisis solamente tomaremos en cuenta la interferencia entre los dos primeros haces. Las superficies de las fibras tienen reflectividades  $R_0$  y  $R_1$ , los cuales se pueden calcular mediante la ecuación de Fresnel:

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2, \quad (4.1)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción antes y después de cada superficie semireflejante. La porción de luz que se transmite, es decir la transmitividad está relacionada con la reflectividad de acuerdo a la siguiente relación:

$$R + T = 1. \quad (4.2)$$

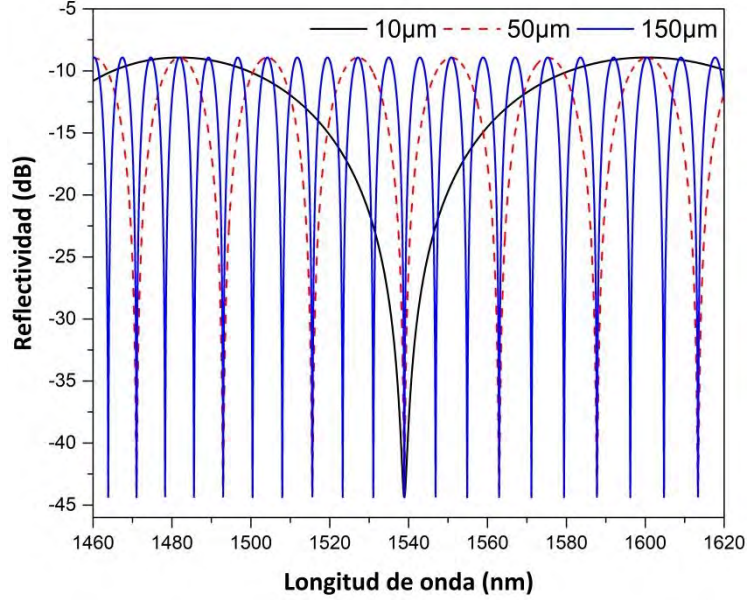
Es posible calcular el campo eléctrico reflejado en términos del incidente  $E_i$ . El modelo más simple es el de una cavidad, el cálculo para este caso se anexa en el Apéndice A. Para este caso la señal reflejada está dada por:

$$R = R_0 + (1 - \alpha_1)^2 (1 - \gamma_1)^2 (1 - R_0)^2 R_1 + 2(1 - \alpha_1)(1 - \gamma_1)(1 - R_0) \sqrt{R_0 R_1} \cos(2kn_0 L + \varphi), \quad (4.3)$$

donde  $k$  está definido por la ecuación (2.4),  $n_0$  es el índice de refracción de la cavidad,  $L$  es la longitud de la cavidad,  $\varphi$  es la fase inicial de la señal,  $\alpha_1$  es el factor de atenuación de intensidad en el la primer superficie semireflejante y  $\gamma_1$  es el factor de pérdida de transmisión en la cavidad. Por simplicidad se puede asumir que  $\alpha_1 = \gamma_1 = 0$ , entonces tendremos de la ecuación (4.3):

$$R = R_0 + (1 - R_0)^2 R_1 + 2(1 - R_0) \sqrt{R_0 R_1} \cos(2kn_0 L + \varphi). \quad (4.4)$$

La simulación del fenómeno descrito por la ecuación (4.4) para tres IFP de distintas longitudes de la cavidad se muestra en la Figura 14. Se puede observar que el aumento en la longitud de la cavidad produce una disminución en el periodo de la señal.



**Figura 14.** Espectro de reflexión de tres FFPI con variación en la longitud de sus cavidades.

El único parámetro que es posible cambiar en una cavidad Fabry-Perot fabricada es la longitud, estos cambios afectan la fase y esta modifica el patrón de interferencia. La longitud de la cavidad puede cambiar debido a un esfuerzo longitudinal, tanto de compresión como de tensión, aplicado sobre las SMF o también debido a cambios de temperatura. En estos cambios en la fase se pueden describir de la siguiente manera:

$$\Delta\theta = \frac{4\pi n}{\lambda} \Delta L, \quad (4.5)$$

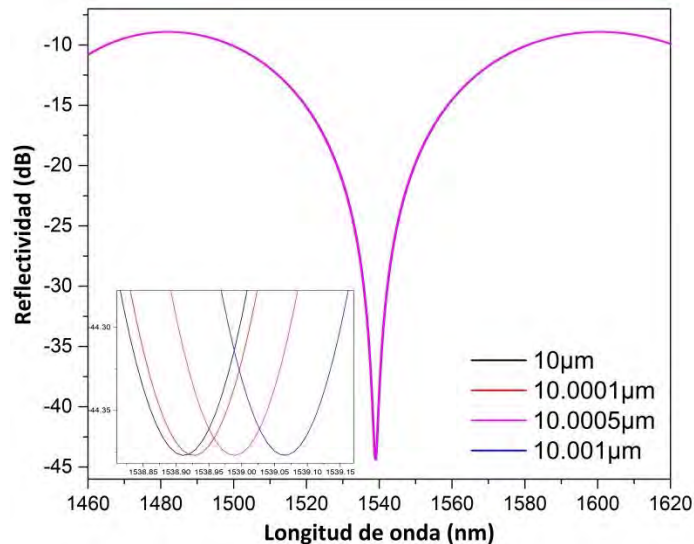
$$\Delta L = \delta L + \frac{dL}{dT}, \quad (4.6)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\delta L}{L} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}, \quad (4.7)$$

$$\Delta\theta = \frac{4\pi n L}{\lambda} \frac{\Delta L}{L} = \frac{4\pi n L}{\lambda} \left( \frac{\delta L}{L} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right). \quad (4.8)$$

Los cambios de fase debido a cambios en la longitud se pueden definir en función del esfuerzo  $(\varepsilon, \delta L/L)$  aplicado y a la temperatura, cambio que depende directamente del coeficiente de expansión térmica  $(cte, 1/L \cdot dL/dT)$  que en el vidrio de sílice es aproximadamente de  $0.55 \times 10^{-6}$  [84]. En condiciones normales, a temperatura ambiente, el cambio debido a la temperatura es despreciable y las variaciones en la fase del patrón de interferencia se pueden relacionar únicamente con el esfuerzo. En una cavidad Fabry-Perot con una longitud de cavidad dada, cuando se incrementa la longitud de la cavidad, la señal se desplaza hacia longitudes de onda mayores como se puede observar en las gráficas teóricas de la Figura 15. En una aplicación real la medición

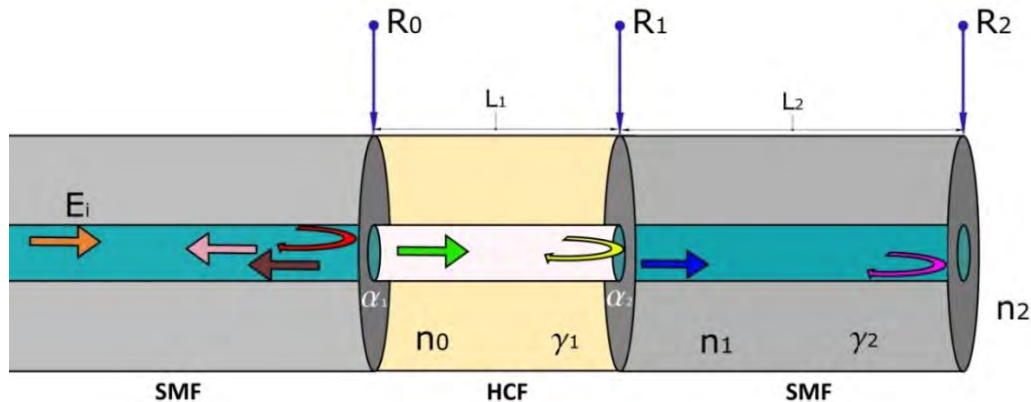
de estos desplazamientos está supeditada a la resolución del analizador de espectros ópticos (OSA, por sus siglas en inglés). La mínima resolución que puede alcanzar un OSA comercial es de 0.05 nm.



**Figura 15.** Variación de longitud en una cavidad de 10  $\mu\text{m}$ .

Una ventaja adicional del método que se propone para fabricar cavidades Fabry-Perot es que se pueden fabricar interferómetros híbridos con dos o más cavidades. Si se tienen dos cavidades como se muestra en el esquema de la Figura 16, la luz incidente  $E_i$  al llegar a la superficie  $R_0$  una parte se refleja (flecha roja) y el resto se transmite (flecha verde). La parte que se transmite viaja a través de la cavidad de longitud  $L_1$  y al llegar a la superficie  $R_1$  una porción de la luz se refleja (flecha amarilla) y el resto se transmite (flecha azul). Finalmente esta luz que se transmite recorre la cavidad de longitud  $L_2$  y al llegar a la superficie  $R_2$  se refleja (flecha rosa).

La señal total reflejada será entonces igual a la interferencia entre el haz reflejado por la primera superficie, con reflectividad  $R_0$ , y los haces reflejados por las dos superficies sucesivas, con reflectividades  $R_1$  y  $R_2$ . El cálculo para obtener la reflectividad se realiza de manera análoga para el sistema de una sola cavidad FP.



**Figura 16.** FFPI de dos cavidades.

La ecuación de este modelo se puede describir como:

$$\begin{aligned}
R &= R_0 + 2(1-\alpha_1)(1-\gamma_1)(1-R_0)\sqrt{R_0R_1} \cos(2kL_1n_0 + \varphi) + \dots \\
&2(1-\alpha_1)^2(1-\gamma_1)^2(1-\alpha_2)(1-\gamma_2)(1-R_1)(1-R_0)^2\sqrt{R_1R_2} \cos(2kL_2n_1 + \varphi) + \dots \\
&2(1-\alpha_1)(1-\gamma_1)(1-\alpha_2)(1-\gamma_2)(1-R_0)(1-R_1)\sqrt{R_0R_2} \cos(2k(L_1n_0 + L_2n_1) + \varphi) + \dots, (4.9) \\
&(1-\alpha_1)^2(1-\gamma_1)^2(1-\alpha_2)^2(1-\gamma_2)^2(1-R_0)^2(1-R_1)^2R_2 + \dots \\
&(1-\alpha_1)^2(1-\gamma_1)^2(1-R_0)^2R_1
\end{aligned}$$

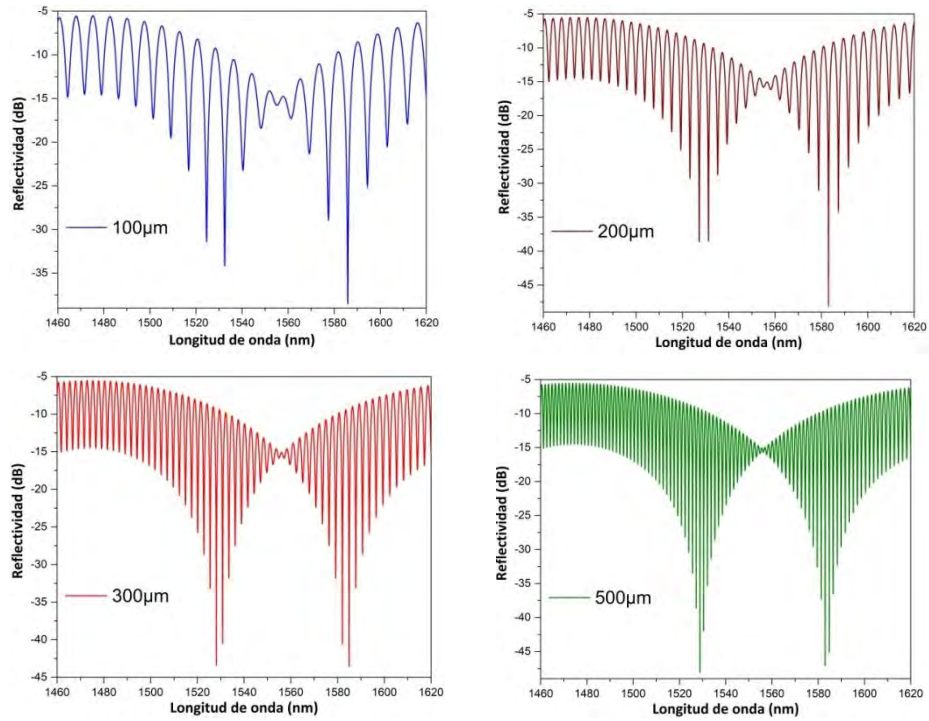
siendo  $L_2$  la longitud de la segunda cavidad,  $\alpha_2$  la atenuación de intensidad en la segunda superficie semirreflejante y  $\gamma_2$  el factor de pérdida de transmisión en la segunda cavidad.

Considerando  $\alpha_1 = \alpha_2 = \gamma_1 = \gamma_2 = 0$ , la ecuación (4.9) se puede escribir como:

$$\begin{aligned}
R &= R_0 + 2(1-R_0)\sqrt{R_0R_1} \cos(2kL_1n_0 + \varphi) + \dots \\
&2(1-R_1)(1-R_0)^2\sqrt{R_1R_2} \cos(2kL_2n_1 + \varphi) + \dots \\
&2(1-R_0)(1-R_1)\sqrt{R_0R_2} \cos(2k(L_1n_0 + L_2n_1) + \varphi) + \dots, \\
&(1-R_0)^2(1-R_1)^2R_2 + (1-R_0)^2R_1
\end{aligned} \tag{4.10}$$

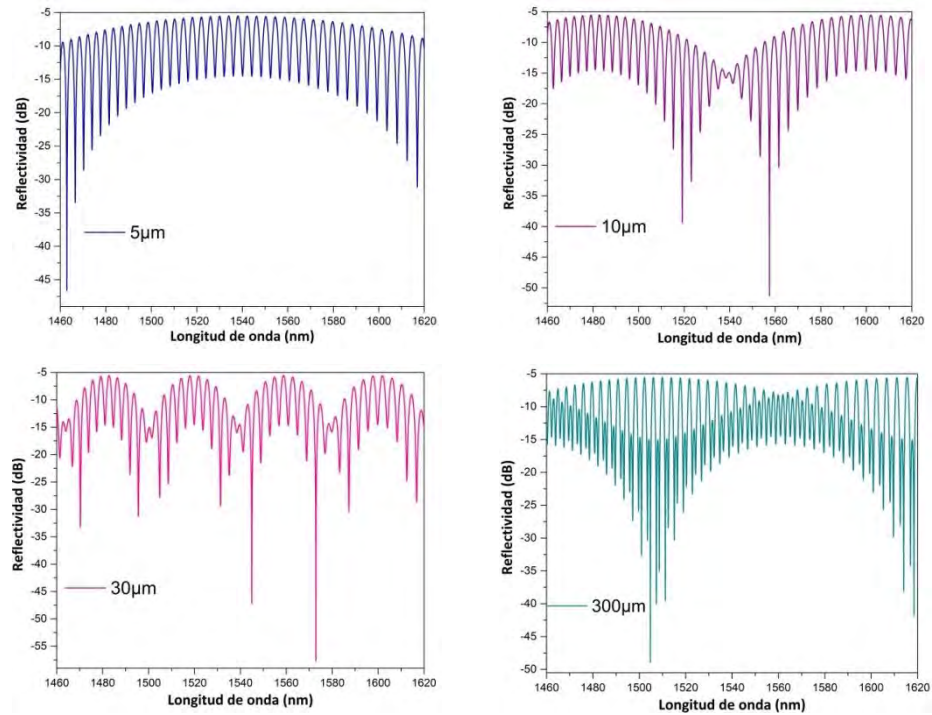
En esta ecuación se observan tres parámetros que contienen términos de interferencia, el primero corresponde a la señal que se transmite en la superficie  $R_0$ , recorre la cavidad  $L_1$ , y se refleja en  $R_1$ . El segundo término corresponde a la señal que se transmite por  $R_0$  y  $R_1$ , recorre la cavidad  $L_2$  y se refleja en  $R_2$ . Finalmente, el tercer término de interferencia representa a la señal que recorre ambas cavidades  $L_1$  y  $L_2$  y se refleja en  $R_2$ .

Se realizó la simulación para una cavidad del HCF de  $L_1=7 \mu\text{m}$  (se busca que sea lo más pequeña posible para que haya menos pérdidas y funcione solamente como un espejo) y una cavidad de SMF  $L_2=100, 200, 300$  y  $500 \mu\text{m}$ . Los espectros de reflexión se muestran en la Figura 17. En la simulación se observa una señal de periodo grande dado por la cavidad de HCF y dentro de él, la señal de periodo menor dado por la cavidad de SMF. Así mismo, conforme la cavidad  $L_2$  es más grande, se tiene un mayor número de periodos de la señal correspondiente.



**Figura 17.** FFPI de doble cavidad con  $L_1=7 \mu\text{m}$  a distintas  $L_2$ .

Así mismo, se realizó la simulación para FFPI híbridos manteniendo la longitud de la segunda cavidad  $L_2=200 \mu\text{m}$  y variando la longitud de la primer cavidad  $L_1=5, 10, 30$  y  $300 \mu\text{m}$ .



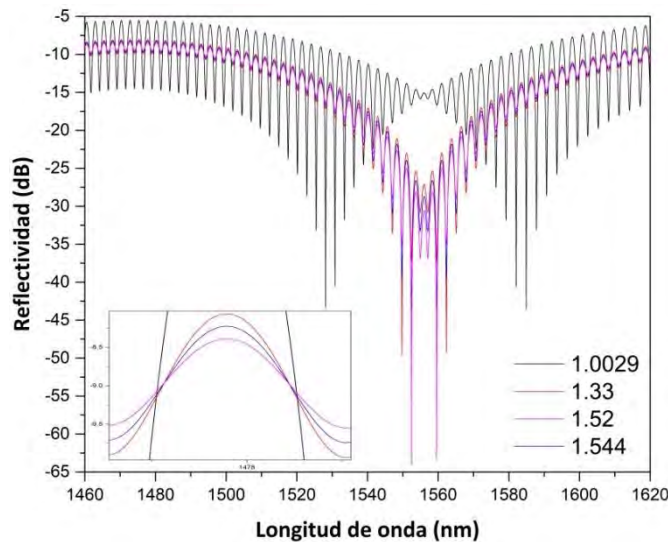
**Figura 18.** FFPI de doble cavidad con  $L_2=200 \mu\text{m}$  a distintas  $L_1$ .

Como se puede observar, la interpretación es más simple en los espectros de reflexión de la Figura 17 manteniendo la longitud de la primera cavidad constante. De este modo, se puede obtener información de cambios que ocurren en la superficie  $R_2$ .

Esta configuración en especial es interesante porque como se puede ver en la ecuación (4.10) la reflectividad  $R_2$  de la última superficie depende del índice de refracción del medio externo. Es decir:

$$R_2 = \left| \frac{n_f - n_{ext}}{n_f + n_{ext}} \right|^2. \quad (4.11)$$

Como  $R_2$  es solamente coeficiente en algunos términos de interferencia, es decir no es una variable que afecte la fase de ninguno de los términos de interferencia, su efecto se verá únicamente en la amplitud del patrón de interferencia. Para corroborar esto se varió el IR  $n_{ext}$  el cual le corresponde al medio que está en contacto la superficie  $R_2$  en la punta de la fibra. Al aumentar este valor, disminuye la visibilidad del patrón de interferencia correspondiente a la cavidad  $L_2$ . Al llegar a  $n_{ext}=n_1$ ,  $R_2$  es cero por lo que desaparece la reflexión correspondiente a la segunda cavidad y solo se observaría el espectro de reflexión de la primera cavidad. Para índices de refracción mayores que  $n_{ext}$  la amplitud de la señal iría en aumento conforme  $n_{ext}$  aumenta. En la Figura 19 se muestran los espectros de reflexión teóricos de un FFPI con dos cavidades con  $L_1=5.5 \mu\text{m}$  y  $L_2=248.7 \mu\text{m}$  y suponiendo que la fibra óptica está inmerso en diferentes fluidos con índice de refracción determinado. Se puede observar que no existe corrimiento en los espectros de reflexión, esto quiere decir que la fase no se modifica, el cambio más significativo ocurre en la amplitud de las franjas de interferencia. Este cambio en la amplitud de la señal que corresponde a la segunda cavidad se debe al cambio en la reflectividad  $R_2$  la cual está dada por la ecuación (4.11). Un cambio drástico en el patrón de interferencia se observa cuando el medio circundante a la fibra óptica pasa de aire ( $n_{ext}=1.0029$ ) a agua ( $n_{ext}=1.33$ ).



**Figura 19.** Variación teórica de  $n_2$  para distintos IRs.

Con esta configuración es posible medir cambios en el índice de refracción del medio externo para cualquier índice de refracción siempre y cuando  $n_2 \neq n_1$ .

#### 4.5 DISEÑO DE LA PLATAFORMA PARA FABRICAR LOS FFPI

---

A nuestro saber, en la actualidad solo se ha fabricado una plataforma semi-automatizada para la construcción de FFPI. En donde la cavidad de menor tamaño construida fue de  $\approx 10 \mu\text{m}$  [80]. En este trabajo demuestran que entre menos longitud tiene la cavidad, el dispositivo tiene más sensibilidad a esfuerzo y un mayor rango espectral libre. Con base en esto, para fabricar un FFPI con una longitud de cavidad específica es muy importante la alineación de la fibra óptica. Para construir cavidades FP generalmente se utiliza una cortadora, un microscopio para realizar la inspección del corte y una plataforma lineal micrométrica para controlar manualmente el desplazamiento de la fibra. Aunque actualmente existen plataformas micrométricas con precisiones alrededor de  $1 \mu\text{m}$ , existe error en este esquema debido a la alineación en el eje vertical y al control del movimiento de la plataforma de traslación se realiza manualmente y por consecuencia no es un proceso repetible ni exacto.

Por tal motivo, se diseñó y fabricó una plataforma portátil para la construcción de las cavidades FP en donde se tuviera la cortadora y las monturas de las fibras alineadas. Además, donde el control de movimiento de la fibra óptica fuera automatizado y se pudiera realizar la inspección del proceso desde un solo programa.

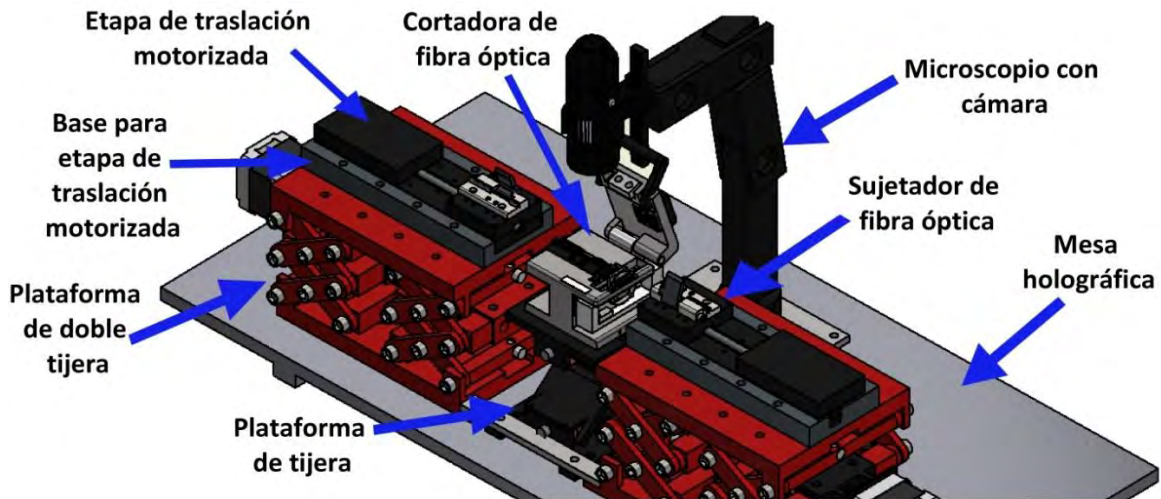
Se diseñaron y construyeron:

- Dos plataformas de doble tijera.
- Dos bases para la etapa de traslación motorizada.
- Dos sujetadores de fibra óptica.
- Una plataforma de tijera para la cortadora.
- Una mesa holográfica portátil para fijar las componentes.

Como sistema de traslación automatizado se utilizaron dos *Compact Motorized Translation Stage MTS50-Z8E, THORLABS*. Para el corte de la fibra óptica se utilizó una *Single Fiber Cleaver FC-6, SUMITOMO ELECTRIC*. Como sistema de inspección se utilizó un microscopio de *EDMUND OPTICS*, un dispositivo de carga acoplada (CCD por sus siglas en inglés) con una resolución de 640x480 pixeles.

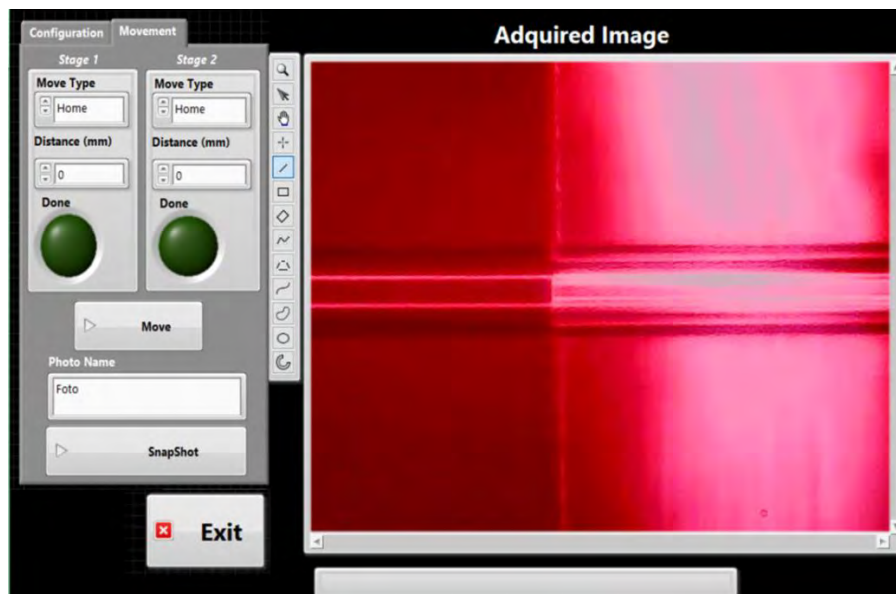
El esquema completo de la plataforma se presenta en la Figura 20.





**Figura 20.** Plataforma de fabricación de cavidades FP.

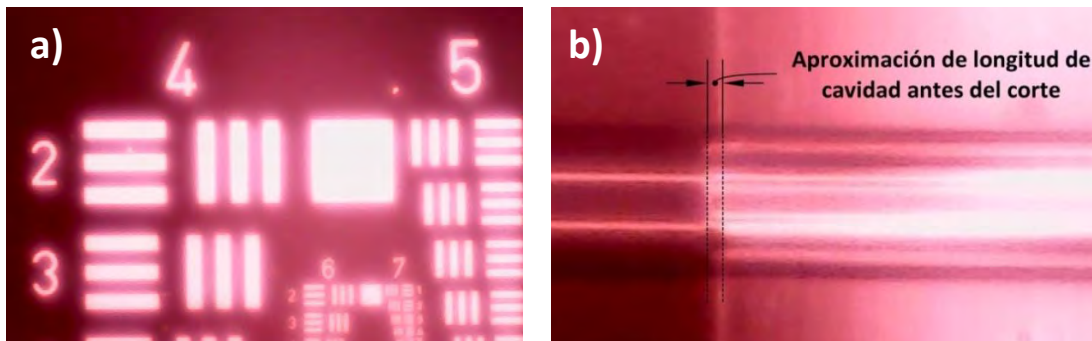
El control preciso de la posición de los dos *MTS50-Z8E* juega un papel muy importante en la repetitividad y exactitud de la longitud de las cavidades fabricadas, ya que sobre ellos se sujeta la fibra óptica y dependiendo de la posición del empalme, SMF y HCF, con respecto a la navaja de la cortadora sea la adecuada para producir la longitud de la cavidad deseada. Para esto, se diseñó un programa en *LABVIEW* para controlar de manera simultánea la posición de los sistemas de traslación y hacer la inspección de la alineación del empalme en la navaja de la cortadora de fibra óptica. Desde el programa es posible mover simultánea o independientemente los *MTS50-Z8E* con una resolución de paso mínimo de  $0.99 \mu\text{m}$ . Además, es posible guardar la imagen vista por la cámara. El panel de control principal del programa se muestra en la Figura 21.



**Figura 21.** Programa para el control de la plataforma.

Se hizo la caracterización de la imagen capturada por la cámara utilizando una tarjeta de resolución de *THORLABS* con la cual, podíamos conocer a partir de la imagen cuantos micrómetros

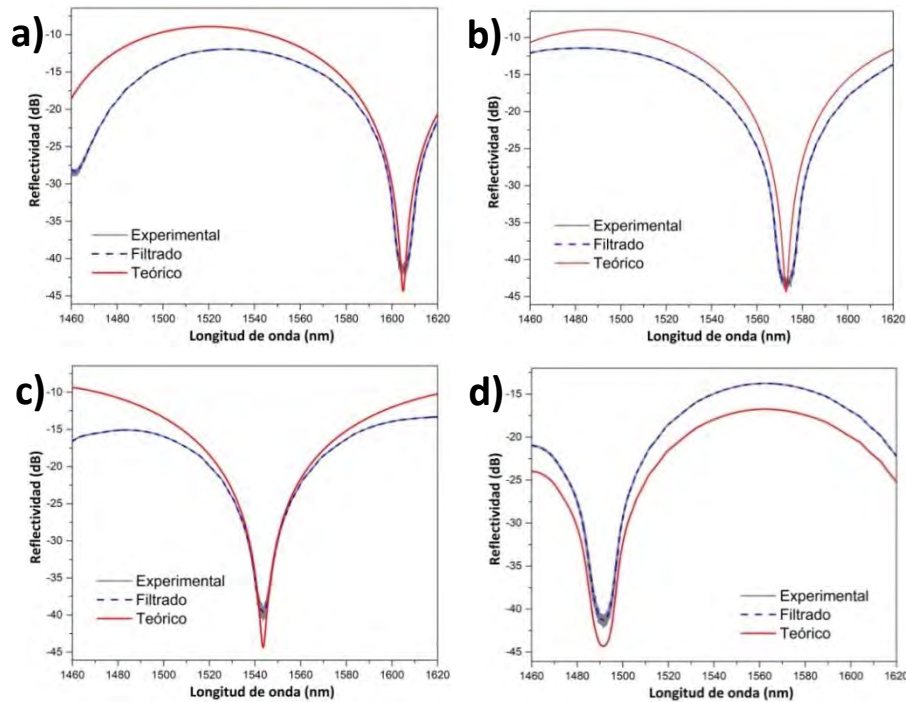
hay en cada pixel y así tener un valor aproximado de la longitud de la cavidad antes y después del corte.



**Figura 22.** a) Tarjeta de calibración y b) Empalme con respecto a navaja antes del corte.

Se fabricaron 12 cavidades con el menor tamaño posible, se hizo un análisis de la repetitividad en la longitud de la cavidad construida en la plataforma. Para conocer el tamaño exacto de la cavidad, ya que nuestro sistema óptico no tiene la resolución para determinar de manera precisa el tamaño se procedió a calcularlo. Para esto es necesario medir los espectros de reflexión (como se explica en el siguiente capítulo) de cada cavidad. Ya que las cavidades son muy pequeñas y el ancho de banda de la fuente es limitada a 140 nm, en los espectros de reflexión no es posible observar ni un periodo completo, esto complica el cálculo de la longitud de la cavidad. Se utilizaron dos métodos para calcular el tamaño de cada cavidad, en uno de ellos se recurre a hacer una transformación del espectro de reflexión utilizando la Transformada de Fourier (el cual se describe en el siguiente capítulo).

En el segundo método se utiliza la ecuación (4.4) asumiendo ciertos valores para las variables de la ecuación, se comparan los espectros de reflexión teórico y experimental y se varía la longitud hasta que las posiciones de los mínimos correspondan. El procedimiento se puede describir de la siguiente manera: primero se grafica el espectro de reflexión medido. Luego, se filtra para eliminar el ruido y poder seguir con mayor precisión los mínimos de la señal. Después, se hacía la simulación para el FFPI de una sola cavidad, y se buscaba la longitud de la cavidad en donde el espectro experimental y el teórico coincidieran. Este desarrollo se presenta en la Figura 23 para cuatro dispositivos diferentes con longitudes a)  $7.22 \mu\text{m}$ , b)  $7.0755 \mu\text{m}$ , c)  $5.401 \mu\text{m}$  y d)  $7.455 \mu\text{m}$ .



**Figura 23.** Comparación de espectros experimentales y teóricos.

Los valores obtenidos con ambos métodos se presentan en la Tabla 2. Se puede observar que algunos valores calculados difieren de un procedimiento a otro hasta  $2 \mu\text{m}$ . Esta variación se puede presentar debido al ruido de la señal adquirida en el método de la Transformada de Fourier. De aquí, que los valores más confiables son los conseguidos en la comparación teórica y experimental de la señal de interferencia, en donde se obtuvo que la cavidad más pequeña es de  $4.92 \mu\text{m}$ .

**Tabla 2. Longitudes de los FFPI calculado por dos métodos.**

No. Cavidad	Longitud de la cavidad ( $\mu\text{m}$ ) Transformada Inversa de Fourier	Longitud de la cavidad ( $\mu\text{m}$ ) Comparación teórica- experimental
1	6.766891	4.92
2	5.075168	5
3	5.639076	5.1
4	7.330799	5.178
5	6.766	5.401
6	5.639076	5.429
7	6.766891	6.452
8	6.766891	6.483
9	6.766891	7.0755
10	6.766	7.22
11	7.330799	7.396
12	7.894706	7.455
<b>Promedio</b>	<b>6.625766</b>	<b>6.092458</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.7649216</b>	<b>0.973947</b>
<b>Coefficiente de desviación</b>	<b>12.103%</b>	<b>16.696%</b>

Estos valores representan una repetitividad muy aceptable en la fabricación de cavidades FP en la plataforma con una baja desviación estándar entre ellos, tomando en cuenta que se probaron cavidades con longitudes muy pequeñas. En nuestro conocimiento, había sido posible lograr este tamaño de cavidad, utilizando el empalme de fusión, solamente en otro trabajo [85]. Otro de los métodos que se ha utilizado para construir este tipo de cavidades es mediante el micromaquinado usando láser de femtosegundo en la fibra [56], [66], [86], que es una técnica complicada y costosa a comparación del empalme por fusión.

#### 4.6 CONCLUSIONES

---

Se estudiaron los diferentes esquemas que existen para los FFPI. Además, se analizaron las ventajas de su construcción por empalme de fusión, la cual, fue el método elegido en este trabajo. Posteriormente, se hizo el análisis teórico de la señal de interferencia para esta configuración con una y dos cavidades. Se variaron los parámetros como longitud de la cavidad e IR externo y se hizo un análisis de cada comportamiento del espectro de reflexión.

Se presentó el diseño y la construcción de una plataforma semi-automática para fabricar FFPI. Así como sus componentes y la explicación de su control de monitoreo. Con este mecanismo, se construyeron 12 cavidades de la menor longitud posible, se analizaron sus espectros por dos métodos distintos. De aquí, se encontró que con este sistema es posible fabricar cavidades de hasta  $5\mu\text{m}$  con una variación de  $\approx\pm 0.97\mu\text{m}$ . El contar con un sistema que permita hacer cavidades de las dimensiones deseadas puede resultar muy útil pues permite diseñar y construir cavidades con las cualidades óptimas para sensar, es decir permite tener sensores con alta sensibilidad, las pérdidas de la señal más bajas posibles y el rango espectral libre deseado.

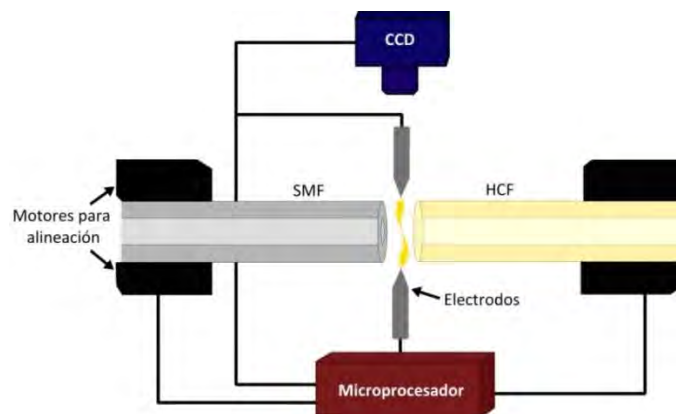
**5.**

**INTERFERÓMETRO DE  
FIBRA ÓPTICA HECHO EN  
EL CIO**

Utilizando la plataforma diseñada y construida en CIO, fue posible fabricar cavidades de manera rápida, fácil, repetible, con buena precisión en cuanto a la longitud deseada. El contar con esta plataforma nos permite diseñar y proponer un número ilimitado de esquemas de FFPI. Esto representa una gran ventaja, porque para proponer un dispositivo sensor es indispensable tener la capacidad de fabricarlo de manera repetida las veces que sea necesario para procesos de verificación y una vez que esto sea satisfecho la comercialización. En este capítulo se presenta una descripción del proceso de fabricación y un resumen de los resultados obtenidos de la caracterización de algunos de los dispositivos. Considerando el análisis del estudio teórico y los resultados de la caracterización se diseñaron dos estructuras y se construyeron tres sensores: Índice de refracción, temperatura, e índice de refracción y temperatura de manera simultánea.

## 5.1 FABRICACIÓN DE LOS IFP

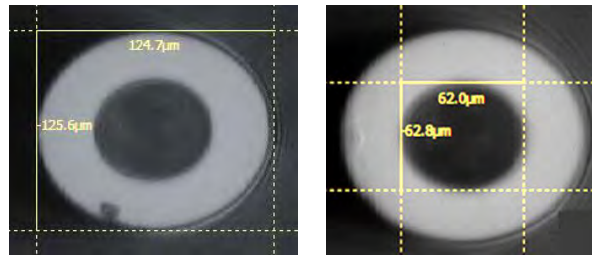
Para la fabricación de una cavidad FP primero se realiza un empalme por fusión, el cual es un proceso permanente, de baja pérdida y de alta resistencia mecánica en que se unen dos fibras. La pérdida óptica y la reflectancia de un empalme de fusión son típicamente mucho más bajas que las tecnologías alternativas de conexión de fibra óptica. Los empalmes de fusión de fibra óptica son muy estables por lo que su alineación, y por lo tanto su transmisión óptica, no cambia con el tiempo o con la temperatura. Los empalmes de fusión de fibra óptica pueden resistir temperaturas extremadamente altas o densidades de potencia óptica extremadamente altas. Además, los empalmes de fusión no permiten que el polvo de los contaminantes se introduzca en la trayectoria óptica [87]. Las empalmadoras de fusión modernas se componen de cámaras CCD (para monitorear la alineación y el proceso) y un microprocesador para alinear la fibra y estimar su pérdida. En la Figura 24 se presenta el esquema de este proceso. Para este proceso se utilizó una empalmadora *S123C FUSION SPLICER, FURUKAWA ELECTRIC CO*. Es importante mencionar que se debe utilizar una potencia de fusión menor a la de un empalme de dos fibras SMF para evitar que se colapse el HCF.



**Figura 24.** Empalme por fusión.

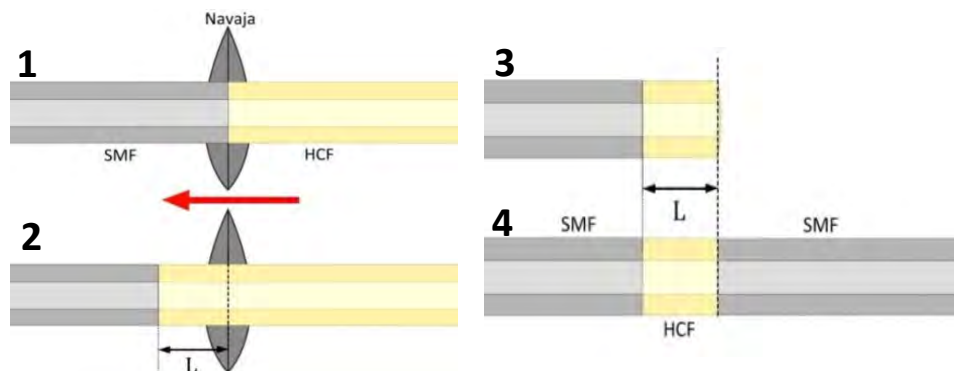
El empalme se realizó entre una fibra *SMF28E, FIBER INSTRUMENT SALES* y un HCF fabricado en el CIO, el cual es de igual diámetro exterior que la SMF. En la Figura 25 se muestra una

fotografía de la sección transversal de la HCF, en donde se especifican el diámetro interno y externo.



**Figura 25.** Fotografía transversal del HCF.

Posteriormente, se coloca el empalme en la plataforma y se alinea con respecto a la navaja de la cortadora, como se representa en el esquema 1 de la Figura 26, utilizando el sistema de inspección. Luego, utilizando las etapas de traslación motorizada se desplaza la fibra óptica hasta colocar el empalme a la distancia que se quiere la cavidad con respecto a la navaja (esquema 2). Una vez posicionado se retira el sistema de inspección visual, asegura la fibra óptica y se hace el corte (esquema 3). Para completar el proceso se cierra la cavidad fusionando el extremo libre de la HCF con otra fibra óptica, en este caso se utilizó otra SMF (esquema 4).



**Figura 26.** Alineación de empalme y corte de cavidad.

Se construyeron cavidades de distintas longitudes para probar la efectividad de la plataforma. Algunas de estas cavidades se muestran en la Figura 27. En la imagen superior se muestra una cavidad de  $\approx 18 \mu\text{m}$ , en la siguiente la longitud es  $\approx 61 \mu\text{m}$  y en la última se tiene una cavidad de  $\approx 106 \mu\text{m}$  de longitud. Estas fotografías fueron tomadas de la cámara de la empalmadora de fusión.



**Figura 27.** Cavidades de distintas longitudes.

## 5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS IFPF

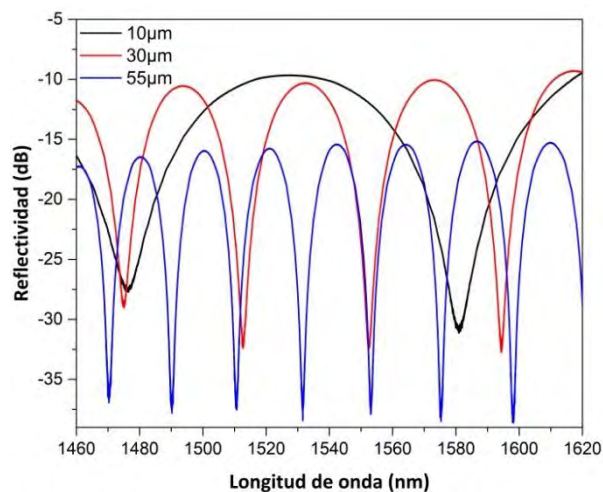
El proceso de caracterización de un dispositivo de fibra óptica es la etapa última de la fabricación, que consiste en obtener la respuesta óptica del dispositivo. Para este proceso uno de los arreglos experimentales que más se utilizan consta de una fuente de luz de amplio espectro, como se analiza la reflexión del dispositivo se requiere de un acoplador o de un circulador y finalmente un analizador de espectros ópticos. Aunque ahora se tiene a disposición sistemas de interrogación de Rejillas de Bragg que se pueden utilizar para obtener el espectro de reflexión de un dispositivo de fibra óptica, como las cavidades Fabry-Perot.

En este trabajo los espectros se obtuvieron con el interrogador *OPTICAL SENSING INSTRUMENT SI255* de *MICRON OPTICS*, el cual es un dispositivo que consta de un láser sintonizable que emite de 1460 a 1620 nm con un paso de 8 pm y de un medidor de potencia sintonizado con el láser. Este dispositivo está equipado para conectarse directamente a la PC y medir la señal. El esquema se muestra en la Figura 28.



**Figura 28.** Interrogación de cavidades FP.

Con este arreglo se midieron los espectros de reflexión de los FFPI, los cuales se presentan en la Figura 29. Estas señales tienen un número de puntos de 20000. Aquí se pueden observar las variaciones en la señal dependiendo de la longitud de la cavidad.



**Figura 29.** Espectros de reflexión a distintas longitudes de cavidades FP.



Dados los espectros de reflexión en la Figura 29, se calcularon las longitudes de las cavidades de dos métodos, el primero utilizando la ecuación:

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n(\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (5.1)$$

donde  $n$  es el índice de refracción de la cavidad, y  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  corresponden a dos máximos o dos mínimos consecutivos del espectro de reflexión. Es importante mencionar que esta ecuación se puede utilizar solamente en el caso que se tenga al menos un periodo completo.

También se calculó las longitudes de las cavidades por medio de la Transformada Inversa de Fourier (IFT por sus siglas en inglés):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (5.2)$$

Para ello, se requiere tener la señal en términos de la frecuencia. Se parte para este análisis considerando únicamente el argumento del coseno de la ecuación de interferencia (2.13):

$$2knL = \frac{2\pi}{\lambda} DCO. \quad (5.3)$$

Además, se sabe que:

$$t_0 = \frac{DCO}{c}. \quad (5.4)$$

Sustituyendo (5.4) en (5.3):

$$2knL = \frac{2\pi c}{\lambda} t_0. \quad (5.5)$$

De la ecuación (2.3), encontramos que:

$$\lambda = \frac{v}{f}. \quad (5.6)$$

Aplicando (5.6) en (5.5) se obtiene que:

$$2knL = \frac{2\pi cf}{v} t_0. \quad (5.7)$$

Para pasar a términos de la frecuencia angular, se sustituye la ecuación (2.6) en (5.7), resultando:

$$2knL = \frac{\omega c}{v} t_0. \quad (5.8)$$

Luego, se sustituye la relación (2.5) en (5.8):

$$2knL = \omega nt_0. \quad (5.9)$$

Sustituyendo (5.9) en la ecuación (2.13):

$$R(\omega) = R_0 + R_1 + \sqrt{R_0 R_1} \cos(\omega nt_0). \quad (5.10)$$

Calculando la IFT de (5.10) con (5.2):

$$R(t) = F^{-1}\{R(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \left[ (R_0 + R_1) \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\omega + \sqrt{R_0 R_1} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega nt_0) e^{j\omega t} d\omega \right]. \quad (5.11)$$

Sustituyendo la identidad  $\cos(\omega nt_0) = \frac{e^{j\omega nt_0} + e^{-j\omega nt_0}}{2}$  en (5.11):

$$R(t) = \frac{1}{2\pi} \left[ (R_0 + R_1) \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\omega + \frac{1}{2} \sqrt{R_0 R_1} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (e^{j\omega(t+t_0)} + e^{j\omega(t-t_0)}) d\omega \right\} \right]. \quad (5.12)$$

De las propiedades de la Función Delta se sabe que:

$$\delta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\omega. \quad (5.13)$$

Finalmente, utilizando (5.13) en (5.12) se obtiene que:

$$R(t) = \frac{1}{2\pi} \left[ (R_0 + R_1) \delta(t) + \frac{1}{2} \sqrt{R_0 R_1} \{ \delta(t+t_0) + \delta(t-t_0) \} \right]. \quad (5.14)$$

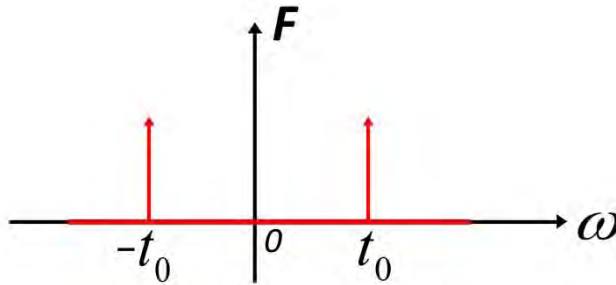


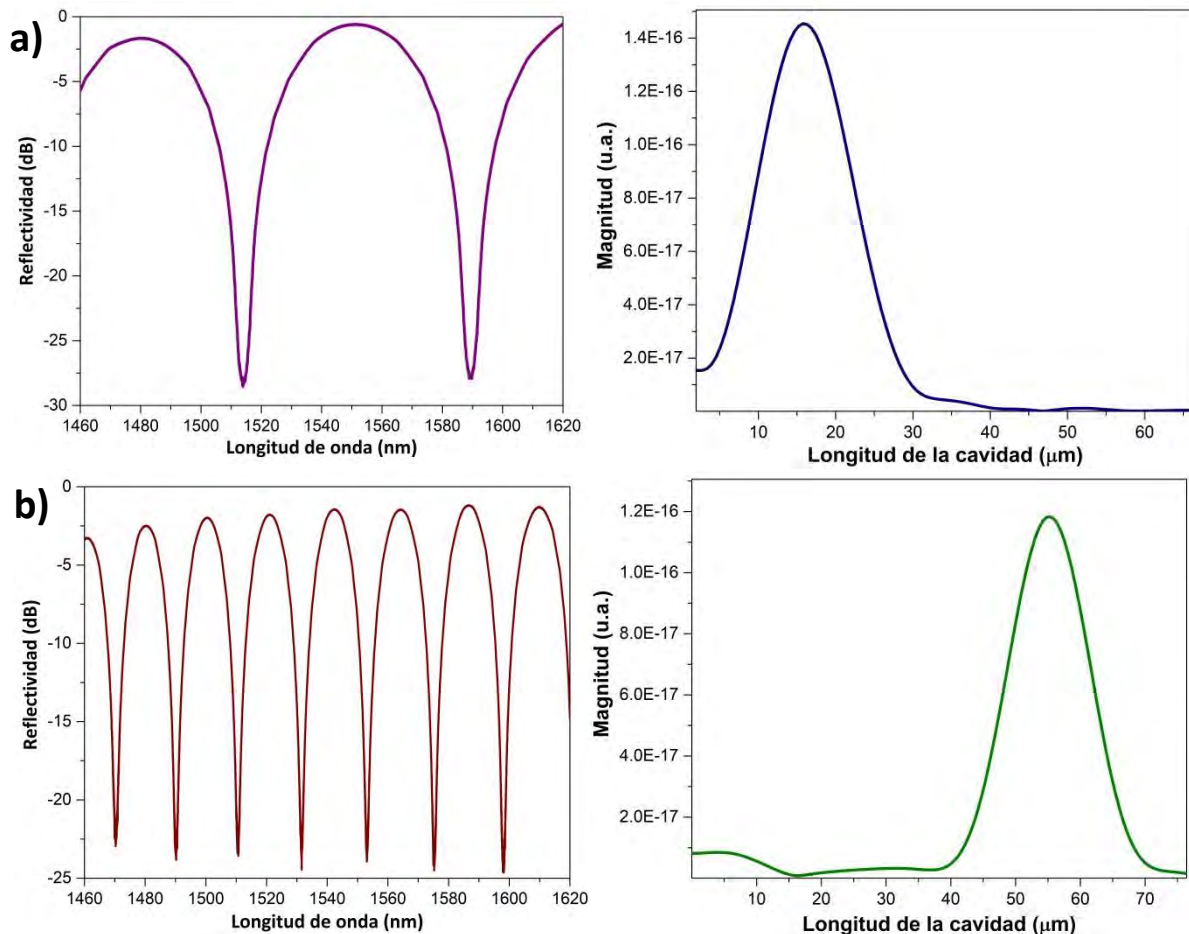
Figura 30. IFT del  $\cos(\omega t_0)$

Al aplicar entonces la IFT obtenemos una señal en el tiempo, para calcular la longitud de la cavidad se utiliza la relación:

$$L = \frac{t_0 c}{2}. \quad (5.15)$$

Utilizando este desarrollo se calculó la longitud de las cavidades fabricadas a partir del espectro de reflexión. En la Figura 31 se muestran los espectros de reflexión de dos cavidades con longitudes de 16.193  $\mu\text{m}$  (superior izquierda) y de 55.334  $\mu\text{m}$  (inferior izquierda). Y en la parte

superior derecha e inferior derecha se observan los espectros en el espacio de Fourier, respectivamente. Como se puede observar el eje x de estos espectros es una unidad de longitud y el máximo del pico representa la longitud óptica de la cavidad. En el caso de una cavidad de aire, en el que el índice de refracción se puede asumir igual a 1, la longitud óptica y la longitud física de la cavidad son iguales. Las ordenadas de los picos son de  $15.789 \mu\text{m}$  (superior derecha) y  $55.262 \mu\text{m}$  (inferior derecha) y varían en  $0.404$  y  $0.072 \mu\text{m}$  respectivamente con el valor calculado con el otro método. Los dos métodos pueden tener un grado de error pero representan una buena aproximación para determinar el tamaño de una cavidad sin tener que recurrir a la medición directa.



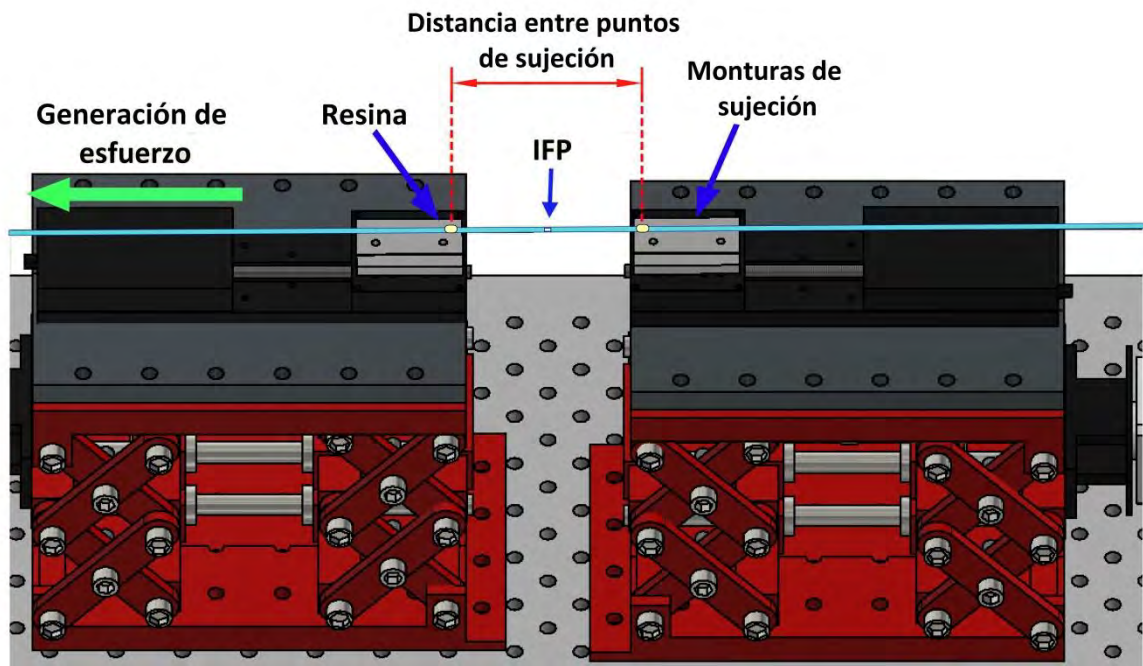
**Figura 31.** Espectros de reflexión y sus IFT de a)  $15.789 \mu\text{m}$  y b)  $55.262 \mu\text{m}$ .

### 5.3 SENSOR DE ESFUERZOS

El FFPI es de particular interés para la medición de esfuerzo porque es una medición directa en la que la fibra óptica actúa como transductor, pero además porque tiene aplicaciones en el control de la salud de materiales de construcción, en el monitoreo de grandes estructuras de ingeniería civil, de naves espaciales, aviones, etc. Son pocos los trabajos que se han hecho para la medición de esfuerzo utilizando FFPI [52], [62], [63], [88]–[93]. Esto puede deberse a varios factores, entre ellos, a que tengan un peor desempeño que las otras tecnologías, que su proceso de fabricación

sea más complicado o costoso, o que el proceso de interrogación y análisis también sea menos competitivo. Por valorar las propiedades de estos dispositivos se realizaron mediciones con la estructura propuesta en este trabajo.

De las cavidades Fabry-Perot fabricadas se seleccionaron tres FFPI con distintas longitudes de la cavidad. Para realizar las pruebas de esfuerzo se utilizó la plataforma que se diseñó para la fabricación de las cavidades, se utilizaron dos piezas de aluminio diseñadas expresamente para este propósito en donde se fijaron las SMF. Se utilizó una resina de poliéster no saturada en estireno *POLYTE 8016* (se anexan sus especificaciones técnicas en el Apéndice D para sujetar la fibra óptica a las piezas de aluminio. Posteriormente las piezas de aluminio se fijaron en las monturas de translación y se procedió a desplazar una de las monturas para variar de manera controlada la longitud de la cavidad, como se muestra en la Figura 32.



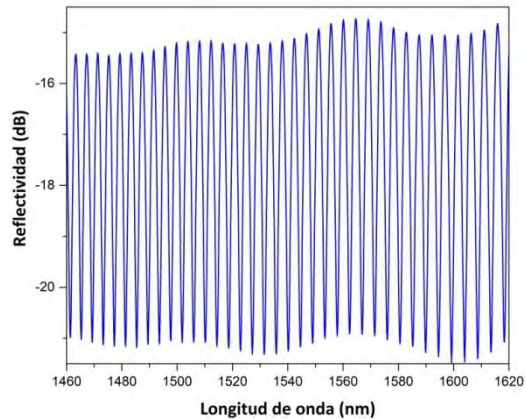
**Figura 32.** Arreglo para la medición de esfuerzo.

Este esfuerzo aplicado al dispositivo provoca un cambio en la diferencia de camino óptico de la luz, lo que genera un desplazamiento del espectro de reflexión de la luz. El esfuerzo, se puede calcular como [94]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (5.16)$$

donde  $l$  es la distancia entre los dos puntos de sujeción de la fibra óptica antes de estirar,  $\Delta l$  es el cambio en la longitud de la cavidad y  $\Delta \lambda$  el cambio en la longitud de onda de uno de los picos o valles del patrón de interferencia posicionado en una longitud de onda específica  $\lambda$ . Esta esta relación, una vez que se ha realizado el proceso de caracterización y que se ha establecido una relación entre el esfuerzo y los desplazamientos en la longitud de onda del espectro, se puede utilizar para determinar el incremento en la longitud de física de la cavidad.

Se estudió este esquema para FFPI con diferentes longitudes de cavidad. La caracterización de estos dispositivos se realizó con el procedimiento descrito en la sección 5.2. Primeramente, se montó en la estación una cavidad que tiene una longitud calculada de  $L=273.55 \mu\text{m}$ , el espectro de reflexión de esta cavidad se presenta en la Figura 33. Se observa que se tiene un número grande de periodos y una variación en la amplitud, aunque para esta aplicación esta variación no afecta la medición.

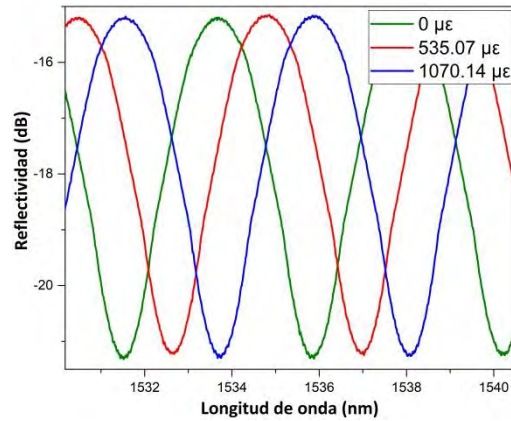


**Figura 33.** Espectro de reflexión de cavidad de  $L=273.55 \mu\text{m}$ .

La distancia de separación entre los puntos de sujeción de los cuales se fijó la fibra es un parámetro importante, pues en base a ese será calculado el esfuerzo que se aplica como se observa en la ecuación (5.16). Para este caso, la distancia a la que se colocó fue de  $l=186.89 \text{ mm}$ . Se eligió esta distancia ya que se realizaron pruebas con valores menores para  $l$ , el resultado fue que al aplicar el esfuerzo el empalme de la SMF con el HCF no soportaba la tensión y se rompía. Esto se puede deber a que, a valores menores de  $l$ , la tensión es mayor al distribirse en un área menor.

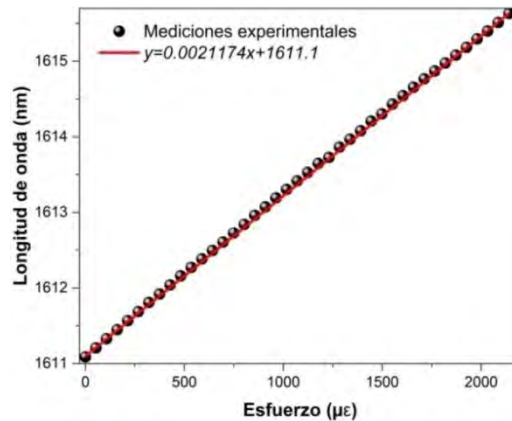
Como se observa en la Figura 32, la etapa de traslación motorizada del lado derecho se mantuvo fija y solamente se movió la del lado izquierdo con pasos de  $\Delta l=0.01 \text{ mm}$ . Por lo tanto, utilizando la ecuación (5.16), se calculó que se generaba un esfuerzo de  $\varepsilon=53.50741 \mu\epsilon$  con cada paso.

En la Figura 34 se muestra una sección de  $\approx 10 \text{ nm}$  del espectro de reflexión de este dispositivo. En color verde se observa la posición inicial del espectro sin aplicar ningún esfuerzo, en color rojo se presenta el corrimiento del espectro de  $\approx 1.13419 \text{ nm}$  después de haber movido la etapa de traslación  $100 \mu\text{m}$ , lo cual representa un esfuerzo aplicado de  $535.07 \mu\epsilon$ . Finalmente, en color azul se observa el espectro desplazado  $\approx 2.12666 \text{ nm}$  con respecto de la referencia, sin aplicar ningún esfuerzo. En este caso hubo un movimiento de la etapa de traslación de  $200 \mu\text{m}$ , lo que da un valor calculado de  $1070.14 \mu\epsilon$ .



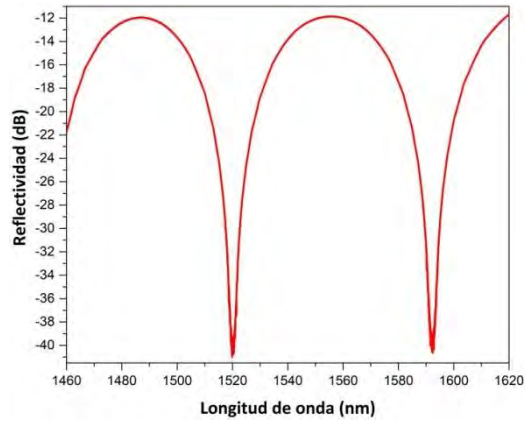
**Figura 34.** Desplazamiento del espectro de reflexión sometido a esfuerzo.

Se midieron los espectros cada paso de 0.01 mm hasta mover la etapa de traslación 400 μm. Dados los espectros, se localizaron las posiciones de sus máximos y se calculó un esfuerzo máximo aplicado de 2140.29 με. En la Figura 35 se muestra en puntos de color negro el desplazamiento correspondiente de cada espectro en función del esfuerzo aplicado. De aquí, se calculó la ecuación de la recta calculada para esos puntos. Dada la pendiente de esta recta es posible calcular la sensibilidad del dispositivo, lo cual es de ≈2.1174 pm/με.



**Figura 35.** Corrimiento del espectro en longitud de onda con respecto al esfuerzo sometido FFPI de  $L=273.55 \mu\text{m}$ .

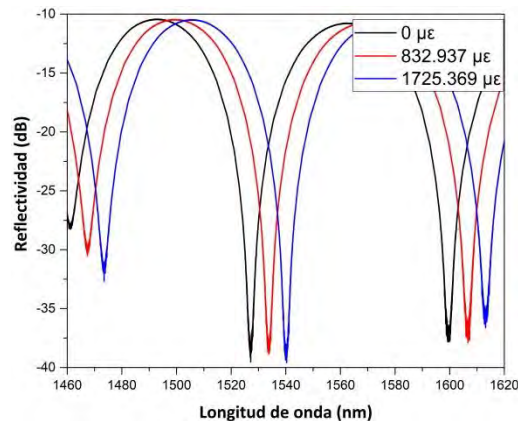
Posteriormente, se construyó un dispositivo con una longitud de cavidad menor de  $L=17.541 \mu\text{m}$ . Esto para calcular su sensibilidad a esfuerzo y compararla con el FFPI de cavidad de mayor longitud. El espectro de reflexión de esta cavidad después de fabricarlo se presenta en la Figura 36. Aquí se observa un periodo menor que en el espectro presentado en la Figura 33. Además, tiene muy poca variación en amplitud debido a que al ser una cavidad de menor tamaño, existe menos dispersión de la luz al viajar a través del HCF.



**Figura 36.** Espectro de reflexión de cavidad de  $L=17.541 \mu\text{m}$ .

Se trató que las condiciones en las que se aplicó esfuerzo fueran las mismas para tener una mejor comparación, para esto la distancia de separación entre los puntos de sujeción de la fibra fue de  $l=168.08 \text{ mm}$ . Además, se realizó el mismo procedimiento de movimiento de la etapa de traslación motorizada. Por lo tanto, se generaba un esfuerzo de  $\varepsilon=59.4955 \mu\epsilon$  con cada paso, lo cual es un valor muy cercano al calculado en el FFPI de mayor longitud de cavidad.

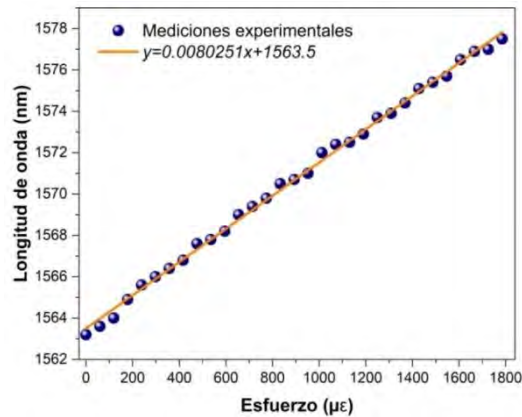
En la Figura 37 se presentan tres espectros de reflexión del dispositivo, se puede observar que el dispositivo tiene un comportamiento muy similar con el FFPI presentado en la Figura 34. En color negro se observa el espectro al no aplicar ningún esfuerzo. En color rojo se presenta el espectro cuando la etapa de traslación se desplazó 140 mm el cual tiene un corrimiento de 6.48942 nm, con lo cual se obtiene un esfuerzo aplicado de 832.937  $\mu\epsilon$ . En color azul se presenta el espectro cuando la etapa de traslación se movió 290 mm con un corrimiento de 12.7976 nm con respecto al espectro cuando no se aplicó esfuerzo. El esfuerzo calculado para el espectro azul fue de 1725.369  $\mu\epsilon$ .



**Figura 37.** Desplazamiento del espectro de reflexión sometido a esfuerzo.

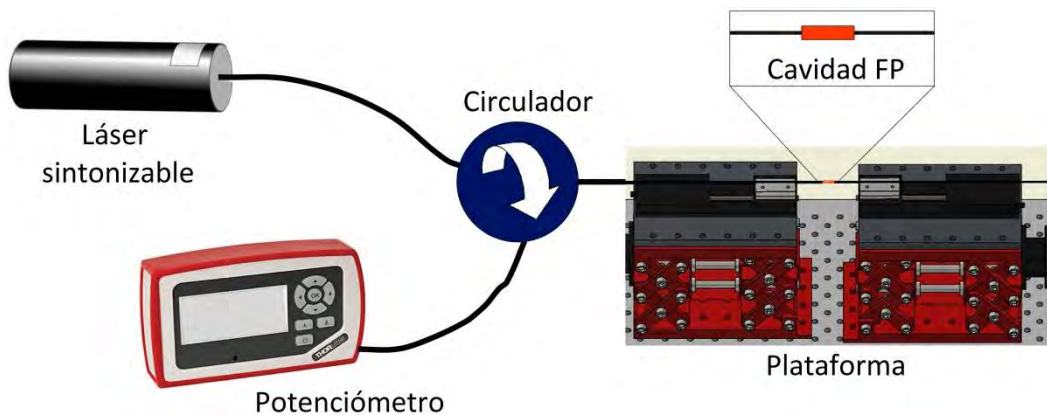
De manera análoga que para el dispositivo anterior de mayor longitud de cavidad, se localizaron los máximos de los espectros para cada paso hasta aplicar un esfuerzo de 1784.864  $\mu\epsilon$ . Se calculó la ecuación de la recta que siguen los puntos obtenidos y dada su pendiente, se obtuvo

una sensibilidad de  $\approx 8.0251 \text{ pm}/\mu\epsilon$  como se muestra en la Figura 38. De aquí se observa que para este FFPI con menor longitud de la cavidad, se obtuvo una mayor sensibilidad.



**Figura 38.** Corrimiento del espectro en longitud de onda con respecto al esfuerzo sometido FFPI de  $L=17.541 \mu\text{m}$ .

Además, se observó que al tener un espectro con solo dos máximos de la señal y un desplazamiento del espectro al aplicar esfuerzo era posible realizar mediciones en potencia. Para esto se utilizó un láser sintonizable emitiendo a  $1550 \text{ nm}$  a  $2 \text{ mW}$  con una potencia reflejada de  $503.1 \mu\text{W}$ , un circulador y un potenciómetro *PM100D de THORLABS* como se observa en la Figura 39. Para la elección de la longitud de onda a la que se sintonizó el láser se midieron las potencias a distintas longitudes de onda para encontrar uno de los máximos y de los mínimos y localizar la longitud de onda a la mitad de estos valores. Esto para poder tener un rango considerable al aplicar esfuerzo y no llegar a un máximo ni a un mínimo.



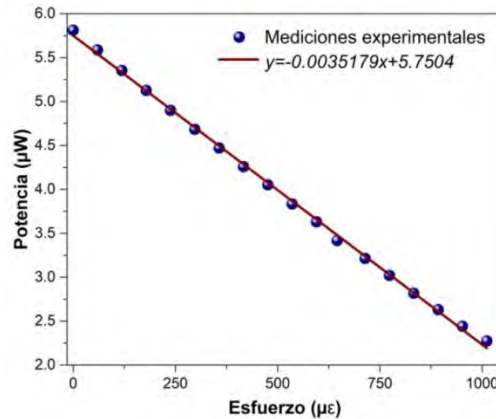
**Figura 39.** Sistema para interrogación en potencia.

Es importante mencionar que el poder realizar mediciones en potencia reduce considerablemente el costo de interrogación y por lo tanto el costo del sensor. Además, lo convierte en un sistema más portátil ya que podría utilizarse un láser emitiendo a una sola longitud de onda y un fotodetector. Estas ventajas hacen al dispositivo fabricado más viable para su comercialización y utilización en la industria.



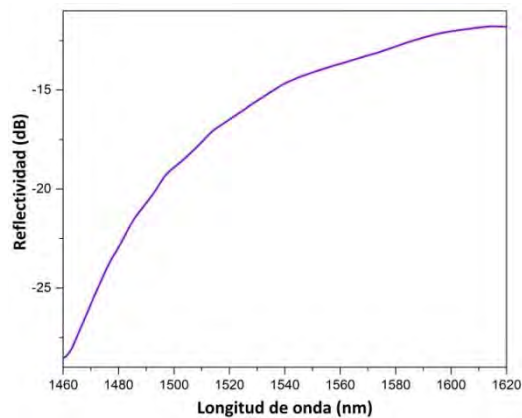
Las condiciones para aplicar el esfuerzo (cambio  $\mu\epsilon$ , distancia de sujeción y la forma en que se desplazaron las etapas de traslación) fueron las mismas que en los experimentos anteriores.

Para este esquema, el desplazamiento total de la etapa de traslación fue de 168.08  $\mu\text{m}$ , lo cual representó un esfuerzo calculado de hasta 1000  $\mu\epsilon$ . Se graficaron los valores de potencia medidos y se calculó la ecuación de la recta que sigue estos puntos como se observa en la Figura 40. De aquí, se obtuvo la sensibilidad del dispositivo con la pendiente de dicha recta, la cual fue de  $\approx 3.5179 \text{ nW}/\mu\epsilon$ . Se puede observar que la respuesta es muy buena ya que los valores medidos son lineales.



**Figura 40.** Medición de esfuerzo en potencia para cavidad de  $L=17.541 \mu\text{m}$ .

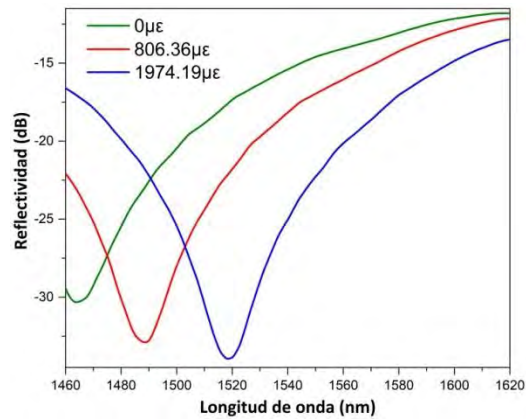
Posteriormente, se construyó un FFPI con una longitud aún menor de la utilizada en los dos dispositivos anteriores, se caracterizó y se calculó una longitud de cavidad FP de  $L=6.76 \mu\text{m}$ . El espectro de reflexión de este FFPI se presenta en la Figura 41, donde se observa que en este rango espectral tiene menos de un periodo.



**Figura 41.** Espectro de reflexión de cavidad de  $L=6.76 \mu\text{m}$ .

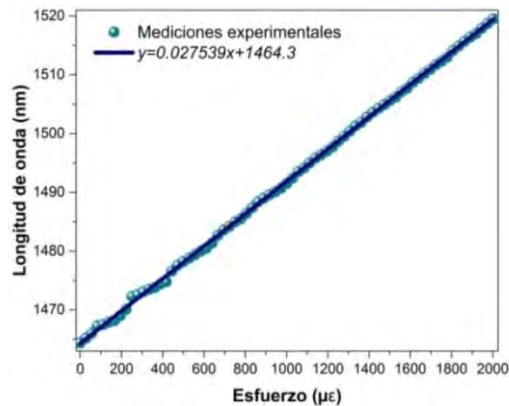
Las condiciones de interrogación en longitud de onda y el procedimiento para generar esfuerzo fueron las mismas utilizadas en los dispositivos anteriores. La distancia entre la sujeción de la fibra se trató también que fuera similar teniendo una  $l=179.82 \text{ mm}$ . Por lo tanto, se generó un cambio de  $\epsilon=59.4957 \mu\epsilon$  con cada movimiento. El dispositivo presentó un comportamiento similar al aplicar el esfuerzo como se puede observar en la Figura 42, aquí se presenta en color

verde el espectro al no aplicar ningún esfuerzo, este espectro no coincide con el mostrado en la Figura 41 porque cuando se adquirió este espectro la fibra no estaba totalmente estirada. En color rojo se observa un corrimiento del espectro de 24.6747 nm al haber movido la etapa de traslación 145  $\mu\text{m}$ , lo cual generaba un esfuerzo calculado de 806.36  $\mu\epsilon$ . En color azul se muestra el espectro desplazado 54.64281 nm con respecto al espectro de 0  $\mu\epsilon$ . Para obtener este espectro, la etapa de traslación se desplazó 355 mm generando un esfuerzo calculado de 1974.19  $\mu\epsilon$ .



**Figura 42.** Espectro de reflexión con respecto al incremento en esfuerzo.

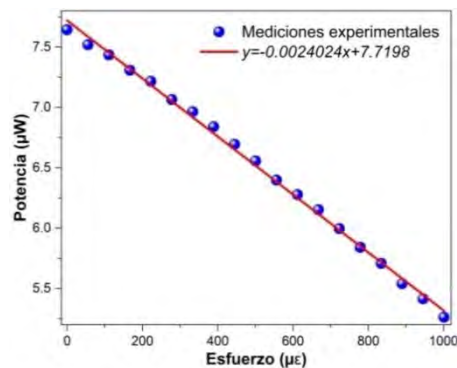
Para este dispositivo se realizó el seguimiento de la posición del mínimo de la señal. Dados estos puntos presentados en la Figura 43, se calculó su ecuación de la recta y dada la pendiente se calculó la sensibilidad de este sensor, obteniendo un valor de 27.539  $\text{pm}/\mu\epsilon$ , el cual es un valor mucho mayor que el obtenido con las cavidades más grandes.



**Figura 43.** Corrimiento del espectro en longitud de onda con respecto al esfuerzo sometido FFPI de  $L=6.76 \mu\text{m}$ .

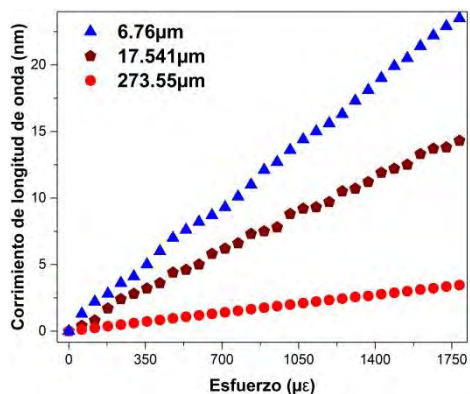
Al observar la forma del espectro de este dispositivo (presentado en la Figura 41) se puede considerar también para realizar mediciones en potencia con el esquema de interrogación mostrado en la Figura 39. La longitud de onda a la que se sintonizó el láser fue de 1545 nm y su elección fue llevando acabo el procedimiento de manera análoga con el dispositivo anterior.

Se realizaron entonces mediciones en potencia con las mismas condiciones de generación de esfuerzo que para la interrogación en longitud de onda. Se desplazaron las etapas de traslación 180  $\mu\text{m}$ , generando un esfuerzo calculado de hasta 1000  $\mu\epsilon$ . Se graficaron estos puntos y se calculó la recta seguida por los mismos, se obtuvo la pendiente y de aquí se encuentra la que la sensibilidad de este dispositivo es de 2.4024 nW/ $\mu\epsilon$ . Como se puede observar en la Figura 44, el comportamiento es menos lineal que para el dispositivo anterior interrogado en potencia. Del mismo modo, el valor calculado en sensibilidad también es menor que el obtenido para la cavidad de  $L=17.541 \mu\text{m}$ , esto quizás pueda deberse a que los valores en potencia van siguiendo la forma semi-parabólica del espectro lo cual es menos notorio en los valores medidos para la cavidad de  $L=17.541 \mu\text{m}$ . Este comportamiento es indicativo que en este caso durante el procedimiento seguido para encontrar el punto de inflexión se incurrió en un error y esto dio como resultado que la longitud de onda elegida para sintonizar el láser estaba un poco desviada del valor óptimo. Esto se puede atribuir a la larga transición entre el mínimo y el máximo y a que esta no es lineal. Es evidente del antes de 500  $\mu\epsilon$  la sensibilidad es similar a la que se reporta pero que a partir de 600  $\mu\epsilon$  la pendiente comienza a crecer y esto es un indicativo que la sensibilidad de este dispositivo es mayor si la longitud de onda es la adecuada. Mejorar la sensibilidad, en este caso, implica una reducción del rango dinámico del sensor. En cualquier caso se demuestra que contar con cavidades Fabry-Perot menores de 20  $\mu\text{m}$  nos permite hacer mediciones de esfuerzo utilizando únicamente un circulador, un láser y un fotodetector.



**Figura 44.** Medición de esfuerzo en potencia para cavidad de  $L=6.76 \mu\text{m}$ .

Finalmente, se hizo la comparación de los resultados obtenidos calculando el corrimiento en longitud de onda para los valores experimentales de las tres cavidades caracterizadas como se observa en la Figura 45. De aquí, se puede concluir que conforme la cavidad es más pequeña, se consigue mayor sensibilidad a esfuerzo.



**Figura 45.** Comparación de esfuerzo a distintas longitudes de cavidades.

Para verificar la competitividad de nuestro sensor con los fabricados anteriormente, se realizó la comparación de la sensibilidad de los sensores de esfuerzo construidos en este trabajo con otros dispositivos fabricados con la estructura FFPI.

**Tabla 3. Comparación de sensibilidad a esfuerzo en FFPI.**

Estructura del sensor	Técnica de fabricación	Rango de medición (µε)	Sensibilidad (pm/µε)	Sensibilidad (nW/µε)
SMF-HCF-SMF[92]	Empalme de fusión	0 a 3000	1.7	
SMF-HCF-SMF [Nuestro sensor de L=273.55 µm]	Empalme de fusión	0 a 2150	2.1174	
SMF-PCF[52]	Empalme de fusión	0 a 5000	2.7	
SMF-Burbuja de aire-SMF[63]	Empalme de fusión	0 a 1000	4	
SMF[94]	Láser de femtosegundo	0 a 360	6	
SMF-Burbuja de aire-SMF[89]	Empalme de fusión	0 a 1000	6.19	
SMF-HCF-SMF [Nuestro sensor de L=17.541 µm]	Empalme de fusión	0 a 1800	8.0251	3.5179
SMF-HCF-SMF [Nuestro sensor de L=6.76 µm]	Empalme de fusión	0 a 2000	27.539	2.4024

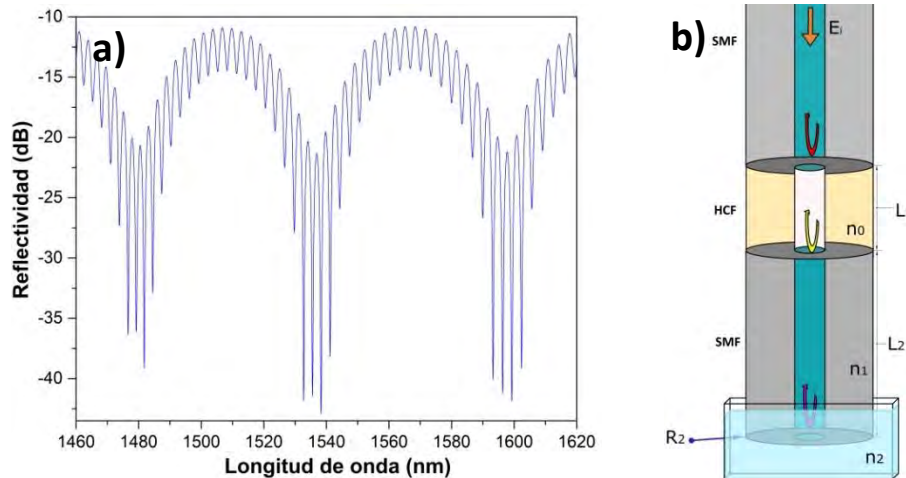
Como se puede observar en la Tabla 3, las sensibilidades de los sensores aquí propuestos para las cavidades más pequeñas son mucho mayores que las de otros dispositivos fabricados incluso, con técnicas más complejas.

#### 5.4 SENSOR DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Como se estudió en la sección 4.3, es posible detectar cambios de índice de refracción utilizando un FFPI híbrido. Para esto, basta con que la superficie de la punta se encuentre en contacto con un medio con un IR diferente para visualizar un cambio en amplitud en el espectro

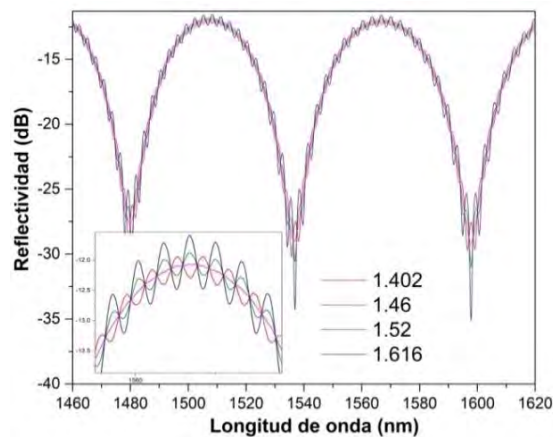
de reflexión. Para hacer la demostración experimental de este fenómeno, se construyó un dispositivo de doble cavidad y se interrogó con el procedimiento presentado en la sección 5.2, obteniendo el espectro presentado en la Figura 46a con unas longitudes de sus cavidades calculadas de  $L_1=22.175 \mu\text{m}$  y  $L_2=376.31 \mu\text{m}$ .

Posteriormente, se sumergió la punta de este sensor en soluciones de IR conocidos  $n_2$  como se presenta en la Figura 46b. Estas soluciones fueron líquidas de índice de refracción certificado de *CARGILLE LABORATORIES INC* y se eligieron de modo que sus valores de IR fueran cercanos a los de la fibra óptica  $n_1$ , tanto mayores como menores.



**Figura 46.** a) Espectro de reflexión en aire y b) Esquema del dispositivo.

La respuesta del dispositivo a los diferentes índices de refracción se presenta en la Figura 47, se puede observar que el comportamiento observado en la prueba experimental es muy similar al que se había estudiado en la sección 4.3, si  $n_2$  es menor  $n_1$  la amplitud del espectro correspondiente a la cavidad de SMF disminuye. Conforme  $n_2$  se vaya acercando a  $n_1$  irá disminuyendo cada vez más la amplitud correspondiente. Cuando  $n_2$  sea igual a  $n_1$ , solo veremos el espectro que le corresponde a la cavidad de HCF y después de que  $n_2$  sea mayor que  $n_1$ , la amplitud crecerá.



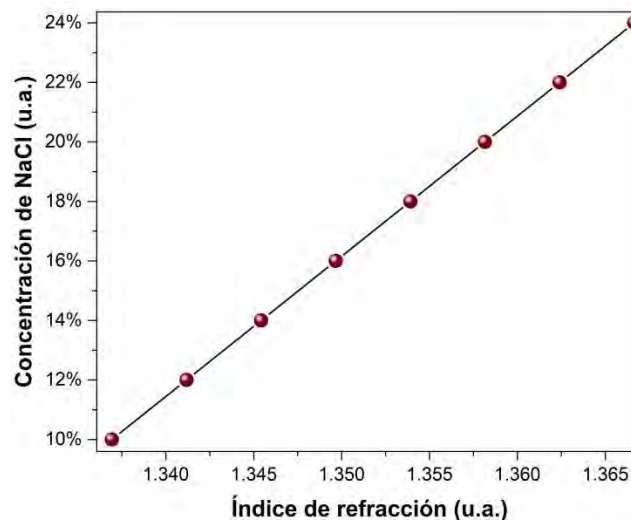
**Figura 47.** Espectro de reflexión a distintos IR.

Una de las principales aplicaciones de los sensores de índice de refracción está en el desarrollo de biosensores, en los cuales las muestras a medir tienen, por lo general, índices de refracción cercanos al del agua. Para esto se prepararon soluciones de agua con diferentes concentraciones de cloruro de sodio ( $NaCl$ ). En la preparación de las muestras se siguió la siguiente relación:

$$n_2 = (\% NaCl)n_{NaCl} + (1 - (\% NaCl))n_{H_2O}, \quad (5.17)$$

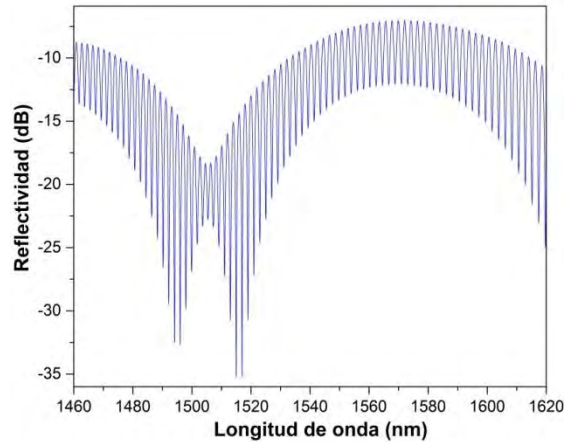
donde  $\%NaCl$  es el porcentaje de Cloruro de Sodio que tiene la sustancia,  $n_{NaCl}$  es el índice de refracción del  $NaCl$  al 100% y  $n_{H_2O}$  es el índice de refracción del agua en la que está disuelto el  $NaCl$ .

El índice de refracción de las soluciones con diferentes concentraciones de  $NaCl$  se muestra en la Figura 48.



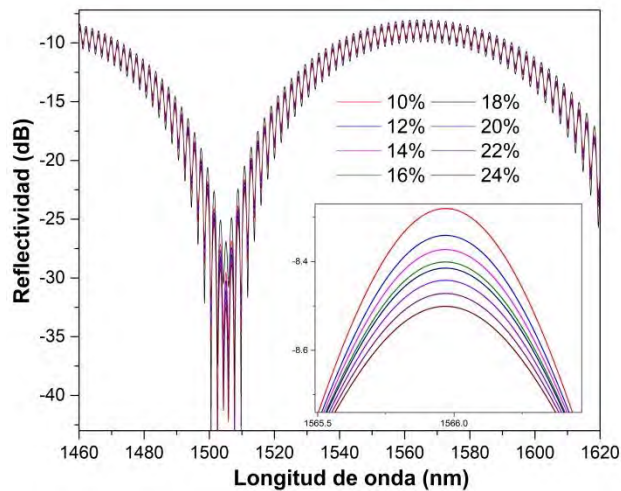
**Figura 48.** Índices de refracción encontrados para cada concentración de  $NaCl$ .

Posteriormente, se construyó un dispositivo de dos cavidades, para la primera se insertó una sección de HCF de  $L_1=9.78 \mu m$  entre dos fibras SMF. Una de las SMF se cortó para tener una sección de  $L_2=381.8 \mu m$ . Las longitudes fueron calculadas a partir de los espectros experimentales. El espectro de este FFPI se muestra en la Figura 49, aquí se puede observar el espectro correspondiente a la cavidad de menor longitud (modulación con el período mayor) y dentro de él una modulación de período menor, que corresponde al espectro de la cavidad más larga, que concuerda con los resultados obtenidos en el estudio teórico mostrado en la sección 4.3.



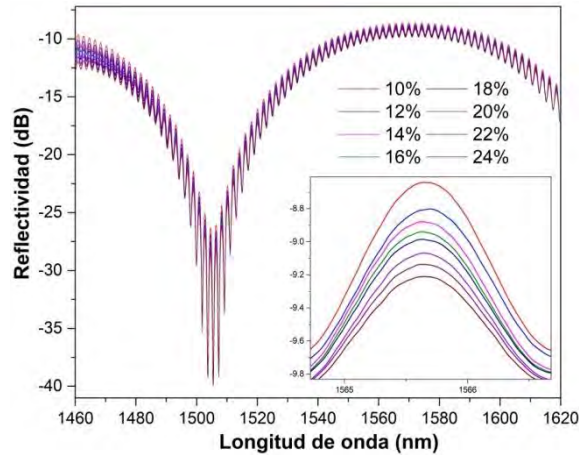
**Figura 49.** Espectro de reflexión en aire.

Antes de realizar la prueba experimental se procedió a realizar la simulación teórica del dispositivo para algunos índices de refracción correspondiente a las soluciones fabricadas con diferentes concentraciones de *NaCl*. Los espectros se muestran en la Figura 50, en la ampliación mostrada se puede observar que existe una disminución monótona de la visibilidad conforme aumenta la concentración de *NaCl* ya que el índice de refracción de la solución aumenta.



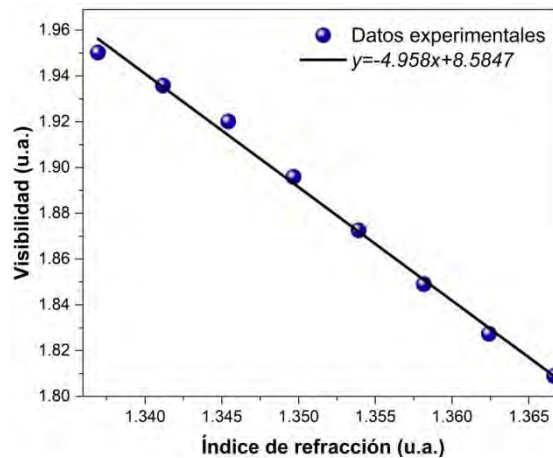
**Figura 50.** Espectros de reflexión calculados.

Finalmente se procedió a realizar las pruebas, para esto se sumergió la punta del dispositivo fabricado en cada una de las soluciones de agua-cloruro de sodio (*NaCl*) que variaban cada 2% del 10 a 24%. Como se muestra en la Figura 51, la amplitud de la modulación producida por la cavidad  $L_2$  disminuye al poner en contacto la punta del dispositivo con las soluciones. En las gráficas del recuadro se puede observar con más detalle este efecto. Se puede observar que el comportamiento experimental es muy similar al teórico presentado en la Figura 50.



**Figura 51.** Espectros de reflexión a diferentes concentraciones de NaCl.

Con base en esto, se construyó la curva de calibración (presentada en la Figura 52) para este dispositivo utilizando los valores de IR calculados y la visibilidad de las franjas definida por la ecuación (2.14). El valor de la visibilidad para cada IR fue normalizado con respecto al del valor obtenido en aire. La sensibilidad calculada es de  $-4.958 \text{ dB/RIU}$ .



**Figura 52.** Curva de calibración para IR.

Esta curva de calibración permite medir el IR de una sustancia desconocida de manera experimental, para esto se utiliza la visibilidad de las franjas y se busca el IR correspondiente usando la ecuación de la aproximación lineal.

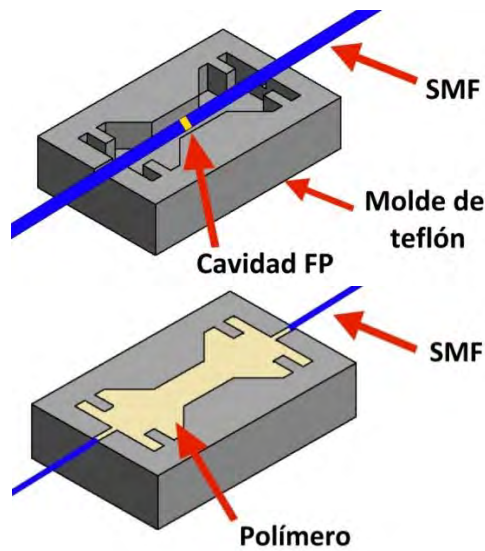
De aquí se puede concluir que es posible diseñar y construir dispositivos FFPI híbridos, calcular su curva de calibración con cualquier sustancia de IR conocido y a partir de allí poder calcular el IR desconocido de una sustancia dada la visibilidad en sus espectros de reflexión.



## 5.5 SENSOR DE TEMPERATURA

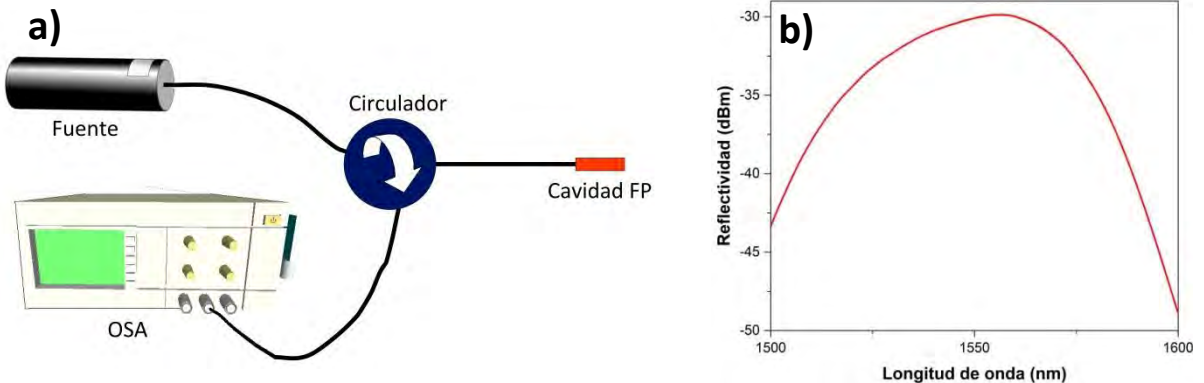
Como es bien sabido, la SMF está fabricada de sílice que tiene un coeficiente de expansión térmica de  $0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  y el coeficiente termo-óptico es  $8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  [84], es prácticamente imposible poder medir cambios de temperatura en el rango de 20 a  $80^\circ\text{C}$  tratando de variar estos parámetros.

Para poder realizar mediciones de temperatura ambiente, se diseñó, construyó y caracterizó un FFPI con una cavidad de longitud  $L=14.665 \mu\text{m}$ . Luego, se usó un molde de teflón para fijar la fibra de modo que quedara en la parte hueca del molde como se observa en la parte superior de la Figura 53. Posteriormente, se vertió una resina de poliéster no saturada en estireno *POLYTE 8016* en el molde hasta cubrir completamente la fibra. El método de fabricación de este polímero es similar al utilizado para PDMS (polidimetilsiloxano).



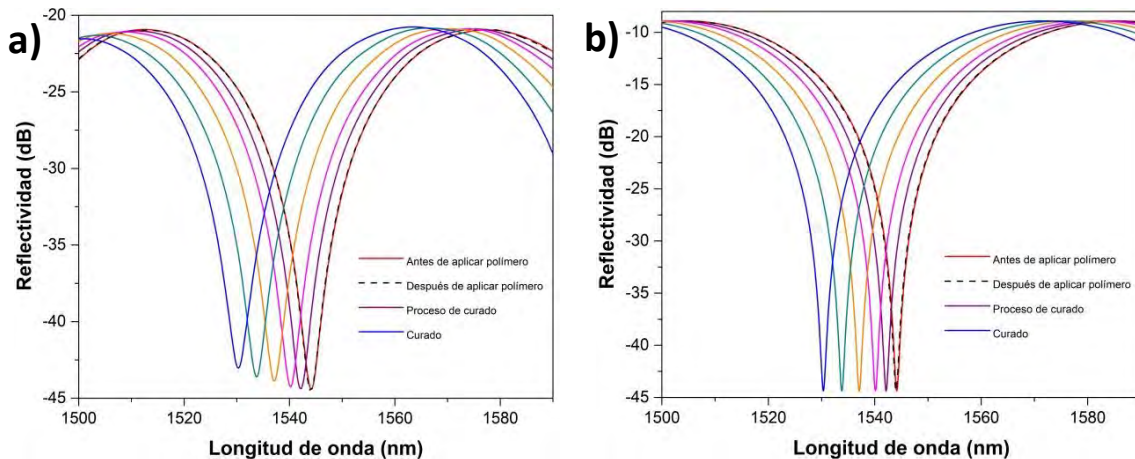
**Figura 53.** Proceso de fabricación de sensor de temperatura ambiente.

Para la interrogación de este experimento se utilizó el esquema presentado en la Figura 54a, el cual comprende de un OSA (Analyzer Spectrum Optical), un circulador y una fuente que emite de 1500 a 1600 nm como se observa en la Figura 54b.



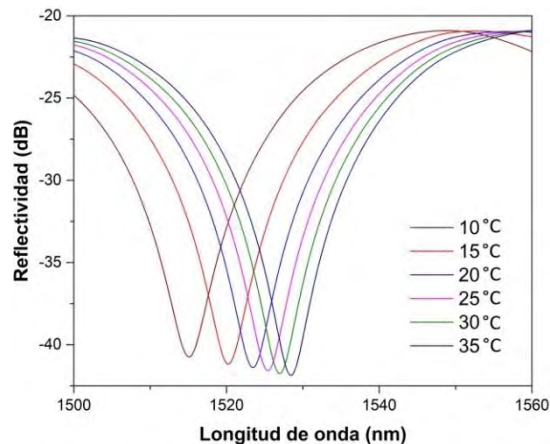
**Figura 54.** a) Esquema de interrogación y b) Espectro de reflexión de fuente.

Se estudió el efecto que tenía el proceso de curado en el FFPI analizando el comportamiento de los espectros de reflexión y posteriormente compararlos con la simulación del fenómeno. Para esto se midieron los espectros antes de aplicar la resina, durante el proceso de curado y al finalizar este proceso con el esquema presentado en la Figura 54. Se encontró que hubo un desplazamiento del espectro hacia longitudes de onda menores como se observa en la Figura 55a, esto implica que el dispositivo se contrajo. Para saber exactamente que tanto se contrajo se realizó la simulación y se encontró que hubo una disminución en el tamaño de la cavidad de 131 nm en el proceso de curado. Esto se debe a que se depositó en el molde al polímero, este se adhirió a la fibra y conforme se fue secando se contrajo al igual que el dispositivo.



**Figura 55.** Comparación espectros a) Experimentales y b) Teóricos de curado del polímero.

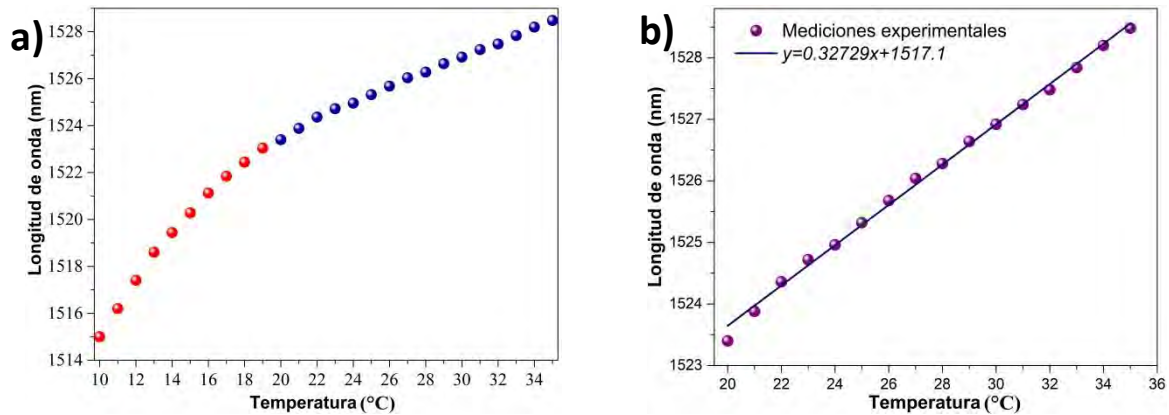
Con este dispositivo se realizaron mediciones de temperatura. Para esto, se colocó el dispositivo en una placa *CHILLING HEATING PLATE, ECHO TERM* variando de 10 a 35°C. Como resultado, los espectros se desplazaron a longitudes de onda más grandes conforme aumentaba la temperatura como se observa en la Figura 56.



**Figura 56.** Espectros de reflexión con cambios de temperatura.

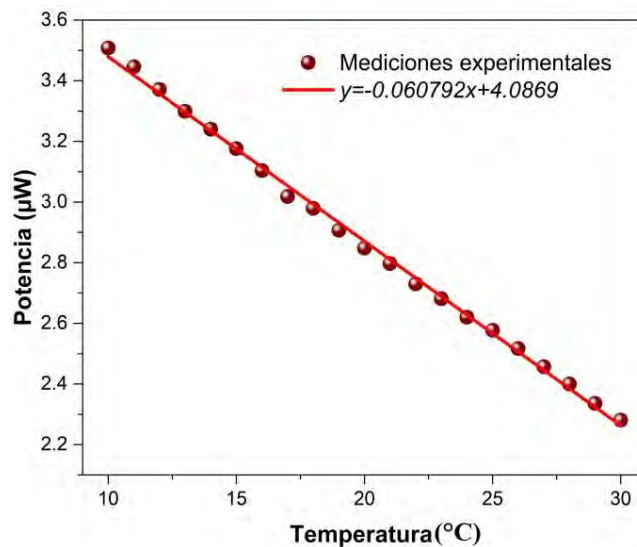
Se calculó la posición de los mínimos del dispositivo conforme se aumentaba la temperatura. De aquí se encontró que de 10 a 20°C el dispositivo no presenta un comportamiento lineal. Esto puede deberse a las propiedades de la resina con la que se construyó este sensor. De 20 a 35°C la

respuesta si es lineal y presenta una sensibilidad de 327.3 pm/°C con una resolución de menos de 1 grado centígrado.



**Figura 57.** a) Posición del mínimo del espectro con cambios de temperatura de 10 a 35°C y b) Posición del mínimo del espectro para variaciones de temperatura de 20 a 35°C.

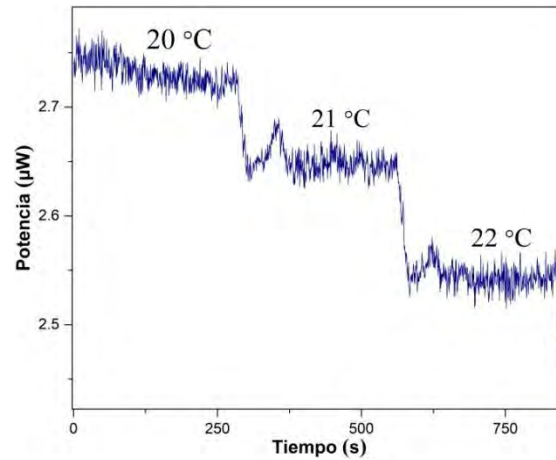
Este dispositivo también fue interrogado en potencia utilizando el sistema presentado en la Figura 39 con el láser sintonizable emitiendo a 1448 nm. La elección de la longitud de onda se realizó de manera análoga con los dispositivos interrogados en potencia en la sección 5.3. Se midió la potencia a la salida del sistema y se graficaron con respecto al cambio en temperatura como se presenta en la Figura 58. Aquí se observa un comportamiento lineal, se calculó entonces la recta que describen estos datos y dada su pendiente se encontró una sensibilidad de 60.792 nW/°C.



**Figura 58.** Variación de potencia con respecto de la temperatura.

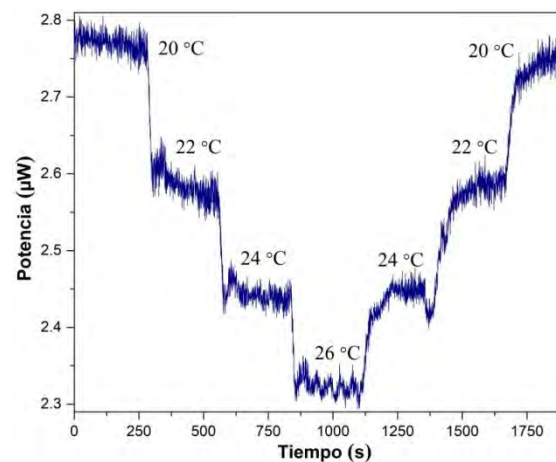
Además, se realizaron mediciones para analizar la respuesta temporal del dispositivo, para esto se utilizó el software *Optical Power Monitor (OPM)* de THORLABS. Con este programa se puede graficar en tiempo real la potencia en función del tiempo transcurrido. Las mediciones variando de 1°C se presentan en la Figura 59. En esta figura se observa que hay un tiempo de tarda en llegar a la potencia correspondiente a la temperatura. Este tiempo puede ser de unos pocos microsegundos ya que, se sabe que la placa *Peltier* tarda 2 minutos en alcanzar y estabilizar la

temperatura seleccionada según la respuesta del FFPI. Es por esto que se presentan diferencias en la disminución de la temperatura.



**Figura 59.** Medición de potencia con cambios de temperatura de 1°C.

Del mismo modo, se analizó la respuesta del dispositivo al disminuir la temperatura cada 2°C y después aumentarla a los mismos valores. Los resultados se observan en la Figura 60 y muestran que la señal alcanza el mismo nivel de potencia al encontrarse a la misma temperatura. Esto debido, a la estabilidad del dispositivo y su buena sensibilidad a temperatura ambiente.



**Figura 60.** Variación en potencia con cambios en temperatura de 2°C.

Finalmente, se realizó una comparación de las sensibilidades de otros dispositivos con la configuración FFPI para medir temperatura ambiente con el sistema aquí presentado.

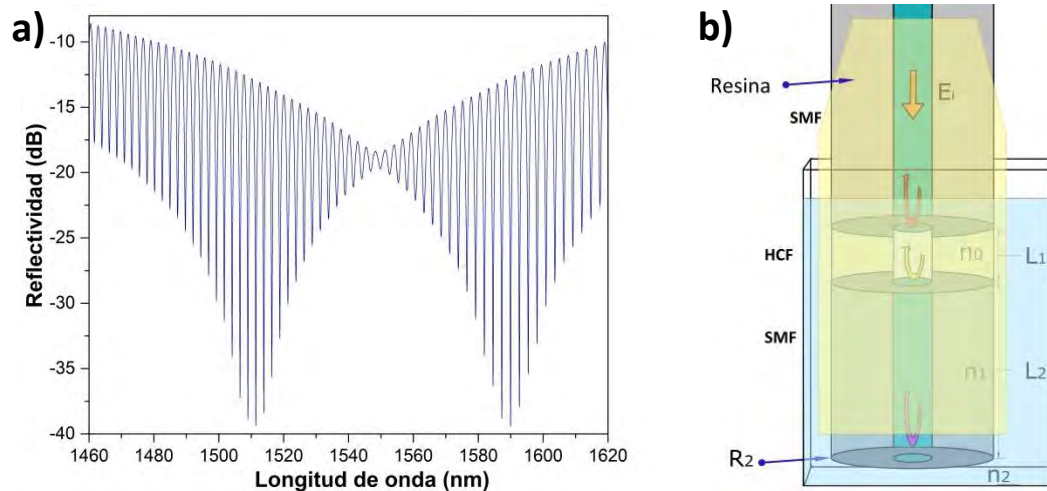
**Tabla 4. Comparación de sensibilidad a temperatura ambiente en FFPI.**

Estructura del sensor	Técnica de fabricación	Rango de medición (°C)	Sensibilidad (pm/°C)
SMF-HCF-SMF[92]	Empalme de fusión	0 a 180	0.95
MMF[72]	Burbuja de aire en punta	0 a 55	1.6
SMF-HCF-SMF[85]	Empalme de fusión	10 a 60	10
SMF-Fibra de núcleo delgado [95]	Empalme de fusión	20 a 70	10.1
SMF[66]	Láser de femtosegundo	10 a 70	11.21
SMF-HCF-Película delgada de polímero [68]	Empalme de fusión	22 a 55	43.57
SMF[96]	Polímero sol gel en punta	20 a 46	50
SMF-Fibra óptica microestructurada[97]	Empalme de fusión	30 a 75	127.5
SMF-Cavidad de aire-Espejo de oro[75]	Uso de montura para acercar fibra a espejo	0 a 50	258
SMF-HCF-SMF <b>[Nuestro sensor]</b>	Empalme de fusión, inmerso en resina	20 a 35	327.3
SMF-HCF1-HCF2[98]	Microburbuja rodeada de agua destilada en fibra	0 a 40	350
SMF-HCF1-HCF2[59]	Empalme de fusión y cavidad llena de etanol	-5 a 30	429

En la tabla anterior, se puede observar que nuestro sensor se encuentra dentro de las sensibilidades más altas de temperatura y es fabricado mediante una técnica más sencilla que los dispositivos con mayor sensibilidad.

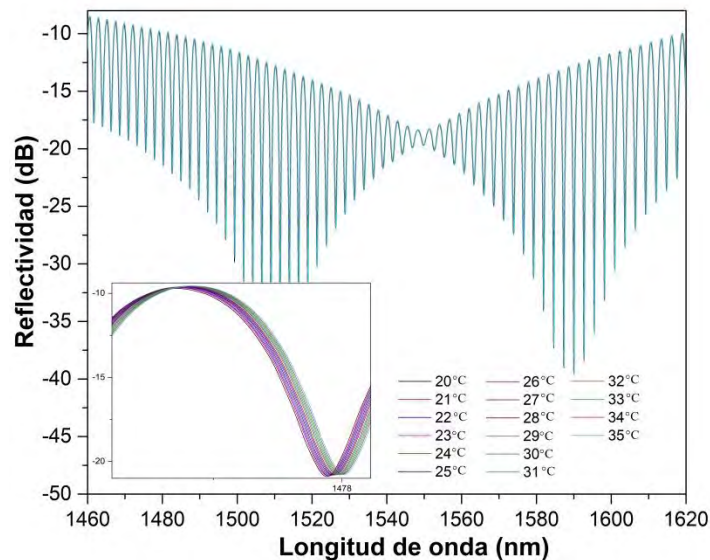
## 5.6 SENSOR DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN Y TEMPERATURA

Se construyó un FFPI híbrido y se caracterizó con el sistema presentado en la Figura 28. El espectro de reflexión de este dispositivo se presenta en la Figura 61a. Luego, se calcularon unas longitudes de sus cavidades de  $L_1=7.75 \mu\text{m}$  y  $L_2=483.9 \mu\text{m}$ . Este dispositivo se propuso para medir índice de refracción y temperatura simultáneamente. Para esto, utilizando un molde cilíndrico de  $\approx 1 \text{ mm}$  de diámetro se vertió resina *POLYTE 8016* en el dispositivo de modo que cubriera la parte del HCF y la punta de la fibra quedara libre. Luego, se introdujo este sensor en algunas sustancias como se muestra en la Figura 61b. Esto ya que el cambio en IR será medido en el cambio de la amplitud de la señal como se vio en el experimento de la sección 5.4 y el cambio en temperatura será medido por el polímero del que está hecha la cavidad y por lo tanto variará la longitud de la cavidad FP.



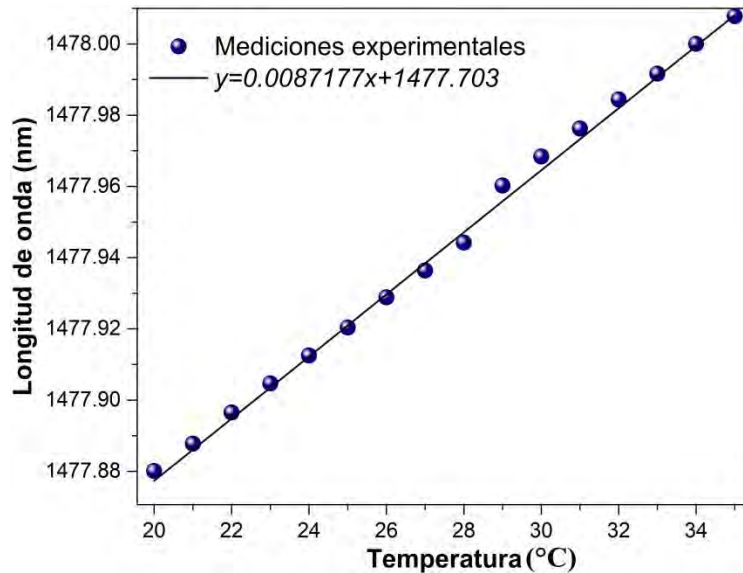
**Figura 61.** a) Espectro de reflexión del FFPI híbrido y b) Esquema para medir cambios en IR y temperatura.

Inicialmente, se colocó el dispositivo en una placa *CHILLING HEATING PLATE, ECHO TERM* en aire y se varió su temperatura de 20 a 35°C. Como resultado, se encontró una variación en el espectro hacia longitudes de onda mayores como se observa en la Figura 62, esto indica un crecimiento en el camino óptico y por lo tanto un crecimiento en la longitud de la cavidad de HCF.



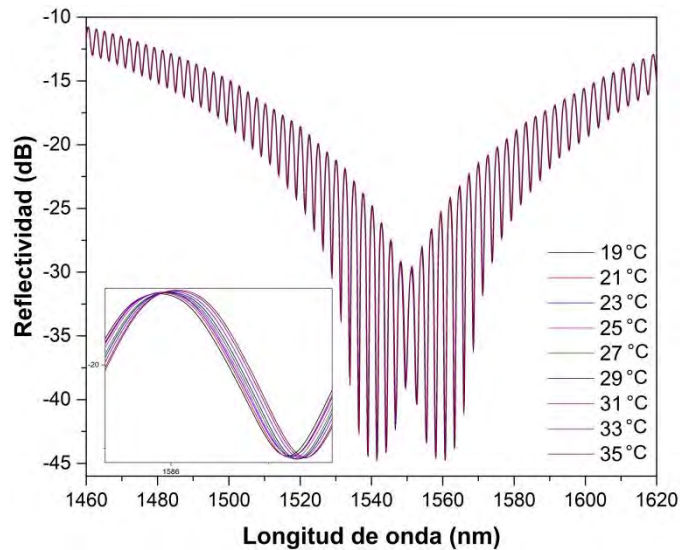
**Figura 62.** Espectro de reflexión en aire variando la temperatura.

Se calculó la posición de los máximos de la señal para valor de temperatura. Se graficaron estos datos y se encontró la recta que siguen estos valores como se observa en la Figura 63. Se encontró la pendiente de esta recta y de allí se encontró que el dispositivo tiene una sensibilidad de 8.7177 pm/°C.



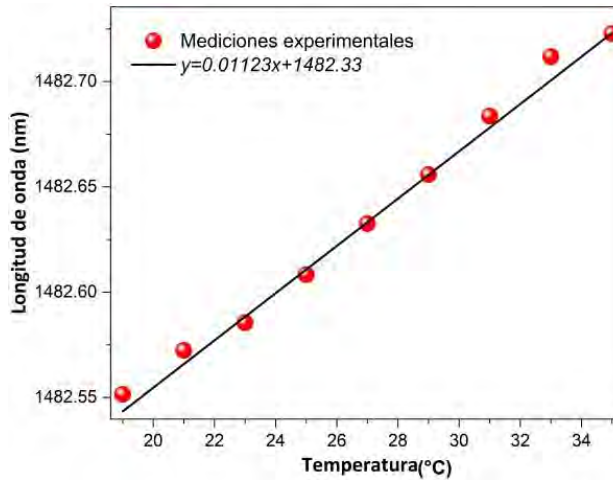
**Figura 63.** Cambio de longitud de onda con respecto a la temperatura.

Posteriormente, se introdujo el dispositivo en agua destilada sobre la placa variando su temperatura de 19 a 35°C. Como resultado, la amplitud de la señal debido a la segunda cavidad disminuyó por el cambio de IR y se presentó un corrimiento en longitud de onda debido a la variación de temperatura como se observa en la Figura 64.



**Figura 64.** Cambios del espectro de reflexión con respecto a temperatura.

Se calculó la posición de los máximos de manera análoga con la medida anterior y se realizó el cálculo de la sensibilidad la cual fue este arreglo de 11.23 pm/°C como se observa en la Figura 65.



**Figura 65.** Corrimiento del espectro en longitud de onda con respecto a la temperatura.

Como sabemos, el índice de refracción cambia con respecto a la temperatura. Es posible calcular esta variación mediante la expresión [99]:

$$n(T) = n_0 + \left(\frac{dn}{dT}\right)(T - T_0), \tag{5.18}$$

donde  $T$  es el valor de temperatura al que se quiere encontrar el valor de IR correspondiente. Los parámetros  $n_0$  y  $T_0$  son dos valores de IR conocidos. Para este cálculo, se utilizó el IR conocido para 20°C el cual es 1.3157. El valor de  $dn/dT$  se calculó con la relación [100]:

$$\frac{dn}{dT} = -2.773 \times 10^{-6} T - 4.0993 \times 10^{-5} \tag{5.19}$$

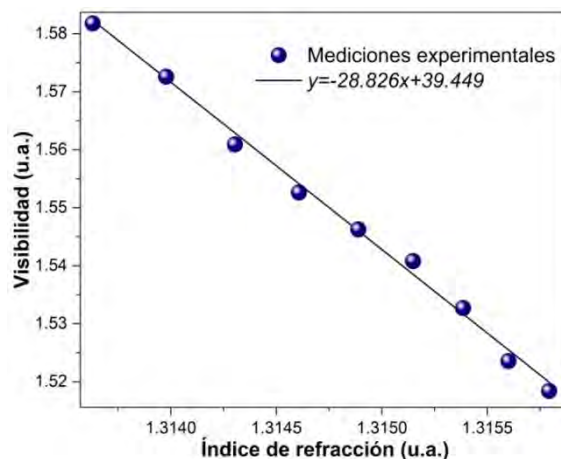
Utilizando esta relación se calcularon los IR para cada variación de temperatura de esta sustancia. Estos valores se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5. IR calculados.**

Temperatura	IR
19	1.31579
21	1.3156
23	1.31539
25	1.31515
27	1.31489
29	1.31461
31	1.3143
33	1.31398
35	1.31363

Finalmente, se calculó la visibilidad de cada espectro y se graficó con respecto a cada IR correspondiente.





**Figura 66.** Cambio de visibilidad de las franjas de interferencia con respecto al IR.

Con esto, se demostró que es posible detectar cambios de IR y temperatura simultáneamente con un FFPI.

## 5.7 DEMOSTRACIÓN DE UN BIO-SENSOR

Una de las potenciales y más recientes aplicaciones del FFPI es el estudio de nuevos sistemas para construir biosensores. Éstos, hacen uso de componentes biológicos para detectar una especie de interés (que, por sí misma, no necesita ser una "bioespecie"). Este tipo de sensores ha despertado un interés extraordinario en los últimos años, debido a la creciente necesidad de técnicas de monitoreo in situ simples, rápidas y continuas en áreas como la salud. Estos dispositivos se pueden considerar como una alternativa importante a las técnicas convencionales para el análisis clínico debido a su sensibilidad, selectividad, versatilidad, rapidez y capacidad en la monitorización de multianálitos [101].

Los elementos de reconocimiento biológico, también llamadas biomoléculas de sensado, desempeñan un papel clave en la sensibilidad y selectividad de la detección. La biomolécula de sensado traduce información biológica, como una concentración de analito, en una señal de salida química o física con una sensibilidad definida. Proporciona al sensor un alto grado de selectividad para que se pueda medir el analito. La biomolécula de sensado detecta el analito mediante una interacción específica con el analito objetivo, que generará una perturbación física o química que se puede convertir en un efecto mensurable, como una señal óptica o eléctrica. La señal del receptor se transmite al transductor el cual genera a su vez una nueva señal que es proporcional a la señal recibida. Los puntos clave en la biodetección son el mecanismo de reconocimiento del analito y la estrecha conexión entre el elemento sensor y el transductor [102].

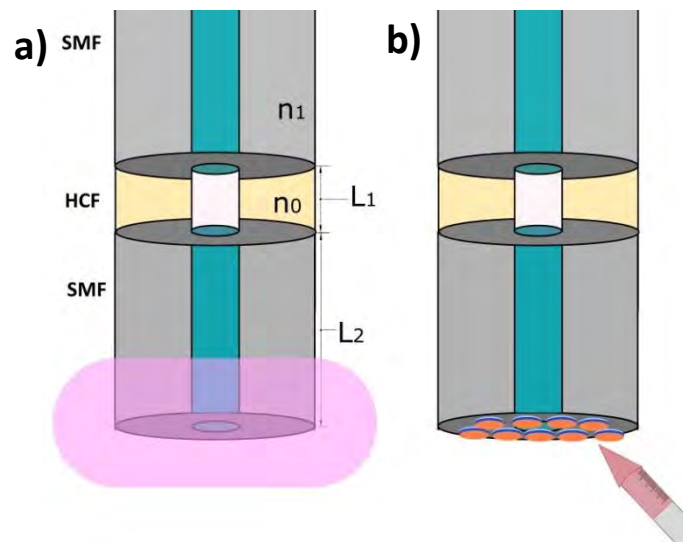
Para biosensar con el principio de FFPI es necesario funcionalizar alguna de las superficies reflectoras de la cavidad del FFPI de modo que la variable a medir esté en función de los cambios que conocemos en el espectro de reflexión, como medir cambios de IR [83] o en la diferencia de camino óptico de la luz [103]. La funcionalización no solo se utiliza en biosensado, sino también en la medición de sustancias químicas [104] y de humedad [105]. Algunas de las ventajas

suplementarias a las que ya conocemos de los FFPI es que como biosensor es posible realizar una detección biológica label free con alta sensibilidad y una rápida respuesta.

Se construyeron FFPI de doble cavidad de distintas longitudes  $L_1$  y  $L_2$ . Luego, se realizó la biofuncionalización. Para esto, se utilizó una proteína llamada hidrofobina Vmh2 clase I. Esta proteína se autoensambla en películas anfífilas químicamente estables, esto para poder cambiar la humectabilidad de las superficies y para adsorber fuertemente otras proteínas.

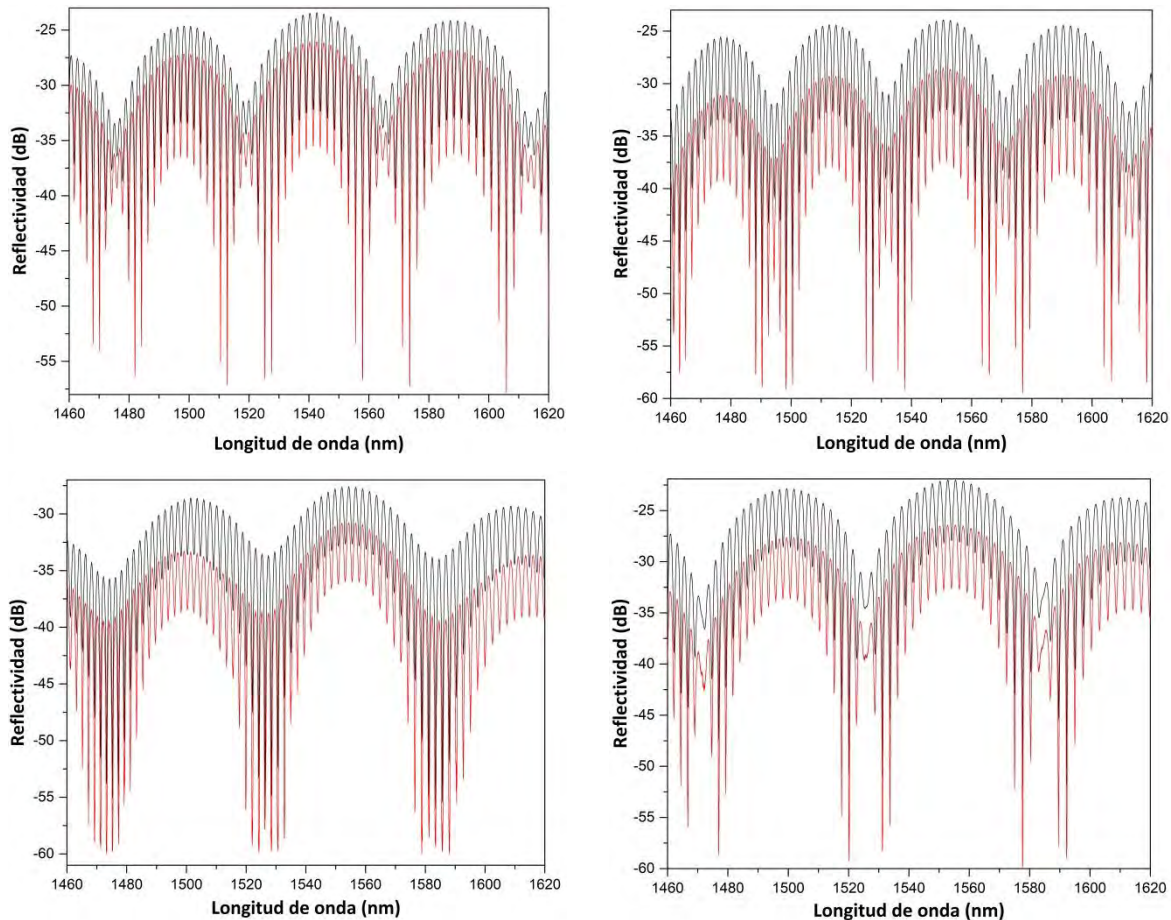
El primer paso para biofuncionalizar es utilizar tratamiento con plasma de oxígeno para cargar de manera negativa la superficie de la fibra como se observa en la Figura 67a. Esto porque la Vmh2 en solución de etanol al 60% está dotado de potencial electrostático positivo. Luego, por inmersión se hace un ensamblaje rápido con capas anfífilas utilizando la proteína Vmh2 como se presenta en la Figura 67b. Con esto, se logra una funcionalización de vidrio rápida, altamente homogénea y eficiente mediante el autoensamblaje espontáneo de la proteína Vmh2 en las interfaces líquido-sólido (en 2 min).

Se sabe que este proceso de biofuncionalización se ha realizado anteriormente en portaobjetos de vidrio donde se detectaron proteínas como la albúmina sérica bovina marcada con flúor Alexa 555, anticuerpos anti-inmunoglobulina G y nanocristales semiconductores de telurio de cadmio. En este trabajo se demostró la funcionalidad, la reproducibilidad y la versatilidad del sustrato propuesto. Este enfoque ofrece una alternativa rápida y sencilla para inmovilizar nanomateriales y proteínas, lo cual es atractivo para las nuevas aplicaciones bioanalíticas y nanobioestables [106].



**Figura 67.** Proceso de biofuncionalización: a) Tratamiento de plasma y b) Aplicación de la hidrofobina Vmh2.

Antes de realizar este proceso se midieron los espectros de reflexión en aire. Luego, se midieron después de la biofuncionalización para finalmente hacer una comparación de la efectividad del proceso. En la Figura 68 se observa el cambio en la reflectividad de la señal en cuatro dispositivos que tienen  $L_1 \approx 15 \mu\text{m}$  y  $L_2 \approx 300 \mu\text{m}$  antes (línea negra) y después (línea roja) de la biofuncionalización.



**Figura 68.** Espectros de reflexión antes (negro) y después de la biofuncionalización (rojo).

Aquí se puede observar un cambio en la reflectividad  $R_2$ , el cual está asociado a un cambio en el índice de refracción en la punta sensora. Esto indica que en el proceso de biofuncionalización se formó una película delgada en la punta. Con esto se demuestra que es posible utilizar estos dispositivos como biosensores.

## 5.8 CONCLUSIONES

Se describió la técnica de empalme de fusión, la cual fue utilizada para fabricación de los FFPI. Además, se detalló el método de caracterización de los dispositivos, el cual fue principalmente utilizando la Transformada de Fourier.

Posteriormente, se presentaron las aplicaciones que se le dieron a este sistema. Una de ellas fue para medir esfuerzo. Para esto, se construyeron tres dispositivos de diferente longitud de la cavidad, obteniendo una sensibilidad de hasta 27.539 pm/ $\mu\epsilon$  para el FFPI con la cavidad de menor tamaño. Además, se realizaron mediciones en potencia con un láser emitiendo a una longitud de onda de 1550 nm. Para este esquema se obtuvo una sensibilidad de 24.024 pm/ $\mu W$ .

Otra de las variables físicas medidas fue índice de refracción. Para esto, se utilizó un FFPI de doble cavidad. Se midieron IR para sustancias de agua con concentraciones de NaCl que van desde

10 hasta 24%. Con base en los resultados, se calcularon los IR y la visibilidad de las franjas. Con esto, se construyó la curva de calibración del sensor.

También, se realizaron mediciones de temperatura ambiente. Para lograrlo se construyó una cavidad FP y se colocó en un molde de teflón donde le fue añadido un polímero. Se hizo el análisis del cambio del espectro de reflexión en el tiempo de curado. Luego, se analizó su variación a diferentes temperaturas en longitud de onda y en potencia. De este experimento se obtuvo una sensibilidad de 327.3 pm/°C y 60.792 nW/°C respectivamente.

Se demostró que es posible medir simultáneamente IR y temperatura utilizando un FFPI de doble cavidad. Esto, asociando el IR al cambio en la reflectividad en la punta del sensor y la temperatura al cambio en la longitud de la cavidad. Se midieron cambios en temperatura en aire obteniendo una sensibilidad de 8.7177 pm/°C. Luego, se introdujo el dispositivo en agua desionizada, se midió el cambio en temperatura y el cambio en IR(T). La sensibilidad en temperatura para este arreglo fue de 11.23 pm/°C.

Finalmente, se hizo la demostración de un biosensor utilizando la configuración de FFPI de doble cavidad haciendo la biofuncionalización de la punta del dispositivo para medir cambios en IR en función de las proteínas adsorbidas. Esto representa una potencial e interesante aplicación para este sistema donde existe trabajo a futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Bommarredi, "Applications of Optical Interferometer Techniques for Precision Measurements of Changes in Temperature, Growth and Refractive Index of Materials," *Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 54–75, 2014.
- [2] D. Malacara, *Óptica básica*: FCE - Fondo de Cultura Económica, 2015.
- [3] P. Hariharan, *Optical Interferometry*, vol. 2, no. 2–3. 2003.
- [4] P. Hariharan, *Basics of Interferometry*. Elsevier Science, 2012.
- [5] G. Hernandez, *Fabry-Perot Interferometers*. Cambridge University Press, 1988.
- [6] C. Fabry, "On the wave-length of the cadmium line at 5086," *Astrophys J.*, vol. 19, pp. 116–118, 1903.
- [7] W. Multiplexing and L. F. Lc-fpi, "Tunable Liquid-Crystal Fabry-Perot Interferometer Filter for Wavelength-Division Multiplexing Communication Systems," vol. 11, no. 12, pp. 2033–2043, 1993.
- [8] F. Interferometer, "re Re")," vol. 36, no. 19, 1976.
- [9] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," vol. 18, no. 16, pp. 1370–1372, 1993.
- [10] D. D. M. Óptica, C. De Investigaciones, and A. Postal, "METROLOGÍA ÓPTICA EN DETECCIÓN DE GRIETAS EN ELEMENTOS MECÁNICOS Amalia Martínez," no. 2, pp. 36–38.
- [11] J. A. Rayas, R. Rodríguez-Vera, and A. Martínez, "Medición del modulo de Young en el hule látex usando ESPI," *Revista Mexicana de Física*, vol. 49, no. 6. pp. 555–564, 2003.
- [12] N. I. Toto-Arellano, "4D measurements of biological and synthetic structures using a dynamic interferometer," *J. Mod. Opt.*, vol. 64, pp. S20–S29, 2017.
- [13] G. Thomas, "Considerations for a 3D super-resolution interferometric microscope in biology," no. March, pp. 1–10, 2013.
- [14] A. M. Rollins and J. A. Izatt, "Optimal interferometer designs for optical coherence tomography," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 21, pp. 1484–1486, Nov. 1999.
- [15] D. D. Nolte, *Optical Interferometry for Biology and Medicine*. Springer New York, 2011.
- [16] "USED INTERFEROMETERS FOR SALE." .
- [17] "Interferometry: Measuring with Light." .
- [18] "Very-Long-Baseline Interferometry," in *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, Wiley-Blackwell, 2007, pp. 304–382.
- [19] "LIGO Lab | Caltech | MIT." .
- [20] F. Sciences, "N f 2A Z J \* fc \* fc ) | IAC Af [[ J (," vol. 8, no. 2, pp. 107–111, 2001.
- [21] T. Letter, "Rapid communications," vol. 15, no. 5, pp. 1099–1100, 1976.
- [22] V. Vasinek, J. Latal, P. Koudelka, P. Siska, J. Vitasek, and J. Skapa, "Mach-Zehnder fiber interferometer for people monitoring," *Unmanned-Unattended Sensors Sens. Networks Vii*, vol. 7833, no. October, 2010.

- [23] B. H. Lee, Y. H. Kim, K. S. Park, J. B. Eom, M. J. Kim, B. S. Rho, and H. Y. Choi, "Interferometric fiber optic sensors," *Sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 2467–2486, 2012.
- [24] L. Jiang, J. Yang, S. Wang, B. Li, and M. Wang, "Fiber Mach–Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 19, p. 3753, 2011.
- [25] Z. Tian and S. S. H. Yam, "In-line abrupt taper optical fiber Mach-Zehnder interferometric strain sensor," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 3, pp. 161–163, 2009.
- [26] P. Lu, L. Men, K. Sooley, and Q. Chen, "Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 13, pp. 2007–2010, 2009.
- [27] H. Meng, W. Shen, G. Zhang, X. Wu, W. Wang, C. Tan, and X. Huang, "Michelson interferometer-based fiber-optic sensing of liquid refractive index," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 160, no. 1, pp. 720–723, 2011.
- [28] L. Yuan, J. Yang, and Z. Liu, "A compact fiber-optic flow velocity sensor based on a twin-core fiber Michelson interferometer," *IEEE Sens. J.*, vol. 8, no. 7, pp. 1114–1117, 2008.
- [29] A. Koch and R. Ulrich, "Fiber-optic displacement sensor with 0.02  $\mu\text{m}$  resolution by white-light interferometry," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 25, no. 1, pp. 201–207, 1990.
- [30] A. Reza, S. Tofighi, M. Bathaee, and F. Farm, "Optical Fiber Interferometers and Their Applications," *Interferom. - Res. Appl. Sci. Technol.*, 2012.
- [31] B. D. Gupta, *Fiber Optic Sensors: Principles and Applications*. New India Publishing Agency, 2006.
- [32] B. Culshaw and A. Kersey, "Fiber-Optic Sensing : A Historical Perspective," vol. 26, no. 9, pp. 1064–1078, 2008.
- [33] N. D. A., B. P. E., and U. Eric, "Optical Fibers," in *Fiber Optic Sensors*, Wiley-Blackwell, 2011, pp. 9–33.
- [34] "Fiber optic pressure sensors OPP-C - Altheris." .
- [35] S. W. Harun, "Fiber Optic Temperature Sensors," *Opt. Fiber Commun. Devices*, 2008.
- [36] "Fiber optic position sensors ODP - Altheris." .
- [37] S. Mount and S. Sensor, "Surface Mount Strain Sensor | os3610 Surface Mount Strain Sensor | os3610." pp. 1–2.
- [38] "Intrusion Detection Platforms - Micron Optics." .
- [39] "Distributed Fiber Optic Sensing: Overview." .
- [40] P. By, "World ' s largest Science , Technology & Medicine Open Access book publisher Applications of Fiber-Optic Interferometry Technology Applications of Fiber-Optic Interferometry Technology in Sensor Fields in Sensor Fields."
- [41] U. Sharma and X. Wei, "Fiber Optic Sensing and Imaging," pp. 29–54, 2013.
- [42] Y. Zhang, H. Shibru, K. L. Cooper, and A. Wang, "Miniature fiber-optic multicavity Fabry–Perot interferometric biosensor," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 9, p. 1021, 2005.
- [43] D. L. Franzen and E. M. Kim, "Long optical-fiber Fabry-Perot interferometers," *Appl. Opt.*,

- vol. 20, no. 23, pp. 3991–3992, 1981.
- [44] S. Nemoto, “Temperature-scanned Fabry–Perot interferometer using a graded-index rod,” *Opt. Lett.*, vol. 10, no. 7, pp. 312–314, Jul. 1985.
- [45] A. Guermat, A. Guessoum, N. E. Demagh, M. Zaboub, and Z. Bouhafs, “Fibre-optic temperature and pressure sensor based on a deformable concave micro-mirror,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 270, pp. 205–213, 2018.
- [46] X. Wu, H. Liu, X. Wang, and H. Jiang, “Fiber-Optic Biological / Chemical Sensing System Based on Degradable Hydrogel,” vol. 18, no. 1, pp. 45–52, 2018.
- [47] L. H. Chen, X. M. Ang, C. C. Chan, M. Shaillender, B. Neu, W. C. Wong, P. Zu, and K. C. Leong, “Layer-by-layer (chitosan/polystyrene sulfonate) membrane-based fabry-perot interferometric fiber optic biosensor,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 4, pp. 1457–1464, 2012.
- [48] P. E. L. Dixon, “United States Patent ( 19 ),” no. 19, 1992.
- [49] and W. A. Zhu, Y., Wang, Xu, J., “Optical fiber pressure and acceleration sensor fabricated on a fiber endface.” 2006.
- [50] F. P. Documents, “(12) United States Patent,” vol. 2, no. 12, 2011.
- [51] É. Pinet, A. Pham, and S. Rioux, “Miniature Fiber Optic Pressure Sensor for Medical Applications : an Opportunity for Intra-Aortic Balloon Pumping ( IABP ) therapy,” vol. 5855, no. 418, pp. 234–237, 2005.
- [52] J. Villatoro, V. Finazzi, G. Coviello, and V. Pruneri, “Photonic-crystal-fiber-enabled micro-Fabry – Perot interferometer,” *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 16, pp. 2441–2443, 2009.
- [53] Y. Rao, Y. Gong, and Z. Ran, *Fiber-optic Fabry-perot Sensors: An Introduction*. CRC Press/LLC, 2017.
- [54] J. Mathew, O. Schneller, D. Polyzos, D. Havermann, R. M. Carter, W. N. Macpherson, D. P. Hand, and R. R. J. Maier, “In-Fiber Fabry – Perot Cavity Sensor for High-Temperature Applications,” vol. 33, no. 12, pp. 2419–2425, 2015.
- [55] R. M. André, S. Pevec, M. Becker, J. Dellith, M. Rothhardt, M. B. Marques, D. Donlagic, H. Bartelt, and O. Frazão, “Focused ion beam post-processing of optical fiber Fabry-Perot cavities for sensing applications,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 11, p. 13102, 2014.
- [56] P. Chen, X. Shu, H. Cao, and K. Sugden, “High-sensitivity and large-dynamic-range refractive index sensors employing weak composite Fabry-Perot cavities,” *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 16, pp. 3145–3148, 2017.
- [57] Y. Liu, S. Qu, and Y. Li, “Single microchannel high-temperature fiber sensor by femtosecond laser-induced water breakdown,” *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 3, pp. 335–7, 2013.
- [58] I. Hernández-Romano, M. A. Cruz-García, C. Moreno-Hernández, D. Monzón-Hernández, E. O. López-Figueroa, O. E. Paredes-Gallardo, M. Torres-Cisneros, and J. Villatoro, “Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 5, p. 5654, 2016.
- [59] K. Cao, Y. Liu, and S. Qu, “Compact fiber biocompatible temperature sensor based on a hermetically-sealed liquid-filling structure,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 24, pp. 29597–29604, 2017.

- [60] Z. Chen, S. Xiong, S. Gao, H. Zhang, L. Wan, X. Huang, B. Huang, Y. Feng, W. Liu, and Z. Li, "High-temperature sensor based on fabry-perot interferometer in microfiber tip," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 1, pp. 11–14, 2018.
- [61] F. C. Favero, L. Araujo, G. Bouwmans, V. Finazzi, J. Villatoro, and V. Pruneri, "Spheroidal Fabry-Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing," *Opt. Express*, vol. 20, no. 7, p. 7112, 2012.
- [62] F. C. Favero, G. Bouwmans, V. Finazzi, J. Villatoro, and V. Pruneri, "Fabry-Perot interferometers built by photonic crystal fiber pressurization during fusion splicing," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 21, p. 4191, 2011.
- [63] D.-W. Duan, Y. Rao, Y.-S. Hou, and T. Zhu, "Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement," *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 8, p. 1033, 2012.
- [64] Q. Zhang, P. Hao, X. Tian, and Y. Li, "High-visibility in-line fiber-optic optofluidic Fabry-Pérot cavity," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, no. 19, pp. 1–5, 2017.
- [65] P. Chen, X. Shu, and H. Cao, "Novel compact and low-cost ultra-weak Fabry-Perot interferometer as highly sensitive refractive index sensor," *IEEE Photonics J.*, no. July, 2017.
- [66] P. Chen, X. Shu, H. Cao, and K. Sugden, "Ultra-sensitive refractive index sensor based on an extremely simple femtosecond-laser-induced structure," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 6, p. 1157, 2017.
- [67] C. Viphavakit, S. O'Keeffe, M. Yang, S. Andersson-Engels, and E. Lewis, "Gold enhanced hemoglobin interaction in a Fabry-Perot based optical fiber sensor for measurement of blood refractive index," *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 4, pp. 1118–1124, 2017.
- [68] C. Bian, M. Hu, R. Wang, T. Gang, R. Tong, L. Zhang, T. Guo, X. Liu, and X. Qiao, "Optical fiber humidity sensor based on the direct response of the polyimide film," *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 2, p. 356, 2018.
- [69] M. R. R. Khan, A. V. Watekar, and S. W. Kang, "Fiber-Optic Biosensor to Detect pH and Glucose," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 4, pp. 1528–1538, 2017.
- [70] Y. Lopez-Dieguez, J. M. Estudillo-Ayala, D. Jauregui-Vazquez, J. M. Sierra-Hernandez, L. A. Herrera-Piada, J. M. Cruz-Duarte, J. C. Hernandez-Garcia, and R. Rojas-Laguna, "Multi-mode all Fiber Interferometer based on Fabry-Perot Multi-cavity and its Temperature Response," *Optik (Stuttg.)*, vol. 147, pp. 232–239, 2017.
- [71] D. Wu, W. Huang, G. Y. Wang, J. Y. Fu, and Y. Y. Chen, "In-line fiber Fabry-Perot refractive index tip sensor based on photonic crystal fiber and spectrum differential integration method," *Opt. Commun.*, vol. 313, pp. 270–275, 2014.
- [72] S. Novais, M. S. Ferreira, and J. L. Pinto, "Optical Fiber Fabry-Perot Tip Sensor for Detection of Water-Glycerin Mixtures," *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 9, pp. 1576–1582, 2018.
- [73] M. S. Jiang, Q. M. Sui, Z. W. Jin, F. Y. Zhang, and L. Jia, "Temperature-independent optical fiber Fabry-Perot refractive-index sensor based on hollow-core photonic crystal fiber," *Optik (Stuttg.)*, vol. 125, no. 13, pp. 3295–3298, 2014.
- [74] X. Liu, M. Jiang, Q. Sui, S. Luo, and X. Geng, "Optical fiber Fabry-Perot interferometer for microorganism growth detection," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 30, no. Supplement C, pp. 32–



37, 2016.

- [75] Y. Zhuang, Y. Chen, C. Zhu, R. E. Gerald, and J. Huang, "Probing changes in tilt angle with 20 nanoradian resolution using an extrinsic Fabry-Perot interferometer-based optical fiber inclinometer," *Opt. Express*, vol. 26, no. 3, pp. 2546–2556, 2018.
- [76] Y. Zhang, P. Yuan, H. Y. Choi, K. S. Park, S. J. Park, U. C. Paek, B. H. Lee, E. S. Choi, C. Wu, Z. Liu, A. P. Zhang, B. O. Guan, and H. Y. Tam, "Temperature-insensitive fiber optic Fabry-Perot interferometer based on special air cavity for transverse load and strain measurements," *Opt. Express*, vol. 25, no. 8, pp. 9443–9448, 2017.
- [77] T. Wei, Y. Han, Y. Li, H.-L. Tsai, and H. Xiao, "Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement," *Opt. Express*, vol. 16, no. 8, p. 5764, 2008.
- [78] T. Zhang, S. Talla, Z. Gong, S. Karandikar, R. Giorno, and L. Que, "Biochemical sensing with a polymer-based micromachined Fabry-Perot sensor.," *Opt. Express*, vol. 18, no. 17, pp. 18394–400, 2010.
- [79] H. Y. Choi, K. S. Park, S. J. Park, U. C. Paek, B. H. Lee, and E. S. Choi, "Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Perot interferometer," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 21, pp. 2455–2457, 2008.
- [80] Y. Zhao, M. Chen, R. Lv, and F. Xia, "In-fiber rectangular air fabry-perot strain sensor based on high-precision fiber cutting platform," vol. 384, no. July 2016, pp. 107–110, 2017.
- [81] Y. Zhao, M. qing Chen, F. Xia, and R. qing Lv, "Small in-fiber Fabry-Perot low-frequency acoustic pressure sensor with PDMS diaphragm embedded in hollow-core fiber," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 270, pp. 162–169, 2018.
- [82] L. H. Chen, T. Li, C. C. Chan, R. Menon, P. Balamurali, M. Shailender, B. Neu, X. M. Ang, P. Zu, W. C. Wong, and K. C. Leong, "Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 169, pp. 167–172, 2012.
- [83] L. H. Chen, C. C. Chan, R. Menon, P. Balamurali, W. C. Wong, X. M. Ang, P. B. Hu, M. Shailender, B. Neu, P. Zu, Z. Q. Tou, C. L. Poh, and K. C. Leong, "Fabry-Perot fiber-optic immunosensor based on suspended layer-by-layer (chitosan/polystyrene sulfonate) membrane," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 188, pp. 185–192, 2013.
- [84] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, 1999.
- [85] B. Xu, Y. Yang, Z. Jia, and D. N. Wang, "Hybrid Fabry-Perot interferometer for simultaneous liquid refractive index and temperature measurement," *Opt. Express*, vol. 25, no. 13, pp. 14483–14493, 2017.
- [86] P. Chen and X. Shu, "Refractive-index-modified-dot Fabry-Perot fiber probe fabricated by femtosecond laser for high-temperature sensing," *Opt. Express*, vol. 26, no. 5, pp. 5292–5299, 2018.
- [87] A. D. Yablon, *Optical Fiber Fusion Splicing*. Springer, 2005.
- [88] Y. Wu, L. Xia, N. Cai, and L. Zhu, "A Highly Precise Demodulation Method for Fiber Fabry-Perot Cavity Through," vol. 30, no. 5, pp. 435–438, 2018.
- [89] M. F. Domingues, C. A. Rodriguez, J. Martins, C. Tavares, C. Marques, N. Alberto, P. André,

- and P. Antunes, "Cost-effective optical fiber pressure sensor based on intrinsic Fabry-Perot interferometric micro-cavities," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 42, no. February, pp. 56–62, 2018.
- [90] H. Qiu, F. Min, S. Zhong, X. Song, and Y. Yang, "Hypersonic force measurements using internal balance based on optical Hypersonic force measurements using internal balance based on optical micromachined Fabry-Perot interferometry," vol. 035004, 2018.
- [91] H. Wang, L. Jiang, and P. Xiang, "Improving the durability of the optical fiber sensor based on strain transfer analysis," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 42, no. February, pp. 97–104, 2018.
- [92] J. Yajun, X. Jian, Y. Dexing, Z. Kai, L. Dong, and Z. Jianlin, "Miniaturized fiber Fabry-Pérot interferometer for strain sensing," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 58, no. 6, pp. 1510–1514.
- [93] M. Arhant, N. Meek, D. Penumadu, P. Davies, and N. Garg, "Residual Strains using Integrated Continuous Fiber Optic Sensing in Thermoplastic Composites and Structural Health Monitoring," *Exp. Mech.*, vol. 58, no. 1, pp. 167–176, 2018.
- [94] Y.-J. Rao, M. Deng, D.-W. Duan, X.-C. Yang, T. Zhu, and G.-H. Cheng, "Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser," *Opt. Express*, vol. 15, no. 21, p. 14123, 2007.
- [95] P. Chen, X. Shu, and H. Cao, "Novel Compact and low-Cost Ultraweak Fabry-Perot Interferometer as a Highly Sensitive Refractive Index Sensor," *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 5, 2017.
- [96] W. Ma, J. Xing, R. Wang, Q. Rong, W. Zhang, Y. Li, J. Zhang, and X. Qiao, "Optical Fiber Fabry-Perot Interferometric CO<sub>2</sub> Gas Sensor Using Guanidine Derivative Polymer Functionalized Layer," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 5, pp. 1924–1929, 2018.
- [97] A. Lopez-Aldaba, J.-L. Auguste, R. Jamier, P. Roy, and M. Lopez-Amo, "Simultaneous and quasi-independent strain and temperature sensor based on microstructured optical fiber," vol. 36, no. 4, p. 1032331, 2017.
- [98] K. Cao, Y. Liu, and S. Qu, "Ultrasensitive fiber tilt sensor based on a mobile inscribed microbubble along the arc-shaped inwall of the microcavity," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 21, p. 4418, 2017.
- [99] J. B. Hawkes and R. W. Astheimer, "The temperature coefficient of the refractive index of water.," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 38, no. 9, pp. 804–6, 1948.
- [100] Y. H. Kim, S. J. Park, S.-W. Jeon, S. Ju, C.-S. Park, W.-T. Han, and B. H. Lee, "Thermo-optic coefficient measurement of liquids based on simultaneous temperature and refractive index sensing capability of a two-mode fiber interferometric probe," *Opt. Express*, vol. 20, no. 21, p. 23744, 2012.
- [101] X. D. Wang and O. S. Wolfbeis, "Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2008-2012)," *Anal. Chem.*, vol. 85, no. 2, pp. 487–508, 2013.
- [102] M. D. Marazuela and M. C. Moreno-Bondi, "Fiber-optic biosensors - An overview," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 372, no. 5–6, pp. 664–682, 2002.
- [103] S. Tierney, S. Volden, and B. T. Stokke, "Glucose sensors based on a responsive gel incorporated as a Fabry-Perot cavity on a fiber-optic readout platform," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 24, no. 7, pp. 2034–2039, 2009.

- [104] R. St-Gelais, G. MacKey, J. Saunders, J. Zhou, A. Leblanc-Hotte, A. Poulin, J. A. Barnes, H. P. Loock, R. S. Brown, and Y. A. Peter, "Gas sensing using polymer-functionalized deformable Fabry-Perot interferometers," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 182, pp. 45–52, 2013.
- [105] W. Xu, W. Bin Huang, X. G. Huang, and C. Y. Yu, "A simple fiber-optic humidity sensor based on extrinsic Fabry-Perot cavity constructed by cellulose acetate butyrate film," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 19, no. 6 PART A, pp. 583–586, 2013.
- [106] A. M. Gravagnuolo, E. Morales-Narváez, C. R. S. Matos, S. Longobardi, P. Giardina, and A. Merkoçi, "On-the-Spot Immobilization of Quantum Dots, Graphene Oxide, and Proteins via Hydrophobins," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 25, no. 38, pp. 6084–6092, 2015.

## APÉNDICE A. CÁLCULO DE ECUACIÓN DE REFLECTIVIDAD PARA UNA CAVIDAD FABRY-PEROT

En una cavidad FP con una señal incidente  $E_i$ , al llegar a la primera superficie semireflejante tendrá una reflexión  $E_0$  dada por:

$$E_0 = \sqrt{R_0} E_i, \quad (6.1)$$

donde  $R_0$  es el coeficiente de reflexión y se puede calcular con la ecuación (4.1). La señal transmitida  $E_1$  se puede escribir como:

$$E_1 = \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-R_0} E_i. \quad (6.2)$$

Después de recorrer  $L_1$ ,  $E_1$  será entonces:

$$E_2 = \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-R_0} e^{-j(knL_1)} E_i. \quad (6.3)$$

Al llegar a la superficie  $R_1$ , la señal se reflejará, entonces en este punto se puede expresar a  $E_2$  como:

$$E_3 = \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-R_0} \sqrt{R_1} e^{-j(knL_1+\varphi)} E_i, \quad (6.4)$$

luego, transitará la distancia  $L_1$  y se expresará como:

$$E_4 = \sqrt{1-\alpha_1} (1-\gamma_1) \sqrt{1-R_0} \sqrt{R_1} e^{-j(2knL_1+\varphi)} E_i. \quad (6.5)$$

Finalmente, se transmitirá a través de la superficie  $R_0$  y se obtendrá:

$$E_5 = (1-\alpha_1)(1-\gamma_1)(1-R_0) \sqrt{R_1} e^{-j(2knL_1+\varphi)} E_i \quad (6.6)$$

Sabemos que la interferencia estará dada por la suma de los campos:

$$E_{Interf} = E_1 + E_5 = E_i \left[ \sqrt{R_0} + (1-\alpha_1)(1-\gamma_1)(1-R_0) \sqrt{R_1} e^{-j(2knL_1+\varphi)} \right], \quad (6.7)$$

además, para calcular la reflectancia total se debe dividir el campo reflejado entre el campo incidente  $E_i$ :

$$R = \frac{E_{Interf}}{E_i} = \sqrt{R_0} + (1-\alpha_1)(1-\gamma_1)(1-R_0) \sqrt{R_1} e^{-j(2knL_1+\varphi)}. \quad (6.8)$$

De aquí, es posible calcular la irradiancia con la ecuación (2.11), tendremos entonces que:

$$I_R = E_T \cdot E_T^* \quad (6.9)$$

Calculando de (6.8) su complejo conjugado:

$$E_T^* = \sqrt{R_0} + (1 - \alpha_1)(1 - \gamma_1)(1 - R_0)\sqrt{R_1}e^{j(2knL_1 + \varphi)} \quad (6.10)$$

Sustituyendo (6.8) y (6.10) en (6.9):

$$R = R_0 + (1 - \alpha_1)(1 - \gamma_1)(1 - R_0)\sqrt{R_0 R_1} \left[ e^{j(2knL_1 + \varphi)} + e^{-j(2knL_1 + \varphi)} \right] + \dots \quad (6.11)$$

$$(1 - \alpha_1)^2 (1 - \gamma_1)^2 (1 - R_0)^2 R_1$$

Se sabe que de la fórmula de Euler podemos escribir al coseno como:

$$\cos \theta = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2} \quad (6.12)$$

Sustituyendo entonces a (6.12) en (6.11) tendremos finalmente que:

$$R = R_0 + (1 - \alpha_1)^2 (1 - \gamma_1)^2 (1 - R_0)^2 R_1 + 2(1 - \alpha_1)(1 - \gamma_1)(1 - R_0)\sqrt{R_0 R_1} \cos(2kn_0 L + \varphi) \quad (6.13)$$

## APÉNDICE B. PROGRAMAS DE MATLAB

```
%Simulación de la reflectividad en un FFPI; Carmen Domínguez; CIO
close all, clear all, clc
n1=1.4458; %Índice de refracción del núcleo
n0=1.0002926; %Índice de refracción cavidad
L=10e-6; %Longitud de la cavidad

for i=1:16000 %lambda variando de 1480 a 1620
    lambda(i)=1460+(i-1)*0.01;
    lambda(i)=lambda(i)*1e-9; %calcular longitudes de onda
    k(i)=2*pi./lambda(i);
end

for i=1:16000
    Ro=((n1-n0)/(n1+n0)).^2; %Cálculo coeficientes de reflexión
    T1(i)=1;
    T2(i)=(1-Ro)^2;
    T3(i)=2*(1-Ro).*cos((2*k(i)*L*n0)+pi);
    I(i)=Ro*(T1(i)+T2(i)+T3(i));
end

IdB=10*log10(I);
figure(1)
plot(lambda, IdB, 'b')
title('Reflectancia');
grid on
xlabel('lambda (m)'); ylabel('Reflectancia (dBm)')
xlim ([1.46e-6 1.62e-6])
```

---

```
%Simulación de la reflectividad en un FFPI de dos cavidades; Carmen
Domínguez; CIO
close all, clear all, clc
n1=1.4458; %Índice de refracción del núcleo
n0=1.0002926; %Índice de refracción cavidad
n2=1.0002926; %Índice de refracción a medir
L1=7e-6; %Longitud de la primera cavidad
L2=100e-6; %Longitud de la segunda cavidad

for i=1:16000 %lambda variando de 1480 a 1580
    lambda(i)=1460+(i-1)*0.01;
    lambda(i)=lambda(i)*1e-9; %calcular longitudes de onda
    k(i)=2*pi./lambda(i);
end

for i=1:16000
    Ro=((n1-n0)/(n1+n0)).^2; %Cálculo coeficientes de reflexión
    R1=Ro;
    R2=((n1-n2)/(n1+n2)).^2;
    T1=Ro;
    T2(i)=(1-Ro)*sqrt(Ro*R1)*2*cos((2*L1*n0*k(i))+pi);
```

```

T3(i)=(1-Ro)^2*(1-R1)*sqrt(R1*R2)*2*cos(2*L2*n1*k(i));
T4(i)=(1-Ro)*(1-R1)*2*sqrt(Ro*R2)*cos(2*k(i)*(L1*n0+L2*n1)+pi);
T5=(1-Ro)^2*(1-R1)^2*R2;
T6=(1-Ro)^2*R1;
I(i)=T1+T2(i)+T3(i)+T4(i)+T5+T6;
end

IdB=10*log10(I);
figure(1)
plot(lambda,IdB,'b')
title('Reflectancia');
grid on
xlabel('lambda (m)'); ylabel('Reflectancia (dBm)')
xlim ([1.46e-6 1.62e-6])

```

---

`%Programa para calcular longitudes de cavidades; Carmen Domínguez; CIO`

```

clc, clear, close all

```

```

d=load('G:\Esfuerzo 10um\Sin tensar.TXT'); %Leer datos
lambda=d(:,1); %Definición de vector de longitud de onda
lambda=lambda*1e-9;
R=d(:,2); %Definición de vector de reflectancia
R1=smooth(lambda,R,0.0099,'loess'); %Suavizado de datos

```

```

figure(1)
plot(lambda,R1,lambda,R)
title('Señal original y señal filtrada');
grid on
xlabel('Lambda[m]'); ylabel('Amplitud[a.u.]')

```

```

%% Encontrar la longitud de la cavidad con el método de los máximos

```

```

maximos = [ ]; %Definir el vector para máximos
%leemos desde el segundo elemento hasta el penúltimo
for k=2:length(R1)-1
if R1(k)>R1(k-1) && R1(k)>R1(k+1)
maximos(end+1)=R1(k); %Buscar máximos en Y
end
end
MaximosEnY=maximos; %Imprimir los maximos en Y
%Encontrar la posicion de maximos en X
for i=1:length(maximos)
xp(i)=interp1(R1,lambda,maximos(i));
end
MaximosEnX=xp %Imprimir los maximos en X
for i=1:(length(maximos)-1)
L(i)=xp(i)*xp(i+1)/(2*1*(xp(i)-xp(i+1))); %Calcular la long de la cavidad
con fórmula
end
LongCav=abs(L); %Imprimir longitudes estimadas de la cavidad
LongitudCavidadPicos=mean(LongCav) %Promedio

```

```

%% Encontrar la longitud de la cavidad con el método de la transformada
de Fourier
c=3e8; %Velocidad de la luz
lmax=max(lambda); %Valor de longitud de onda máxima
lmin=min(lambda); %Valor de longitud de onda mínima
deltalambda=(lmax-lmin)/length(lambda);
Fs=1/deltalambda; %Frecuencia de muestreo
Fn=Fs/2; %Frecuencia de Nyquist
Fi=c/lmax; %Frecuencia inferior
Ff=c/lmin; %Frecuencia superior
BWl=lmax-lmin; %Ancho de banda en longitud de onda
BWf=Ff-Fi; %Ancho de banda en frecuencia
Nlambda=BWl/deltalambda;
deltaf=BWf/Nlambda;
pf=length(lambda);
Nfft=pf;
deltat=1/(Nfft*deltaf); %Delta tiempo
f=Fi:deltaf:Ff-deltaf; %Definición del vector de frecuencia
t=0:deltat:999*deltat; %Definición del vector de tiempo
fc=f(round(length(f)/2)); %Definición de frecuencia central

figure(2) %Reflectancia vs frecuencia
plot(f,R1)
title('Reflectancia');
grid on
xlabel('Frecuencia[f]'); ylabel('Amplitud[a.u.]')

% y=ifft(R1); %Transformada inversa de Fourier (ifft) señal filtrada
y=ifft(R); %Transformada inversa de Fourier (ifft) señal original
y1=abs(y); %Valor absoluto de la ifft

figure(7) %Transformada Inversa de Fourier de la señal en tiempo
plot(t,y1(1:1000)) %Cambiar el valor de puntos si cambia el valor del
vector t
title('Transformada inversa de Fourier');
xlabel('Tiempo[s]'); ylabel('Amplitud[a.u.]')
grid on
[tlmax,hmax]=encuentramax(t,y1,[1e-13,0.5e-11]);%Encuentra el maximo 1
del pico de la ifft en el tiempo
tp=tlmax;
L=(tp*c)/2; %Calcular la longitud dado el maximo en tiempo
LongitudCavidadFurier=L

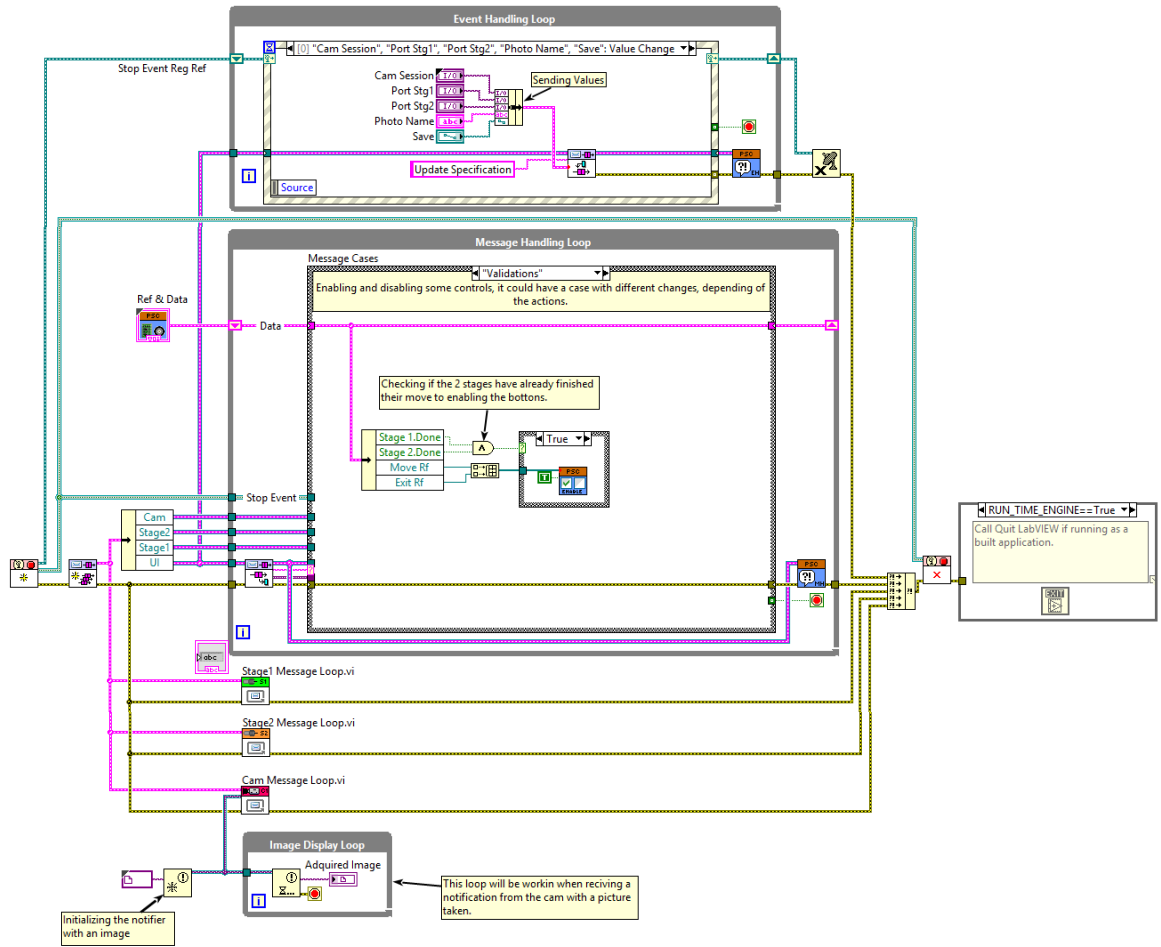
xl=(y1*c)/2; %Definir un vector para distancia dada la transformada
X=(t*c)/2; %Definir vector de distancia

figure(8) %Transformada Inversa de Fourier de la señal en distancia
plot(X,xl(1:1000)) %Cambiar el valor de puntos si cambia el valor del
vector t
grid on
title('Transformada inversa de Fourier');
xlabel('Longitud[m]'); ylabel('Amplitud[a.u.]')

```



# APÉNDICE C. PROGRAMA DE LABVIEW



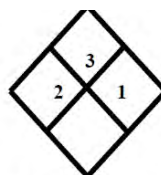
# APÉNDICE D. ESPECIFICACIONES POLYTE 8016

## IDENTIFICACION del PRODUCTO

Nombre comercial: POLYLITE® 8016

Familia del químico: Resina de poliéster no saturada en estireno

Intencional Usa: Resina para mármol



NFPA RATING

Salud:	2*
Flammability:	3
Reactivity:	1
Protección personal:	

HMIS RATING

## COMPOSICION/ INFORMACION En INGREDIENTES

O S H A	CAS Numera	CHEMICAL IDENTITY	EXPOSURE LIMITS				CARCINOGEN STATUS			
			ACGIH		OSHA		MFR.	IARC	NTP	OSHA
			TWA	STEL	PEL	STEL				
*	100-42-5	Styrene	20 ppm	40 ppm	100 ppm	NE	NE	Yes	NR	NR
	Nombre común: Concentración	El estireno 28.00 ±2 wt%								
	Propietario Concentración	Resina Poliester 72.00 ±2 wt%	NE	NE	NE	NE	NE	NR	NR	NR

## FUEGO MEDIDAS LUCHADORAS

<b>Punto de la llamarada:</b>	89° F (32 °C)
<b>Método del Punto de la llamarada Usó:</b>	SFCC
<b>Límites inflamables en Aire (Baja):</b>	1.1 % en aire Estireno
<b>Límites inflamables en Aire (Superior):</b>	7 % en aire Estireno
<b>Autoignition:</b>	914° F (490 °C) Estireno

**Peligros generales:** LÍQUIDO INFLAMABLE: El punto de inflamación de este material es inferior a 100°F (38°C).

**Medios de extinción de incendios:** Usar ácido carbólico, espuma, un producto químico seco o niebla de agua para apagar el incendio.

## PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

<b>Color:</b>	Transparente, incoloro
<b>Olor:</b>	Penetrante
<b>Umbral del olor:</b>	0.2 ppm Estireno
<b>Estado físico:</b>	Líquido
<b>Solubilidad en Agua:</b>	Insoluble at 20°C (68 °F)
<b>Vapor Presiona:</b>	6.12 (mm Hg) Estireno
<b>Gravedad específica:</b>	1.15 - 1.2 (Agua = 1) at 25°C (77 °F)
<b>Punto de ebullición:</b>	295° F (146 °C) Estireno
<b>Punto helado:</b>	-22.7°F (-30.4 °C) Estireno
<b>Evaporación Tasa:</b>	<1 (BuAc = 1) Estireno
<b>Densidad del vapor:</b>	3.6 (AIRE=1) Estireno
<b>% Volátil:</b>	28 % por peso
<b>VOC proporción:</b>	329 gramos/litro Producto (calculado) según suministro
<b>pH:</b>	No aplica
<b>Coefficiente de agua/ aceite:</b>	No aplica