



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Fabricación de filtros interferométricos de
fibra óptica y materiales poliméricos.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniera en Telecomunicaciones.

PRESENTA:

MILDRED SOCORRO CANO VELÁZQUEZ.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN ARNALDO HERNÁNDEZ CORDERO.



2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*"Nada está perdido si se tiene por fin el valor de proclamar
que todo está perdido y que hay que empezar de nuevo."*
Julio Cortázar

Agradecimientos

En definitiva, existen muchas personas que han colaborado en mi crecimiento personal y académico, tantas personas, que no me es posible agradecerles de forma particular a todas por sus contribuciones. Sin embargo, de ese extenso grupo, en esta oportunidad me gustaría manifestarles explícitamente mi agradecimiento a aquellas personas que constituyeron, directa o indirectamente, un pilar fundamental en mi vida durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

Más allá de un agradecimiento, hago un reconocimiento a mis padres, Paty y Leo, por regalarme la vida. Indudablemente, para ustedes ese regalo no fue únicamente concebirme, sino permitirme vivir mi vida con extensa libertad. Reciban mi eterno agradecimiento por esa libertad que me permitió forjar un carácter, una mentalidad y una personalidad propios; ya que, gracias a ello, he podido alcanzar todas mis metas. Estimado hermano, Jack, muchas gracias por ser mi fiel confidente, mi mejor amigo, por robarme una sonrisa siempre y ser capaz de iluminar hasta los días más grises. Gracias a los tres por estar presentes en estos veintitrés años y ser mis cómplices durante toda esta aventura; gracias familia por comprenderme, apoyarme, escucharme, pero sobre todo, gracias por corresponder el gran amor que les tengo.

Agradezco a la familia Nieto Rueda: Marco, Vero, Oli y Sra. Tere, por permitirme entrar a su hogar aun sin compartir lazo sanguíneo. La calidez, confianza, apoyo y amor que me brindaron durante esos momentos tan difíciles me permitieron continuar con mi carrera. Olvidarlos es algo que nunca podré hacer y lo que hicieron por mí es algo invaluable que nunca podré pagarles, los quiero mucho.

Por hacer mancuerna conmigo estos años, por motivarme a tomar nuevos retos, por ser tan excelente persona: ¡Muchas gracias, Joel! Agradezco inmensamente el que hayamos compartido esta etapa de crecimiento tan hermosa y enriquecedora. Recuerda que siempre serás mi mejor equipo.

A Javier y a Juan les agradezco ser mis amigos, porque a pesar del paso del tiempo y de los distintos caminos que hemos tomado, han estado incondicionalmente conmigo. Un placer conocerlos.

Sin duda, le agradezco a usted, Dr. Juan A. Hernández, la oportunidad de trabajar en su laboratorio. Toda esto ha sido una grata experiencia que me ha enseñado bastante en todos los sentidos, muchas gracias por confiar en mí.

En cuanto a mis compañeros de laboratorio: Amado, Beatriz, Natanael, Misaël, Moisés, Oswaldo, Reinher, Rodrigo, Violeta y Yadira, muchas gracias por sus enseñanzas, su apoyo, sus pláticas y, sobre todo, por hacer de mi estancia algo muy divertido y satisfactorio. **D**e forma particular, gracias Natanael por convertirte en alguien incondicional dentro y fuera del laboratorio.

El trato con usted, Dr. Geffroy, es una de las cosas más entrañables que me queda de este trabajo. **S**u apoyo en cuanto instalaciones es nada comparado con lo enriquecedor de sus pláticas y la posibilidad de compartir el espacio de trabajo con sus alumnos. **A**lfredo, gracias por el café y las inmensas charlas que traía consigo. **E**duardo, tengo muchas cosas que agradecerle, pero puedo resumir diciendo que 'Somos una cavidad FP'; fuiste totalmente significativo en este proceso.

Finalmente, agradezco a CONACYT por el apoyo financiero otorgado a través del proyecto 154464, así como a DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIT-IN102112.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo informar una novedosa técnica de fabricación de filtros interferométricos Fabry-Perot (FP) pasivos construidos de fibra óptica y material polimérico (Polidimetilsiloxano, PDMS) para su uso como filtros ópticos. Para su fabricación, una fibra monomodo es insertada en un tubo capilar que contiene PDMS y, posteriormente, en este polímero se genera una microburbuja; la punta de la fibra y las paredes de la burbuja son las superficies reflejantes que constituyen el interferómetro FP. Con el fin de asegurar la repetibilidad de la fabricación de los filtros FP, se utilizaron tres sistemas en conjunto: sistema de motores, visualización y adquisición de datos, los cuales controlan el proceso de fabricación. Considerando que el cambio en las dimensiones del dispositivo (distancia burbuja-fibra, tamaño de la burbuja) y las variaciones en el índice de refracción del material polimérico pueden registrarse en la señal reflejada por el filtro FP como eventos de interferometría, se analizó la dependencia del patrón de interferencia en función de las dimensiones de la cavidad FP y de la temperatura. En la tesis se presentan la técnica de fabricación, el desarrollo experimental, el análisis de datos y la caracterización espectral de estos filtros interferométricos FP pasivos, así como sus posibles aplicaciones en telecomunicaciones o dispositivos de sensado.

Prefacio

Hace algunos años, en el *Laboratorio de Sensores de Fibra Óptica y Fibras Láser del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM*, se intentaba incorporar nanotubos de carbono (NTC) como absorbedores saturables (SAINT, Saturable Absorber Incorporating Nanotubes) en fibras láser para la generación de pulsos cortos que permitieran la operación pulsada con amarre de modos pasivo.

A principio del año 2007 fue reportada una técnica conocida como *depósito ópticamente impulsado de NTC*, que consiste en depositar los NTC directamente sobre la punta de una fibra óptica, o en conectores de fibra óptica, utilizando la luz láser que se propaga en el interior de ésta [1]. De todas las posibles técnicas, en el laboratorio se optó por retomar la antes mencionada ya que ofrece grandes ventajas sobre otros métodos: sencillez, bajo costo y consumo bajo de NTC.

Fueron los intentos por desarrollar esta técnica, así como realizar un análisis más detallado de su funcionamiento para entender los mecanismos físicos detrás de la misma, los que llevaron a observar una serie de fenómenos de la irradiación de nanopartículas con luz láser. Cinco de estos fenómenos se abordan en la tesis '*Interacción de luz láser con micro- y nanoestructuras*' del compañero de laboratorio Reinher R. Pimentel [2]. Particularmente uno de los temas de esa tesis es la generación controlada de microburbujas, cuya técnica se basa en el calentamiento de una película de partículas depositadas en la punta de una fibra óptica [3].

La intención de fabricar un sensor de temperatura en el laboratorio y la atractiva técnica de generación de microburbujas se unieron para dar lugar a un nuevo proyecto [4]. Esto dio como resultado un dispositivo de fibra óptica y polidimetilsiloxano (PDMS) cuya respuesta espectral varía en función de la temperatura debido a la modificación de sus dimensiones, producto de la expansión térmica del material polimérico.

Después de observar la señal de respuesta del dispositivo fabricado y como consecuencia de mi formación académica nace este proyecto, en el cual se toman como precedentes los trabajos antes mencionados para aplicarlos en la Ingeniería en Telecomunicaciones. Específicamente, el proyecto surge de aprovechar el diseño, las características de la señal arrojada por el sensor de temperatura y las ventajas del mismo para la elaboración de filtros ópticos. ***El resultado: la presente tesis.***

Contenido

Agradecimientos	III
Resumen	V
Prefacio	VII
1 Introducción	1
1.1 Filtros para sistemas de comunicaciones ópticas.	2
1.1.1 Filtros basados en interferómetros Fabry-Perot(FP).	3
1.2 Objetivo.	4
1.2.1 Objetivos particulares.	4
1.3 Motivación.	5
Contenido.	1
2 Marco teórico	7
2.1 Principio de operación: Interferómetro Fabry -Perot.	7
2.1.1 Modelo matemático: Reflexiones múltiples.	9
2.2 Función de Airy.	14
2.2.1 Figuras de mérito.	16
2.3 Uso de la Transformada de Fourier Discreta.	19
2.3.1 Transformada Rápida de Fourier y MATLAB.	21
3 Fabricación de filtros interferométricos Fabry-Perot	23
3.1 Diseño y principio de operación del filtro interferométrico Fabry-Perot.	23
3.2 Materiales para la fabricación.	24
3.2.1 Fibra óptica.	24
3.2.2 Polidimetilsiloxano,PDMS	25
3.3 Arreglo experimental.	26
3.4 Fabricación de filtros.	27
3.4.1 Preparación de la muestra.	27
3.4.2 Generación de la burbuja.	29

3.4.3	Alineación y configuración final de la punta de prueba.	31
3.5	Resultados y discusión.	32
4	Análisis y caracterización espectral.	39
4.1	Obtención de la señal reflejada.	40
4.2	Comparación con la respuesta teórica.	41
4.2.1	Análisis del comportamiento del filtro óptico.	51
4.3	Uso de la Transformada de Fourier.	52
4.4	Resultados: Caracterización espectral en función de las dimensiones del dispositivo.	56
5	Variaciones en la respuesta espectral de los filtros en función de la temperatura.	59
5.1	Arreglo experimental y adquisición de datos.	59
5.2	Experimento de un ciclo de ascenso y descenso de temperatura.	61
5.3	Múltiples ciclos de ascenso y descenso de temperatura.	67
5.3.1	Resultados para la punta de prueba N°5.	71
5.3.2	Resultados para la punta de prueba N°7.	78
5.3.3	Análisis comparativo entre las puntas de prueba.	84
5.4	Experimento a temperatura constante.	85
5.4.1	Conclusiones.	86
6	Conclusiones.	93
6.1	Prospección a futuro.	97
A	Micro-calentador de fibra óptica.	99
B	Especificaciones de los materiales utilizados.	101
B.1	Fibra óptica SMF28e de la marca Corning.	101
B.2	PDMS Sylgard 184.	101
C	Equipo utilizado.	105
C.1	MTS50-Z8 Thorlabs	105
C.1.1	multimotor.vi	107
C.2	Interrogador SM125	108
C.2.1	VI's de adquisición de datos para la fabricación.	110
C.2.2	VI's de adquisición de datos para la caracterización térmica.	111
C.2.3	VI de análisis de datos: anatem.vi.	112
D	Obtención de los factores de corrección.	115
E	Trabajos presentados.	121

Capítulo 1

Introducción

El incremento en los últimos años de los nuevos servicios multimedia y la extensión de su utilización por un sector importante de los usuarios han provocado un inmenso aumento en el tráfico que las redes de telecomunicaciones deben soportar. Este aumento de tráfico a su vez se ha traducido en una necesidad de mayor ancho de banda en los sistemas de comunicación. Tal ha sido la demanda de capacidad que incluso los sistemas ópticos han sufrido dicha problemática; contrastando este hecho con el enorme ancho de banda potencial disponible en su medio de transmisión: la fibra óptica.

De todas las posibles soluciones que se han planteado a los grandes requerimientos de ancho de banda, la multiplexación por división en longitud de onda (WDM, 'Wavelength Division Multiplexing') [5] es la que, en la actualidad, se considera técnicamente más factible. A diferencia de los sistemas que envían una única señal a través de la fibra óptica, los sistemas WDM aprovechan el enorme ancho de banda del medio y, además, permiten una evolución flexible y económica de las redes actuales. Esta técnica de multiplexación consiste en la transmisión, sobre una misma fibra, de múltiples portadoras ópticas moduladas, cada una de ellas centrada en diferente longitud de onda. Gracias a ello, se amplía la capacidad de transmisión aparente en la fibra, pues esta capacidad se ve multiplicada por el número de canales soportados [6].

La evolución en los sistemas WDM se ha logrado debido a las mejoras en los dispositivos ópticos, como son las fibras ópticas, las fuentes de luz, los fotodetectores y, principalmente, el desarrollo de nuevos dispositivos para el multiplexaje y demultiplexaje. La importancia de los dispositivos de multiplexaje radica en que de ellos depende la separación y el aislamiento entre canales y, por lo tanto, ayudan a evitar la interferencia dentro del sistema.

Los multiplexores y demultiplexores [7] de los sistemas WDM requieren forzosamente de algún dispositivo selectivo de longitud de onda, que es, en la mayoría de los casos, un filtro óptico. Es por eso que el estudio, investigación y desarrollo

de distintos tipos de filtros ópticos ha tomado una gran importancia. Existen filtros basados en dispersión, absorción selectiva, transmisión, reflexión e interferométricos. Este primer capítulo tiene como meta darle al lector una visión general de lo ya existente en materia de filtros ópticos y, posteriormente, plantear el objetivo y la motivación de este trabajo.

1.1 Filtros para sistemas de comunicaciones ópticas.

Un filtro óptico [6] es un dispositivo capaz de seleccionar una banda de longitudes de onda a transmitirse, y de eliminar, evitando su paso, el resto de longitudes de onda que quedan fuera de dicha banda. Existen diversos tipos de filtros ópticos para los sistemas WDM [7] y, con el objetivo de plantear un panorama general de esta diversidad, a continuación son descritos los principios de operación de algunos de ellos.

1. Filtros acústico-ópticos: Son filtros interferométricos y en éstos, ondas de radiofrecuencia pasan a través de un transductor que consiste en un cristal piezoeléctrico que convierte las ondas sonoras en un movimiento mecánico. Las ondas sonoras cambian el índice de refracción, lo cual posibilita al cristal para actuar como una rejilla de difracción. Esto ocasiona que, al cambiar las ondas de radiofrecuencia, se pueda seleccionar una única longitud de onda para que pase a través del material. El resto de longitudes de onda se difractan a otras direcciones impidiéndose su transmisión por el canal de comunicaciones.
2. Rejillas de difracción: Consta de una capa plana de material transparente con una secuencia de surcos paralelos grabados en él. La rejilla separa la luz en sus distintas longitudes de onda mediante la reflexión en todos los ángulos de la luz que incide en el grabado. Esto permite seleccionar la longitud de onda deseada ubicando un filtro sintonizable a la longitud de onda y ángulo adecuados.
3. Rejillas de Bragg: En éstas es fotoinducida una variación periódica del índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica. La rejilla reflejará, a la fuente, una longitud de onda determinada mientras que el resto de longitudes de onda serán transmitidas.
4. Interferómetro Mach-Zender (MZI): En éste, la longitud del camino óptico de una de las guías de ondas se controla mediante un retardo ajustable en una de las dos ramas del interferómetro, debido a esto, es capaz de producir una diferencia de fase de 180° entre las dos señales cuando éstas se recombinan. Las longitudes de onda para las que la diferencia de fase es precisamente de 180° , son filtradas. Construyendo una cadena con estas longitudes se puede seleccionar la longitud de onda deseada.

1.1. FILTROS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.

5. Filtros AWG (Arrayed Waveguide Gratings): Es una generalización del MZI, pero, en lugar de tener únicamente dos caminos, este dispositivo cuenta con un grupo de guías de onda entre la entrada y la salida.
6. Filtros Fabry-Perot (FFP) [8]: Esencialmente, consta de una cavidad de una longitud determinada, formada por un material con un índice de refracción confinado entre dos superficies que son altamente reflectivas debido al cambio de índice en la interfaz. Cuando la señal entra a esta cavidad, es reflejada entre las paredes que la conforman y, debido a la interferencia entre las señales reflejadas, únicamente algunas longitudes de onda se transmiten.

Considerando los requerimientos de los sistemas WDM, los filtros interferométricos FP representan una opción comúnmente adoptada debido a su capacidad resolutive, ya que son capaces de separar canales adyacentes, aun si sus longitudes de onda son muy cercanas. Por esta razón en el presente trabajo se hará un mayor énfasis en este tipo de filtros ópticos.

1.1.1 Filtros basados en interferómetros Fabry-Perot(FP).

El principio de funcionamiento de un interferómetro Fabry-Perot puede explicarse de la siguiente forma: el campo eléctrico de entrada incide sobre el dispositivo en la primer superficie reflectiva, de tal manera que parte del campo se refleja; la parte que se transmite a la cavidad penetra en el medio material que la forma hasta llegar a la segunda superficie. Una vez aquí, parte sale de la cavidad y otra parte se refleja, realimentándose y propagándose de nuevo a través del medio de la cavidad y así sucesivamente. La señal a la salida total de la segunda superficie está formada por la superposición de la amplitud compleja (interferencia) de los campos eléctricos que salen de la cavidad.

Debido a la respuesta periódica que ofrecen, a su gran selectividad de canales, y a su versatilidad, ha habido un amplio interés en el estudio de filtros ópticos basados en el principio de operación de un interferómetro Fabry-Perot. Prueba de ello son las múltiples maneras en las que se pueden implementar este tipo de filtros. Algunas de ellas se exponen a continuación.

1. Etalón [8]: El etalón es un dispositivo hecho con un material de paredes reflejantes (típicamente vidrio). La longitud de onda que se transmite puede seleccionarse ajustando tanto el índice de refracción como la separación entre las superficies reflejantes. Los ajustes de estos dos factores suelen hacerse modificando la temperatura del dispositivo ya que esto induce cambios en el índice de refracción y expansión (cambio de la separación entre las superficies reflejantes) del material. Un ejemplo de etalón sintonizable de forma mecánica es el filtro Fabry-Perot de óptica integrada.

2. Filtros de anillo resonante [9]: Son cavidades resonantes por las que circula la luz en un camino cerrado a una longitud de onda determinada. Cuando una guía de onda recta se sitúa tangente a otra guía con forma de anillo, los fotones que viajan a lo largo de la guía recta se desvían al anillo. En este punto, cuando la frecuencia de los fotones coincide con la frecuencia de resonancia del anillo, o es múltiplo de ella, éstos pueden transmitirse por el anillo varias veces.
3. Filtros multicapa dieléctricos [9] o de capa fina: Son filtros semejantes a las rejillas de Bragg, con la excepción de que se fabrican depositando capas de bajo y alto índice de refracción sobre una capa de sustrato, de forma alternada; debido a esta alternancia en índices de refracción, se ocasiona un interferómetro FP de múltiples cavidades.
4. Filtros antirreflejantes: Este tipo de filtros funcionan bajo el mismo principio que los dieléctricos; sin embargo, los recubrimientos antirreflejantes se utilizan para conseguir que la mayor parte de la luz incidente se transmita y no se pierda por reflexión. Las superficies antirreflejantes se logran recubriendo de vidrio una capa delgada de material dieléctrico.
5. Filtros FP de baja reflectividad: Este tipo de filtros funcionan creando una cavidad con dos paredes de baja reflectividad. El ejemplo más claro de este tipo de filtros es la alineación de dos fibras monomodo, en cuyo caso las paredes de la cavidad son resultado de que las fibras estén pulidas; este arreglo arroja un patrón de interferencia que es modificable variando la distancia entre fibras.

Como resultado de la sencillez y buena respuesta de los filtros FP de baja reflectividad, estos filtros ópticos han destacado y provocado gran interés, por lo cual, no es raro que el objetivo del presente trabajo gire en torno al desarrollo de un dispositivo de este tipo.

1.2 Objetivo.

Este trabajo tiene por objetivo fabricar filtros basados en resonadores Fabry-Perot de baja reflectividad (o pasivos) construidos con fibras ópticas embebidas en un material polimérico que experimenta expansión térmica (Polidimetil Siloxano: PDMS). Asimismo, caracterizar el comportamiento de los filtros para después analizar la factibilidad de utilizar este dispositivo en sistemas de comunicaciones ópticas.

1.2.1 Objetivos particulares.

- Fabricar los filtros interferométricos Fabry-Perot de baja reflectividad, garantizando que el proceso de elaboración sea controlable.

1.3. MOTIVACIÓN.

- Caracterizar el comportamiento espectral de los filtros en función de las dimensiones del dispositivo.
- Caracterizar el comportamiento espectral de los filtros en función de las variaciones de temperatura.
- Comparar los resultados obtenidos con las respuestas de otros filtros FP pasivos para concluir si existen mejoras con respecto a trabajos previos.
- Concluir con respecto a la viabilidad de utilizar este tipo de filtros en sistemas de comunicaciones ópticas WDM.

1.3 Motivación.

Anteriormente se ha dicho que un filtro FP es comúnmente utilizado en los sistemas WDM y que hay una amplia gama consolidada de este tipo de filtros; y, entonces, ¿qué motivó la realización de este trabajo?

Si bien es cierto que existe una gran cantidad de filtros FP comerciales, el presente trabajo fundamenta su motivación en las posibles ventajas del dispositivo que se propone, ya que es un filtro pasivo, de fabricación sencilla, de bajo costo, de pequeñas dimensiones, compatible con sistemas de fibra óptica debido a su fácil conexión y capacidad de sintonización.

Otro aspecto a destacar es que, aunque el filtro propuesto parte de un principio físico muy comúnmente usado, el agregar en su fabricación la utilización de un polímero hace de él un dispositivo versátil. El uso del material polimérico implica, entre otras cosas, que no se necesita de un dispositivo mecánico adicional para la modificación de las dimensiones de la cavidad pues estas variaciones pueden ser inducidas por la expansión térmica del polímero.

Aunque este trabajo se centra en evaluar el desempeño de los dispositivos fabricados desde la perspectiva de su utilización en sistemas WDM, esta no es la única aplicación de este tipo de filtros. El hecho de poder utilizarse también como cavidades resonantes para la sintonización de longitudes de onda en un láser, como filtros peine (*comb*) o como sensor de temperatura, hacen que este trabajo tenga como motivación adicional la versatilidad de aplicaciones.

Es de importancia decir que en gran medida, el motivo de llevar a cabo este trabajo de tesis fue la posibilidad de realizarlo de forma multidisciplinaria, conjuntando desde principios físicos básicos hasta conceptos propios de la ingeniería en telecomunicaciones, pasando por todo el aprendizaje que conlleva el trabajo en laboratorio y el fabricar de forma completa un dispositivo.

Capítulo 2

Marco teórico

En este segundo capítulo se hará la explicación de algunos conceptos teóricos que proporcionarán las nociones básicas acerca de las cavidades Fabry-Perot. Asimismo, se desarrollará el análisis matemático del fenómeno que ocurre en la cavidad para justificar la función de respuesta espectral característica de los filtros FP: Función de Airy. Se mencionarán también conceptos referentes a la respuesta del interferómetro Fabry-Perot, como lo son: patrón de interferencia o interferograma, fineza, selectividad, separación entre máximos del patrón de interferencia ($\Delta\lambda$), entre otros. Y, finalmente, se hablará a grandes rasgos del concepto de la transformada de Fourier; la cual, en este caso particular, se utiliza para cuantificar el $\Delta\lambda$ y el número de máximos existentes en la respuesta en frecuencia del filtro.

2.1 Principio de operación: Interferómetro Fabry -Perot.

Una cavidad Fabry-Perot se compone por dos espejos planos parcialmente reflectivos espaciados a una distancia fija l . Cuando la distancia de la cavidad puede variarse debido al movimiento de uno de los espejos, se llama interferómetro Fabry-Perot (FPI, *Fabry-Perot Interferometer*) [10]. La versión más clásica de la cavidad FP se muestra en la figura 2.1 [11], la cual está construida en óptica de bulto y es comúnmente utilizada para la selección de líneas en un láser.

Debido a que la cavidad FP es una cavidad resonante, el campo electromagnético debe anularse en un espejo perfecto; esto implica que dentro de la cavidad sólo pueden existir ondas del campo electromagnético que se anulan en las paredes y, por tanto, se establece una selección de longitud de ondas, las cuales son denominadas como modos longitudinales de la cavidad. Estos se ilustran en la figura 2.2 [11].

Dicho lo anterior, se puede resumir que los filtros de Fabry-Perot están basados en una cavidad FP en la cual una onda de luz monocromática incide sobre un espejo en un ángulo normal a éste para posteriormente experimentar múltiples reflexiones dentro de los espejos sin escapar de la cavidad. La distribución de la

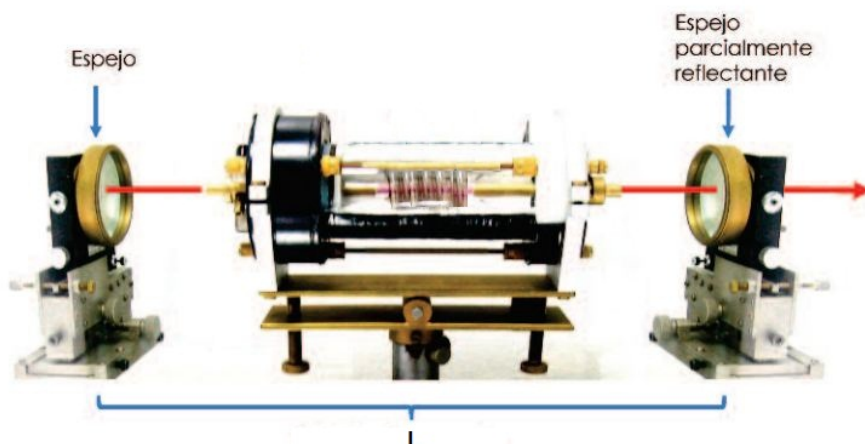


Figura 2.1: Cavidad Fabry-Perot, cavidad resonante de un láser.

intensidad de la luz que viaja entre los espejos retrata un patrón de ondas estacionarias con las habituales regiones de alta y baja intensidad, denominado patrón de interferencia, en donde se ponen de manifiesto los modos longitudinales del filtro. Es importante mencionar que la selección de los modos de este patrón está relacionada directamente con la distancia entre los espejos.

En los filtros Fabry-Perot la cavidad permanece fija si se desea que siempre se filtren las mismas longitudes de onda y, si se desea convertirlo en un filtro sintonizable, las características geométricas de la cavidad tienen que ser variables, es decir, estos filtros deben basarse en un interferómetro FP. Entonces, se ahondará en la explicación del FPI, debido a que en este trabajo se hablará de filtros con capacidad de sintonización.

Existen dos enfoques útiles para la determinación del modelo matemático del interferómetro Fabry-Perot. El primer enfoque se basa en la óptica de ondas, donde se analizan los modos de las frecuencias de resonancia y las funciones de la onda óptica en los filtros Fabry-Perot [12]. Y el segundo enfoque está basado en la teoría electromagnética y consta del análisis matricial de un medio embebido entre capas, o de reflexiones múltiples. Cabe destacar que ambos enfoques no son mutuamente excluyentes y las teorías desplegadas en cada uno pueden traslaparse. En este trabajo se utilizará el modelo matemático derivado a partir de reflexiones múltiples.

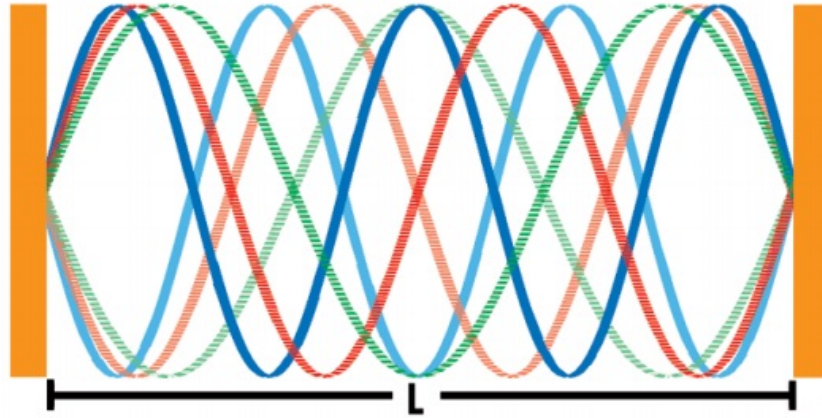


Figura 2.2: Modos longitudinales en una cavidad FP, donde se observa que el campo eléctrico es cero en los espejos.

2.1.1 Modelo matemático: Reflexiones múltiples.

El modelo de reflexiones múltiples permite la superposición coherente de un número arbitrario de espejos planos, en paralelo, parcialmente reflectivos y libres de absorción. Estas características lo hacen equivalente a la concepción matricial usada para multicapas de películas delgadas, con la diferencia de que agrega índices de refracción en los coeficientes de reflexión.

Las grandes ventajas del método de múltiples reflexiones son que permite la obtención de un modelo teórico que representa la respuesta espectral del FPI con gran exactitud y que permite superponer el modelo simple de dos espejos para obtener la respuesta de arreglos de mayor complejidad. Esto facilita, entre otras cosas, los procedimientos numéricos que para otros métodos son complejos y extensos. En contraparte, la desventaja de este modelo es que no considera pérdidas por absorción, esparcimiento, desalineación de los espejos y difracción.

Consideraciones generales.

Se suponen N espejos parcialmente reflejantes, planos, paralelos y de un grosor nulo numerados de $i = 1, 2, \dots, N$ de forma secuencial, como se muestra en la figura 2.3 para un arreglo de dos espejos ($N = 2$). En esta misma figura se ilustran los campos eléctricos asociados a las ondas que se reflejan y se transmiten derivadas de las reflexiones múltiples que experimenta la señal después de incidir en el interferómetro FP.

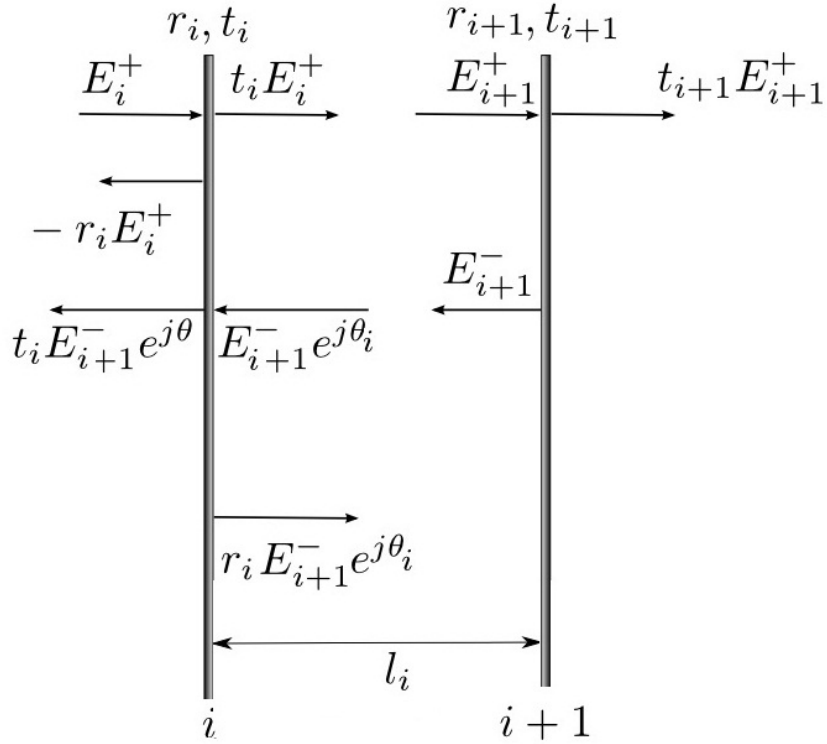


Figura 2.3: Múltiples reflexiones en el interferómetro Fabry-Perot de $N=2$ espejos.

La nomenclatura en la figura representa:

- i es el número del espejo.
- r_i, t_i son las amplitudes de los coeficientes de reflexión y transmisión del espejo i , respectivamente.
- l_i es la longitud de la cavidad FP, la distancia entre los espejos i e $i + 1$
- E_i^+ es la amplitud del campo eléctrico que incide por el lado izquierdo en el espejo i , propagándose a la derecha; es decir, de la onda que incide en el interferómetro FP.
- E_i^- es la amplitud del vector de campo eléctrico en el lado izquierdo del espejo i de la onda que se propaga hacia la izquierda; es decir, de la onda reflejada por el dispositivo.
- θ_i es el desfase que experimenta el haz de luz al atravesar cavidad formada por los espejos i e $i + 1$.

2.1. PRINCIPIO DE OPERACIÓN: INTERFERÓMETRO FABRY -PEROT.

Para calcular los coeficientes de reflexión y transmisión se considera:

$$r = \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} + n_i} \quad (2.1)$$

$$r^2 + t^2 = 1 \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.1) n es el índice de refracción del medio por lo que los signos de r son opuestos para los rayos incidentes por el lado izquierdo y para los que inciden por el derecho del espejo. La ecuación (2.2) está definida por la conservación de la energía bajo la suposición de que no hay pérdidas.

El arreglo mostrado en la figura 2.3 es útil para obtener las ecuaciones que representan los campos eléctricos que se transmiten y/o se reflejan en el i -ésimo espejo. Nótese que esta representación permitirá superponer los efectos de otros espejos que podrían estar a la derecha o a la izquierda del arreglo; es decir, espejos múltiples. Los campos eléctricos incidentes en el espejo i pueden obtenerse como:

$$E_{i+1}^+ e^{-j\theta_i} = t_i E_i^+ + r_i E_{i+1}^- e^{j\theta_i} \quad (2.3)$$

$$E_i^- = -r_i E_i^+ + t_i E_{i+1}^- e^{j\theta_i} \quad (2.4)$$

En las ecuaciones (2.3) y (2.4) queda implícito que se está manteniendo la consideración de que no existen pérdidas.

Despejando de la ecuación (2.3) a E_i^+ :

$$E_i^+ = \left(\frac{1}{t_i} \right) \left(E_{i+1}^+ e^{-j\theta_i} - r_i E_{i+1}^- e^{j\theta_i} \right) \quad (2.5)$$

sustituyendo la ecuación (2.5) en la ecuación (2.4), se tiene:

$$E_i^- = \left(-\frac{r_i}{t_i} \right) E_{i+1}^+ e^{-j\theta_i} + \left(\frac{r_i^2}{t_i} + t_i \right) E_{i+1}^- e^{j\theta_i}$$

considerando la ecuación de la conservación de la energía (2.2), se obtiene que:

$$E_i^- = \left(-\frac{r_i}{t_i} \right) E_{i+1}^+ e^{-j\theta_i} + \left(\frac{1}{t_i} \right) E_{i+1}^- e^{j\theta_i} \quad (2.6)$$

Elaborando con las ecuaciones (2.5) y (2.6) un arreglo matricial, este queda de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_i} \begin{bmatrix} e^{-j\theta_i} & -r_i e^{j\theta_i} \\ -r_i e^{-j\theta_i} & e^{j\theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i+1}^+ \\ E_{i+1}^- \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A partir de esta expresión (2.7), es posible generalizar el modelo para N espejos paralelos. Específicamente, podemos escribir:

$$\begin{bmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{bmatrix} = \frac{1}{\prod_{i=1}^{N-1} t_i} \begin{bmatrix} e^{-j\theta_i} & -r_i e^{j\theta_i} \\ -r_i e^{-j\theta_i} & e^{j\theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\theta_{i+1}} & -r_{i+1} e^{j\theta_{i+1}} \\ -r_{i+1} e^{-j\theta_{i+1}} & e^{j\theta_{i+1}} \end{bmatrix} \cdots \\ \cdots \begin{bmatrix} e^{-j\theta_{N-1}} & -r_{N-1} e^{j\theta_{N-1}} \\ -r_{N-1} e^{-j\theta_{N-1}} & e^{j\theta_{N-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix}$$

o equivalentemente:

$$\begin{bmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{bmatrix} = \frac{1}{\prod_{i=1}^{N-1} t_i} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Donde A, B, C y D son los coeficientes del resultado de la multiplicación de $N-1$ matrices.

La amplitud de transmisión para un arreglo de N espejos está dado por:

$$\begin{aligned} t &= \frac{E_{N+1}^+}{E_1^+} = t_N \left(\frac{E_N^+}{E_1^+} \right) \\ &= \prod_{i=1}^N t_i \left(\frac{E_N^+}{A E_N^+ + B E_N^-} \right) \\ t &= \frac{\prod_{i=1}^N t_i}{A - r_N B} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Las ecuaciones obtenidas en este apartado serán las utilizadas en las siguientes secciones, las cuales se enfocan a los arreglos interferométricos de dos y tres espejos.

Interferómetro FP de dos espejos.

Para este caso $N = 2$ y utilizando las ecuaciones obtenidas previamente, tenemos que:

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1} \begin{bmatrix} e^{-j\theta_1} & -r_1 e^{j\theta_1} \\ -r_1 e^{-j\theta_1} & e^{j\theta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2^+ \\ E_2^- \end{bmatrix}$$

de donde se obtiene que:

$$\begin{aligned} A &= e^{-j\theta_1} \\ B &= -r_1 e^{j\theta_1} \end{aligned}$$

Sustituyendo estos valores en la ec. (2.9) se tiene que:

$$\begin{aligned} t &= \frac{\prod_{i=1}^2 t_i}{e^{-j\theta_1} - r_2 (-r_1 e^{j\theta_1})} \\ t &= \frac{t_1 t_2}{e^{-j\theta_1} + r_2 r_1 e^{j\theta_1}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.1. PRINCIPIO DE OPERACIÓN: INTERFERÓMETRO FABRY -PEROT.

La intensidad transmitida a través del arreglo puede obtenerse haciendo:

$$\frac{I_t}{I_i} = (t)(t^*) \quad (2.11)$$

Utilizando la ecuación (2.10) y simplificando, el equivalente de la expresión (2.11) es:

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{t_1^2 t_2^2}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(2\theta_1)} \quad (2.12)$$

Experimentalmente es común utilizar las señales que se reflejan del interferómetro. La intensidad de dichas señales reflejadas puede obtenerse a partir de la ecuación (2.12) considerando de nuevo la ecuación (2.2); con esto se obtiene que:

$$\frac{I_r}{I_i} = 1 - \frac{I_t}{I_i} \quad (2.13)$$

Sustituyendo (2.12) en (2.13) tenemos:

$$\boxed{\frac{I_r}{I_i} = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(2\theta_1)}{1 + (r_1 r_2)(r_1 r_2 + 2\cos(2\theta_1))}} \quad (2.14)$$

Esta expresión representa la intensidad de reflexión para el patrón de interferencia, en donde:

$$\theta_i = \frac{2\pi n_i l_i}{\lambda}$$

l_i es la longitud de la cavidad FP y λ es la longitud de onda de la luz incidente.

Interferómetro FP de tres espejos.

En este caso $N = 3$, por lo que:

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1 t_2} \begin{bmatrix} r_1 r_2 e^{j\theta_1} e^{-j\theta_2} + e^{-j\theta_1} e^{-j\theta_2} & -r_1 e^{j\theta_1} e^{j\theta_2} - r_2 e^{-j\theta_1} e^{j\theta_2} \\ -r_1 e^{-j\theta_1} e^{-j\theta_2} - r_2 e^{j\theta_1} e^{-j\theta_2} & r_1 r_2 e^{-j\theta_1} e^{j\theta_2} + e^{j\theta_1} e^{j\theta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3^+ \\ E_3^- \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

de la ecuación (2.15) se obtiene que:

$$\begin{aligned} A &= e^{(-j\theta_1 - j\theta_2)} + r_1 r_2 e^{(j\theta_1 - j\theta_2)} \\ B &= -r_1 e^{(j\theta_1 + j\theta_2)} - r_2 e^{(-j\theta_1 + j\theta_2)} \end{aligned}$$

Sustituyendo estos valores en la ec. (2.9) se tiene que:

$$t = \frac{t_1 t_2 t_3}{e^{(-j\theta_1 - j\theta_2)} + r_1 r_2 e^{(j\theta_1 - j\theta_2)} + r_2 r_3 e^{(-j\theta_1 + j\theta_2)} + r_1 r_3 e^{(j\theta_1 + j\theta_2)}} \quad (2.16)$$

Obteniendo la intensidad de transmisión con la ecuación (2.11) se tiene:

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{(t_1 t_2 t_3)^2}{D} \quad (2.17)$$

donde:

$$D = 1 + (r_1 r_2)^2 + (r_2 r_3)^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos(2\theta_1) + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos(2\theta_2) \\ + 2r_1 r_3 \cos(2\theta_1 + 2\theta_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos(2\theta_1 - 2\theta_2)$$

Y al considerar la ecuación (2.2) en la (2.17), finalmente se sabe que:

$$\boxed{\frac{I_r}{I_i} = \frac{N}{D}} \quad (2.18)$$

donde:

$$N = r_2 + r_3^2 + r_1^2 (1 + r_2^2 r_3^2) + 2r_2 [r_1 (1 + r_3^2) \cos(2\theta_1) + r_1 r_2 r_3 \cos(2\theta_1 - 2\theta_3) \\ + (1 + r_2^2) r_3 \cos(2\theta_3) + 2r_1 r_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)]$$

$$D = (1 + r_2^2 r_3^2 + r_1^2) (r_2^2 + r_3^2) + 2r_2 [r_1 (1 + r_3^2) \cos(2\theta_1) + r_1 r_2 r_3 \cos(2\theta_1 - 2\theta_3) \\ + (1 + r_2^2) r_3 \cos(2\theta_3) + 2r_1 r_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)]$$

2.2 Función de Airy.

Como se ha mencionado, el interferómetro FP forma su patrón de interferencia con base en las múltiples reflexiones entre dos superficies planas y paralelas, por lo tanto la interferencia no es únicamente entre dos frentes de onda, sino entre un número mayor de ellas. Con este tipo de interferencia múltiple el patrón de interferencia ya no tiene perfil sinusoidal, sino un perfil muy angosto, aumentando así la precisión con que se puede medir la forma y posición de los máximos de transmisión. El estudio a lo largo de los años del interferómetro FP ha permitido definir, por diversos métodos, que la función que describe este patrón de interferencia debido a múltiples reflexiones corresponde a la *Función de Airy*, representada matemáticamente por la expresión (2.19):

$$A(\delta) = \frac{I_t}{I_i} = \frac{1}{1 + F \operatorname{sen}^2(\delta/2)} \quad (2.19)$$

2.2. FUNCIÓN DE AIRY.

en donde:

$$F = \left(\frac{2r}{1-r^2} \right)^2 = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (2.20)$$

$$R = r^2$$

$$T = t^2$$

$$\delta = \frac{4\pi n_i l_i}{\lambda}$$

Realizando el álgebra pertinente puede demostrarse que las ecuaciones que se obtuvieron con el método matricial para la distribución de la intensidad de flujo transmitido y reflejado por el interferómetro Fabry-Perot son equivalentes a la *Función de Airy* y a su complementaria, respectivamente.

La función de Airy, así como sus variaciones con respecto a los parámetros de los que depende, se muestran gráficamente en la figura 2.4; mientras que en la figura 2.5 se muestra la gráfica respectiva a la intensidad reflejada [10].

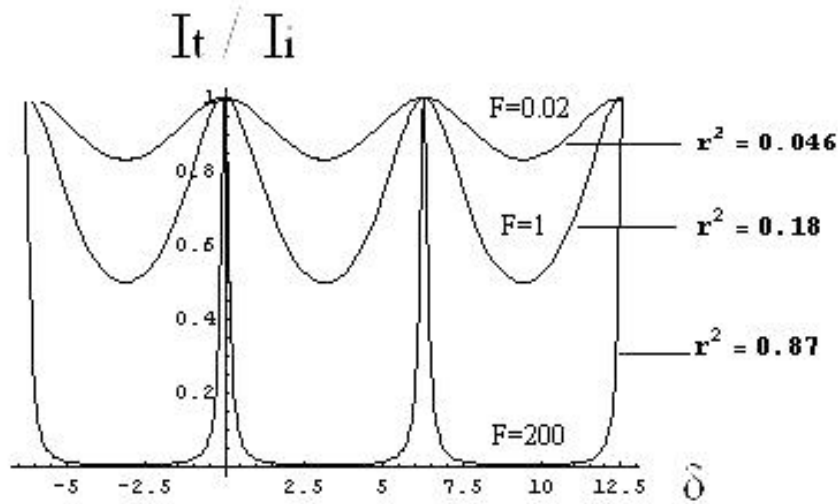


Figura 2.4: Función de Airy. Distribución de la intensidad transmitida por un interferómetro FP.

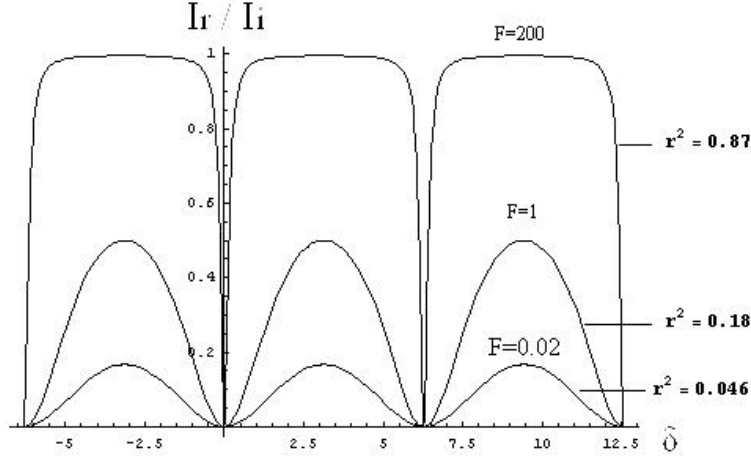


Figura 2.5: Complemento de la función de Airy ($1 - \frac{I_r}{I_i}$). Distribución de la intensidad reflejada por un interferómetro FP.

Como se observa en la figura 2.4, cuando $\delta/2 = m\pi$ la *Función de Airy* es igual a la unidad para todos los valores de F y por lo tanto de r . Al aproximarse r a uno, la densidad de flujo transmitido es muy pequeña, excepto dentro de máximos agudos centrados en los puntos $\delta/2 = m\pi$ [10]. Como δ es función de l_i, n_i y λ , la periodicidad también es función de estos parámetros. Es por eso que haciéndolos variar se pueden obtener patrones de interferencia distintos.

En la parte experimental de este trabajo se esperan como resultado patrones de interferencia que se asemejen a la *Función de Airy*, los cuales se modificarán variando la longitud de la cavidad l_i y el índice de refracción n_i de la misma.

2.2.1 Figuras de mérito.

Sabiendo cual es la respuesta espectral esperada, es importante exponer las figuras de mérito utilizadas frecuentemente para la caracterización de los interferómetros FP.

1. *Frecuencia de resonancia* (ν_m). La condición de resonancia del interferómetro FP ocurre cuando $\delta/2 = m\pi$, entonces:

$$\delta = 2m\pi \quad (2.21)$$

$$\delta = \frac{4\pi n_i l_i}{\lambda} \quad (2.22)$$

2.2. FUNCIÓN DE AIRY.

igualando las ecuaciones (2.21) y (2.22), se tiene que:

$$\begin{aligned} 2m\pi &= \frac{4\pi n_i l_i}{\lambda} \\ m\lambda &= 2n_i l_i \end{aligned} \quad (2.23)$$

Por lo que la *frecuencia de resonancia* está dada por:

$$\boxed{\nu_m = m \left(\frac{c}{2n_i l_i} \right)} \quad (2.24)$$

2. *Rango espectral libre (FSR, por sus siglas en inglés)*. El rango espectral libre del filtro FP representa el espacio entre dos modos sucesivos de frecuencia de resonancia; por ejemplo, la separación entre las frecuencias que corresponden al máximo de transmisión. Considerando dos modos sucesivos como m y $m-1$:

$$m-1 = \frac{2n_i l_i}{c} f_{m-1} \quad (2.25)$$

$$m = \frac{2n_i l_i}{c} f_m \quad (2.26)$$

Se restan las ecuaciones (2.25) y (2.26):

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{2n_i l_i}{c} (f_m - f_{m-1}) \\ m &= \frac{2n_i l_i}{c} \Delta f_{FSR} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Para obtener que:

$$\boxed{\Delta f_{FSR} = \frac{c}{2n_i l_i}} \quad (2.28)$$

Esta ecuación (2.28) mantiene la siguiente relación con el FSR expresado en longitud de onda:

$$\frac{\Delta f_{FSR}}{f} = \frac{\Delta \lambda_{FSR}}{\lambda} \quad (2.29)$$

Entonces el FSR puede escribirse como:

$$\boxed{\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2n_i l_i}} \quad (2.30)$$

Las ecuaciones (2.28) y (2.30) indican el rango espectral libre y están en función de la separación entre espejos, variando esta distancia se puede diseñar el filtro FP con el FSR deseado.

3. *Ancho de banda de resolución* ($\Delta\lambda_{FWHM}$). También conocido como anchura de franja, es la anchura a la mitad de la intensidad máxima del pico de transmisión durante el funcionamiento del filtro Fabry-Perot. El $\Delta\lambda_{FWHM}$ es una figura de mérito importante en el diseño de estos dispositivos y usualmente se desean valores bajos de él.

Este parámetro depende de la reflectancia de los espejos y la separación entre ellos, por lo que bastará con variar alguno de los dos para modificarlo.

4. *Finura* (F_r). Es un parámetro importante que determina el *rendimiento* de un filtro FP. Conceptualmente la finura representa el número de haces que interfieren dentro de la cavidad Fabry-Perot para formar la onda estacionaria. Mayor finura indica un número mayor de haces y, por lo tanto, un proceso de interferencia más complejo.

De manera simple, la finura se define como la relación entre el rango espectral libre y el ancho de banda de resolución:

$$\boxed{F_r = \frac{\Delta\lambda_{FSR}}{\Delta\lambda_{FWHM}}} \quad (2.31)$$

La finura como función de la reflectancia se define como:

$$\boxed{F_r = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}} \quad (2.32)$$

La ecuación (2.32) indica que la finura se puede aumentar simplemente mediante el aumento de la reflectancia de los espejos. Sin embargo, la consecuencia de este aumento en R resulta en la reducción de la luz transmitida por el filtro. Al momento de diseñar se debe tener en cuenta esta limitante y pensar en el equilibrio entre ambos factores.

5. *Factor de contraste* (F). Se define principalmente como la relación entre el máximo y el mínimo de transmisión en el patrón de interferencia; es decir, la relación entre los valores de intensidad de picos y valles.

$$F = \frac{T_{max}}{T_{min}} \quad (2.33)$$

El factor de contraste, al igual que la finura, está directamente relacionado con R , de acuerdo con la siguiente función:

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2} \quad (2.34)$$

Debido a que el factor de contraste y la finura se encuentran ampliamente relacionados, se puede expresar al primero en función de la segunda como:

$$F = 1 + \left(\frac{2F_r}{\pi} \right)^2 \quad (2.35)$$

La ecuación (2.35) indica que el aumento lineal en la finura se traduce en un aumento cuadrático en el valor del factor de contraste.

2.3 Uso de la Transformada de Fourier Discreta.

La *transformada de Fourier* comúnmente se utiliza para realizar la transformación del *dominio del tiempo (forma de onda)* al *dominio frecuencial(espectro)* de una señal. En el presente trabajo se aplicará la Transformada de Fourier Discreta (*Discrete Fourier Transform, DFT*) a la forma de onda del patrón de interferencia en función de la longitud de onda para analizarlo en el dominio frecuencial con el objetivo de aprovechar las siguientes propiedades [13] y su interpretación experimental:

- **Escalado en tiempo.** Significa que el valor frecuencial de la espiga del espectro obtenido y el valor del periodo de la forma de onda son inversos; en el caso que nos compete se traduce en que, el valor de la frecuencia de la espiga del espectro obtenido con la transformación representa el número de máximos existentes en el patrón de interferencia y, al obtener el inverso de dicho valor, es posible obtener el parámetro $\Delta\lambda_{FSR}$.
- **Linealidad.** Se tomará de base la figura 2.6 para entender que esta propiedad de linealidad es de utilidad porque permite diferenciar, en el dominio de la frecuencia, las componentes provenientes de distintas señales. En particular, se aprovechará la linealidad de la transformada de Fourier para identificar las componentes propias del patrón de interferencia y poder distinguirlas de la componente directa o ruido.

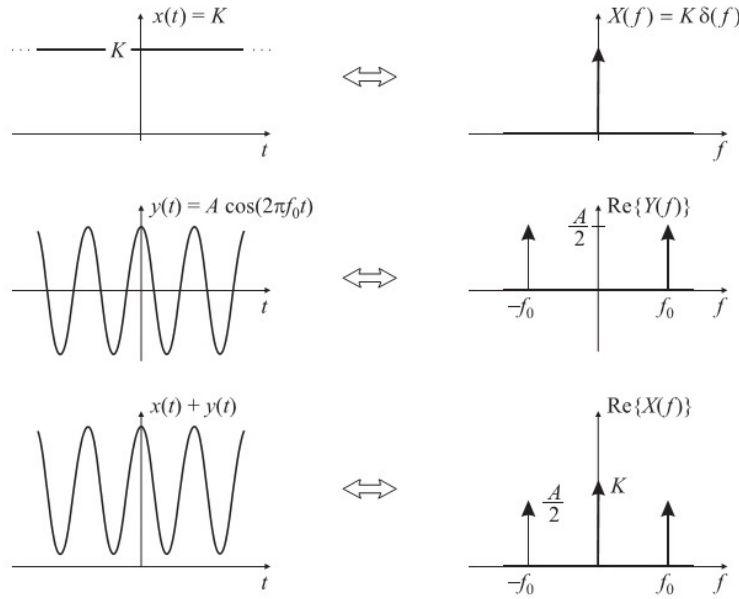


Figura 2.6: Propiedad de linealidad de la transformada de Fourier.

- **Desplazamiento frecuencial.** Aplicando la transformada de Fourier a la ecuación de una señal modulada en amplitud, se obtiene que el espectro corresponde a la siguiente expresión:

$$X_{AM}(f) = \frac{A_c}{2}[\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{mA_c}{2}[X(f - f_c) + X(f + f_c)] \quad (2.36)$$

La expresión (2.36) corresponde al espectro del mensaje centrado en f_c y dos δ también centradas a $\pm f_c$ por la transmisión de la portadora. La porción del espectro que está por encima de f_c , se conoce como banda lateral superior, y la que está por debajo de f_c es la banda lateral inferior. En la figura (2.7) se muestra la representación gráfica de la *modulación AM*.

En este trabajo se utilizará esta propiedad para determinar si los patrones de interferencia del filtro FP corresponden a señales moduladas y, de ser el caso, determinar los parámetros de modulación que le competen.

2.3. USO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER DISCRETA.

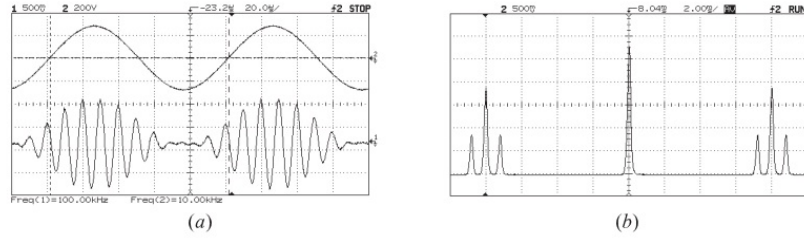


Figura 2.7: Modulación AM. Señal moduladora (trazo superior) y señal modulada (trazo inferior) (a); Espectro de la señal modulada (b).

2.3.1 Transformada Rápida de Fourier y MATLAB.

La Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform, FFT*) es un algoritmo eficiente que permite calcular la DFT con un número de operaciones menor al de otros algoritmos. MATLAB permite realizar el cálculo de la FFT para una secuencia de muestras de una señal contenida en un vector y, como los patrones de interferencia experimentales son señales periódicas y están conformadas por un conjunto de datos discretos, es viable aplicarlo para el análisis.

En MATLAB la función $Y = FFT(x)$ devuelve la DFT del vector x . La DFT se calcula con el algoritmo de la FFT definida por:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \varpi_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (2.37)$$

donde:

$$\varpi_N = e^{(-2\pi i)/N}$$

N es el número de muestras a tomar.

En la figura (2.8) se muestra un ejemplo gráfico de una función de Airy junto con la FFT obtenida con MATLAB. Es importante mostrarla porque son las señales que esperamos de forma experimental. Considerando esta figura y las propiedades antes mencionadas se puede decir que el espectro está conformado por: una espiga centrada en *cero* producto de la componente directa, una espiga en *dos* que representa el número de máximos existentes y una espiga más pequeña en *cuatro* que es la primer armónica de la señal. Cabe señalar que de haber modulación existirían dos espigas adicionales equidistantes a *dos*, en donde la distancia de separación sería equivalente al número de máximos de la señal envolvente; estas dos espigas conformarían las bandas laterales superior e inferior.

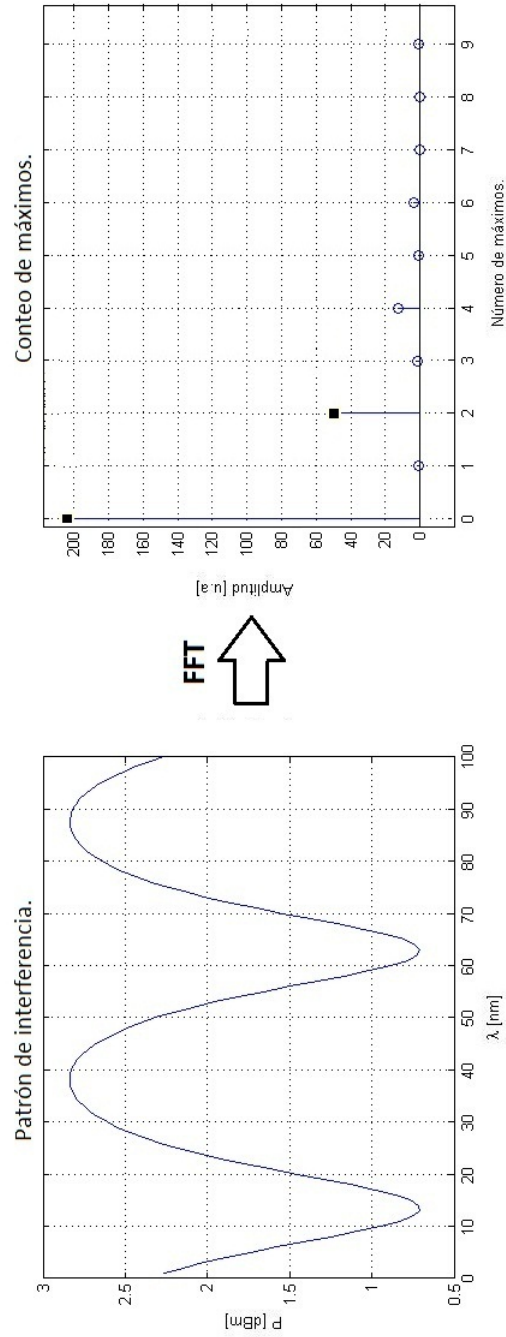


Figura 2.8: Función de Airy y su FFT.

Capítulo 3

Fabricación de filtros interferométricos Fabry-Perot

En este capítulo se presenta la fabricación de los filtros interferométricos FP, incluyendo el diseño experimental, el proceso de fabricación y los resultados experimentales obtenidos.

3.1 Diseño y principio de operación del filtro interferométrico Fabry-Perot.

El diseño propuesto se observa en la figura 3.1. Este muestra una *punta de prueba* (que es como se le llamará a los dispositivos) la cual consiste en un tubo capilar lleno de material polimérico (*Polidimetilsiloxano, PDMS*) en el cual se insertan dos fibras monomodo (*SMF, single mode fiber*). En el extremo derecho del capilar (Figura 3.1) se inserta una fibra óptica cuyo extremo ha sido cortado previamente para obtener una superficie plana. En el extremo opuesto del capilar, se inserta un dispositivo de fibra óptica que funciona como un micro-calentador. El funcionamiento de este micro-calentador se explica en el Anexo A. Para la fabricación de las puntas de prueba, el uso del micro-calentador tiene el objetivo de generar burbujas micrométricas en el PDMS.

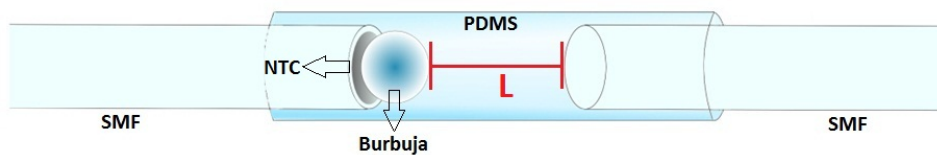


Figura 3.1: Diseño experimental del filtro óptico interferométrico propuesto (punta de prueba).

Considerando que el haz de luz incide en el interior del tubo capilar por medio de la fibra óptica del lado derecho, se puede observar que el orden de los medios por los que atraviesa el haz de luz es el siguiente: fibra óptica, PDMS, interior de la burbuja y, finalmente, el micro-calentador de fibra óptica. Todos estos medios presentan distinto índice de refracción n por lo que, tomando en cuenta que $r = \left| \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} + n_i} \right|$, se puede afirmar que en cada una de las fronteras entre dos medios existe una superficie parcialmente reflectiva.

La diferencia de índices de refracción entre estos medios son los que generan las múltiples reflectancias que hacen al dispositivo fabricado equivalente al interferómetro FP de espejos múltiples, explicado con anterioridad. Debido a que es la primera por la que el haz atraviesa, la cavidad principal está formada por la punta de fibra óptica del lado derecho y la primera pared de la burbuja, por lo que los efectos producidos por las otras superficies se analizarán en las siguientes secciones.

Como consecuencia las propiedades del PDMS, si la punta de prueba es sometida a cambios térmicos, al material polimérico le ocurrirán cambios en el índice de refracción además de una expansión térmica. La expansión térmica del PDMS junto con las variaciones del gas contenido en la burbuja modificarán el tamaño de la burbuja y la distancia *FO-burbuja*; es decir, se modificará la longitud de la *cavidad FP* (indicada en color rojo en la figura 3.1). Como L puede variarse, la punta de prueba es un *interferómetro Fabry-Perot* que es sintonizable a través de las variaciones en la temperatura a la que se expone el dispositivo.

3.2 Materiales para la fabricación.

A continuación se describen a grandes rasgos las características de los materiales utilizados con el fin de que sea entendible por qué se seleccionaron y el comportamiento que presentan.

3.2.1 Fibra óptica.

La fibra óptica que se utilizó es una fibra óptica monomodo. Este tipo de fibra presenta un diámetro de núcleo pequeño, cuya dimensión es similar a la longitud de onda del haz de luz que se le hace incidir, ocasionando que sólo un *modo* se transmita a través de ella. El que se seleccionara una fibra monomodo para la realización de este experimento tiene su justificación en que, en el interferograma, únicamente se verá representada la interferencia que existe entre el modo transmitido y él mismo; descartando así el tener que realizar un análisis más elaborado para identificar la interferencia entre modos que existiría al utilizar una fibra multimodal.

Específicamente, se utilizó la fibra óptica comercial *SMF28e* de la marca *Corning*. Si se desea saber más de esta fibra óptica estándar se puede consultar el Anexo B en el cual se muestran las especificaciones.

3.2. MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN.

3.2.2 Polidimetilsiloxano,PDMS

Durante la última década, los polímeros han tenido un gran interés científico debido a que son materiales flexibles, con buenas propiedades mecánicas y, a menudo, adecuado para aplicaciones fotónicas; tal es el caso del Polidimetilsiloxano (PDMS).

El PDMS [14] [15] es un material polimérico ampliamente conocido y utilizado en el campo de la óptica debido a que es ópticamente transparente y presenta baja dispersión óptica. Además de eso, es un material de bajo costo, fácil manejo, nula toxicidad y no inflamable. Por estas razones, su manejo en el laboratorio no tiene mayores implicaciones de seguridad o contandicaciones que limiten su uso.

El PDMS utilizado en el experimento es el *Sylgard 184*, el cual está suministrado en dos partes: un líquido que es PDMS base y el otro que es el agente curante, como se muestra en la figura 3.2. Cuando ambos líquidos son mezclados en una proporción 10:1, en peso o volumen, la mezcla comienza un proceso de *curado*, que significa que comenzará un proceso de solidificación. Esta reacción de curado comienza con un aumento gradual de la viscosidad, seguido de la gelificación y finaliza con una conversión a un material sólido. La mezcla a temperatura ambiente tarda 48 horas en curarse por completo; sin embargo, el curado del PDMS puede acelerarse al aumentar la temperatura a la que se somete. Debido a esto, el Sylgard 184 (Anexo B) permite que en las primeras horas de realizada la mezcla se trabaje con un líquido que permite el llenado de capilares, la generación de la burbuja y, en general, la fabricación de la punta de prueba.



Figura 3.2: Polidimetilsiloxano (PDMS) Sylgard 184: base polimérica y agente curante.

3.3 Arreglo experimental.

El proceso de fabricación de las puntas de prueba requiere de diversos sistemas de control y monitoreo, tanto de las fibras ópticas, como de los micro-calentadores. En particular, se busca que durante el proceso de fabricación se pueda controlar:

1. La variación de la posición de cada una de las fibras ópticas con el objetivo de controlar la separación entre la fibra óptica del lado derecho y la burbuja (tamaño de la Cavidad FP). Con esto también se puede asegurar que ambas estén alineadas.
2. La variación en el tamaño de la burbuja, para con ello modificar la posición del *espejo* de la Cavidad FP al que está asociada la superficie de la burbuja.
3. El monitoreo en tiempo real del proceso de fabricación para poder decidir la configuración final del arreglo. Esto incluye la visualización de la punta de prueba y el monitoreo del patrón de interferencia obtenido con la punta de prueba.

Para satisfacer los requerimientos descritos se utilizó un sistema mecánico de alta precisión con movimiento en los ejes x , y y z ; se considera de alta precisión ya que sus movimientos son del orden del tamaño de las fibras $125 \mu\text{m}$ para tener un control de posición más exacto. Se eligió el sistema motorizado *MTS50-Z8* y se desarrolló un instrumento virtual (*Virtual Instrument, VI*) para su manejo y control. En el Anexo C se resaltan las especificaciones relevantes del sistema *MTS50-Z8* y se incluye el programa realizado para el VI. Además de esto, se necesitaron piezas adicionales que sujetaran las fibras y una mesa óptica que evitara que las vibraciones externas afectaran el experimento.

Adicional al sistema mecánico, se utilizó un diodo láser para la fabricación y modificación de la burbuja, y un sistema de visualización integral que incluyera el dispositivo físico asociado a un software de control. Para observar la punta de prueba se utilizó un microscopio *DinoLite AD7013MZT* con el software e iluminación asociados y, para obtener el patrón de interferencia, se utilizó un *Interrogador SM-125* el cual fue controlado por algunos VI's de diseño propio para la adquisición de datos en tiempo real. El funcionamiento del Interrogador, así como los programas básicos se incluyen en el Anexo C.2.

La disposición de los elementos y materiales que conforman el arreglo experimental se observan en la figura 3.3; en esta puede verse además de los elementos ya mencionados: un *WDM, Wavelength Division Multiplexer* y la computadora a la que se conectan los instrumentos y en donde se encuentra todo el software necesario. El *WDM* tiene como única finalidad seleccionar de todo el espectro óptico las longitudes de onda de 980 nm (Diodo láser) y 1550 nm (Fuente del Interrogador), para descartar la primera y que el *Interrogador* únicamente detecte la señal que él mismo genera.

3.4. FABRICACIÓN DE FILTROS.

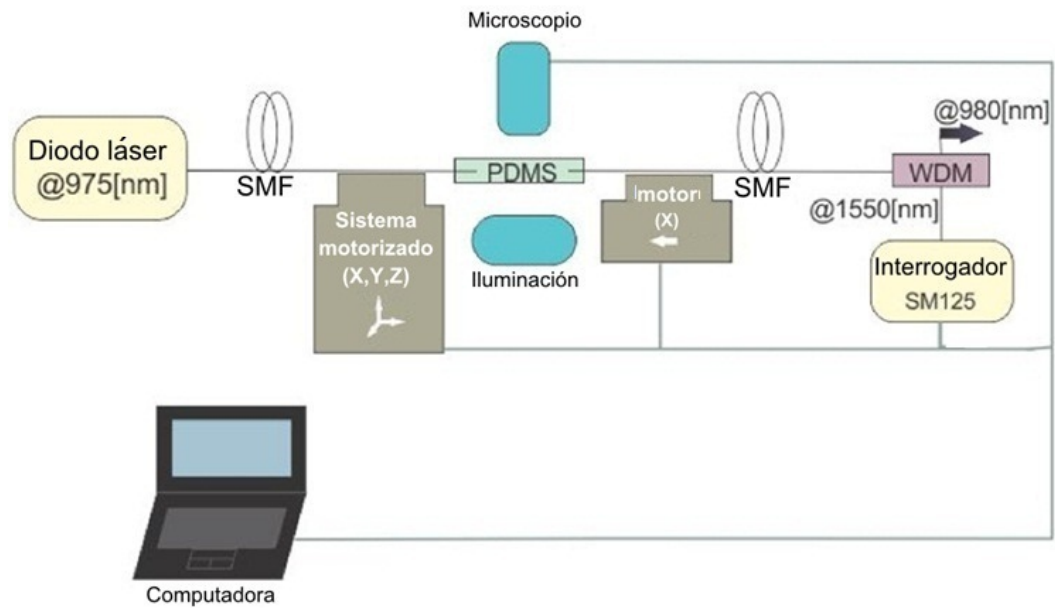


Figura 3.3: Diagrama a bloques del arreglo experimental.

3.4 Fabricación de filtros.

El proceso de fabricación de los filtros interferométricos involucra distintas etapas. Estas se describen en las siguientes secciones.

3.4.1 Preparación de la muestra.

Como se observa en la sección 3.1, para fabricar una punta de prueba se necesita inicialmente un tubo capilar lleno de PDMS; sin embargo, debido a las propiedades de este material, debe tenerse especial cuidado en el tiempo que dura la prueba experimental, ya que de no tenerlo, el material polimérico puede solidificarse antes de obtener el resultado deseado. El PDMS comienza a hacerse viscoso tres horas después de su preparación, lo que ocasiona que sea difícil de manejar. Para evitar estas incomodidades, es indispensable antes de comenzar el experimento tener preparados todos los elementos involucrados en el arreglo experimental.

Para preparar el PDMS se utiliza una balanza en la cual se mide una cantidad pequeña de agente curante y diez veces esa cantidad de la base polimérica (10 : 1). La cantidad de agente curante, durante el periodo de experimentación, osciló alrededor de los 25 mg; esta masa se definió con la práctica como una porción pequeña estándar que permitía llenar una cantidad razonable de capilares por día sin desperdiciar el material. Después de medir su masa, el PDMS se mezcla con el agente curante, y

esto genera burbujas en la mezcla. Idealmente, se busca que la mezcla esté libre de aire, de tal manera que es necesario esperar que las burbujas de aire emerjan a la superficie. Es importante mencionar que en la medida de lo posible se debe tener el vaso de precipitados que contiene al PDMS cubierto para evitar que se contamine.

Los tubos capilares utilizados para las puntas de prueba son *Drummond Microcaps* con un diámetro interno de $\phi_{int} = 280 \mu m$, un diámetro externo de $\phi_{ext} = 762 \mu m$ y una longitud de $l = 32 mm$. Los tubos capilares se seccionan en dos partes para llenarlos con el PDMS libre de aire utilizando una pipeta. Una vez llenos, cada tubo capilar se adhiere con esmalte transparente a un portaobjetos de vidrio con el fin de tener una muestra que se pueda mover y colocar en cualquier lado con facilidad.

Teniendo el capilar fijo, se preparan las dos fibras ópticas que estarán involucradas en el proceso de fabricación: monitoreo y micro-calentador. A ambas fibras se les empalma un *pig-tail* (cable de fibra óptica que tiene en un extremo FO descubierta y en el otro un conector). Esta configuración deja fibra óptica descubierta en un extremo y permite que el otro extremo pueda conectarse a cualquier equipo que posea el mismo tipo de conector que el *pig-tail*. Cada uno de los extremos de fibra óptica al descubierta se insertan en sujetadores (*chuck*) distintos y a las puntas se les realiza el corte y limpieza respectivos. Para finalizar la preparación de las fibras a una de estas se le realiza el depósito de NTC para que funga como micro-calentador.

La fibra de monitoreo se conecta al interrogador y su sujetador es fijado al motor colocado del lado derecho, el cual realiza movimiento en el eje x . El micro-calentador es conectado al diodo láser y su sujetador se coloca en el sistema motorizado de ejes x, y y z , ubicado del lado izquierdo. En medio de ambos sistemas de movimiento se encuentra la iluminación y el microscopio. Encima de la lámpara se coloca el portaobjetos preparado previamente procurando que el tubo capilar adherido esté alineado con fibra sin depósito; esta configuración es posible observarla en la figura 3.4.

Con el motor del lado derecho se va desplazando la fibra óptica hasta que se introduce y llega a la mitad del capilar. Algo similar se hace con la otra fibra sólo que en este caso se tienen tres grados de libertad controlados por computadora (con excepción del eje y cuyo control es manual) y se procura que las puntas no tengan contacto, dejando una separación entre ellas que después será ajustada a conveniencia. Durante este proceso de inserción se debe tener extremo cuidado de no tocar alguna superficie con la punta, pues esto ocasionaría el daño en la superficie de la fibra óptica, o bien un deterioro en el micro-calentador. Es por eso que se debe controlar la posición de las puntas de tal forma que aseguren que al hacer los movimientos sobre el eje x las fibras entrarán directamente en el PDMS. Y, por otro lado, se debe tener un monitoreo continuo con el microscopio para saber el lugar donde se encuentran y el estado de las puntas de las fibras.

3.4. FABRICACIÓN DE FILTROS.

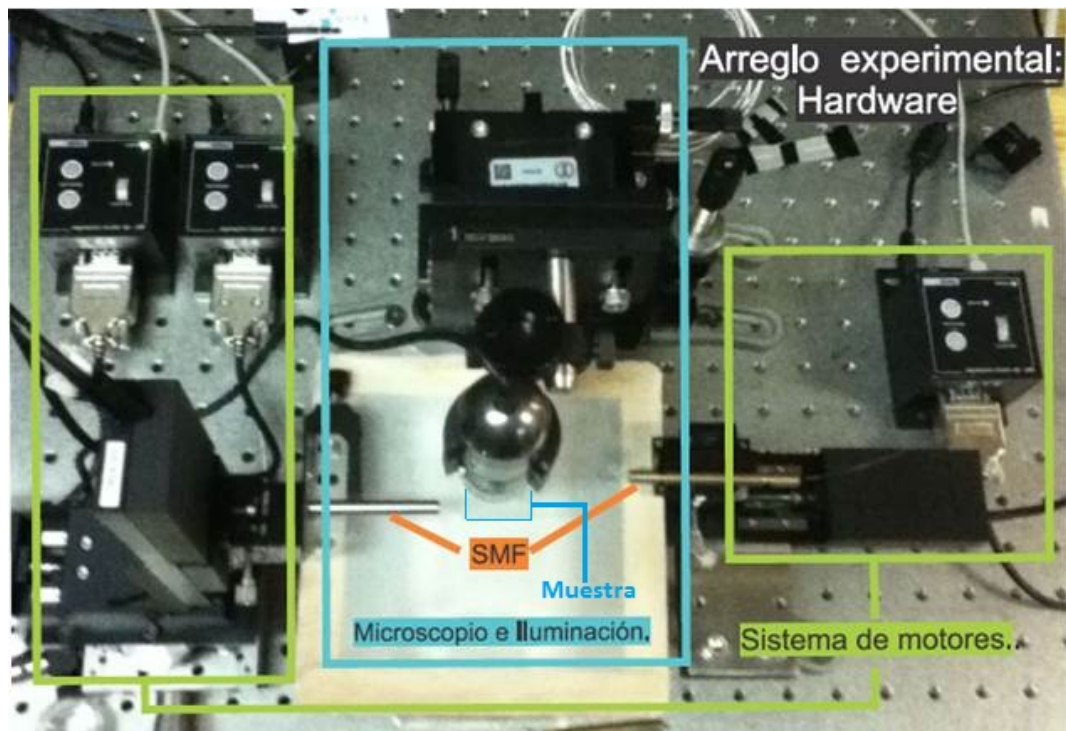


Figura 3.4: Montaje experimental (fotografía).

Con las fibras ópticas inmersas en el PDMS y conectadas adecuadamente se concluye el proceso de preparación de la muestra. Hasta esta etapa del proceso de fabricación, la punta de prueba se ve como se muestra en la figura 3.5. En la figura se observa el capilar con PDMS, las puntas de FO perfectamente cortadas y en una de ellas el depósito de NTC (izquierda).

3.4.2 Generación de la burbuja.

Cuando se tiene el depósito de nanotubos de carbono sobre la punta de la fibra óptica, es posible generar micro-burbujas. Para ello se enciende el diodo láser y las partículas del depósito absorben la luz que llega a ellas; esto provoca un aumento muy local de la temperatura lo que conlleva a un cambio de fase en el PDMS dando lugar a la microburbuja [2]. Este proceso se observa en el Vídeo '1Generación'.

El tamaño de la microburbuja depende de la calidad del depósito de NTC, de la potencia emitida por el diodo láser y del tiempo en el que se mantiene encendido este. Debido a que no se sabe con exactitud el tamaño de la burbuja al que está asociado el valor de estas tres variables, se decidió utilizar como estándar las corrientes bajas y dejar el láser encendido hasta obtener el tamaño deseado de microburbuja.

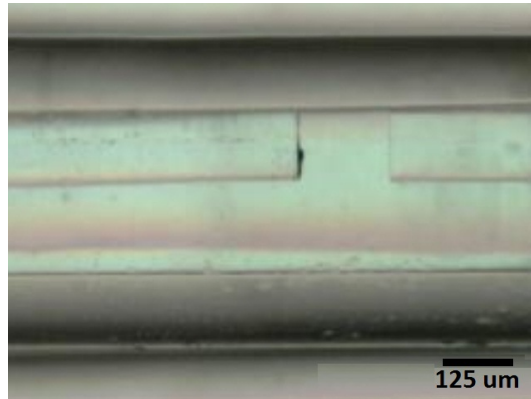


Figura 3.5: Muestra después de concluidos los procesos de preparación.

Aunque se podría creer que a mismo tiempo de exposición se formarían burbujas de igual tamaño esto no siempre sucede porque aun siendo lapsos iguales, la calidad del depósito es crucial; si un depósito es uniforme el láser necesitará estar menos tiempo encendido para obtener el mismo resultado que a un mayor tiempo con un depósito defectuoso. Es importante decir que en este proyecto sólo se varió el tiempo de encendido del láser τ_{enc} , y este se determinó de acuerdo con la visualización de la evolución de la burbuja.

Tomando en cuenta que para que funcione correctamente la punta de prueba es necesario que exista la alineación de las superficies parcialmente reflectivas (pared de la burbuja y punta de fibra sin depósito) que componen la cavidad, antes de la generación de la burbuja, las puntas de las fibras ópticas se alinean para satisfacer esta necesidad. Una vez que se han alineado las puntas de las fibras y se genera la burbuja, la punta de prueba se ve como se muestra en la figura 3.6.



Figura 3.6: Muestra después de generada la burbuja.

3.4.3 Alineación y configuración final de la punta de prueba.

A pesar de que las puntas de las fibras ópticas se alinearon previamente, si la burbuja no se genera de forma concéntrica, esto no asegura la alineación requerida; es por eso que con ayuda del diodo láser y con el sistema de posicionamiento se puede ajustar la posición de las burbujas generadas. Estas técnicas de alineación se detallan a continuación:

Movimiento simple. Cuando la burbuja está adherida a la punta de la fibra con depósito, bastará con hacer movimientos con el sistema del lado izquierdo para mover la fibra. Estos movimientos pueden ser sobre los tres ejes y tienen como objetivo buscar una primera aproximación de la alineación de la burbuja con la fibra sin depósito, o *de monitoreo*. En algunos casos, basta con esta técnica para la alineación; sin embargo, hay otras ocasiones en que se necesitan otras técnicas para lograrlo. Los movimientos simples se hacen en pasos de 50 *nm* para que la burbuja no experimente cambios de posición abruptos, sea más fácil su control y se mantenga adherida a la punta.

Desprendimiento y atrapamiento. Cuando la burbuja está fuertemente ligada a la punta de la fibra con depósito pero no es concéntrica a ella los movimientos simples no serán de mucha utilidad, puesto que aunque las dos fibras estén alineadas la burbuja no lo estará. Cuando esta situación ocurre en la parte media del capilar una desalineación de las fibras con movimientos simples puede solucionarlo; sin embargo, si la situación se presenta en los extremos superior e inferior del capilar se requiere la técnica *desprendimiento-atrapamiento*. Para el desprendimiento se hace un desplazamiento continuo hacia el lado izquierdo hasta llegar al punto en el que la viscosidad del PDMS impide que la burbuja pueda moverse a la misma velocidad que la fibra, lo cual resulta en su separación; basta con encender otra vez el diodo láser para que la burbuja sea atraída a la punta y ocurra nuevamente el atrapamiento. Como en un inicio la burbuja no es concéntrica a la fibra, para que esta técnica sea de utilidad, la punta de la fibra debe reposicionarse para que el nuevo atrapamiento, aun sin ser concéntrico, pueda colocar a la burbuja enfrente de la fibra de monitoreo. El desprendimiento y atrapamiento también pueden utilizarse para cambiar la última interfaz del filtro, para que esta sea interior de la burbuja-PDMS o interior de la burbuja-NTC, respectivamente. Cuyas implicaciones se muestran en el Capítulo 4. Cabe señalar que en algunos casos, en lugar de producirse atrapamiento, se genera otra burbuja, dando lugar a la siguiente técnica.

Unión de burbujas. Esta técnica se utiliza cuando el atrapamiento de la burbuja falla y se genera otra al encender el diodo láser. La técnica se basa en encender el láser y realizar desplazamientos sobre el eje *x*. Al estar encendido el diodo láser, todas las burbujas sienten una pequeña atracción hacia la punta por lo que el movimiento les ayuda a coalescer hasta formar una única burbuja. Debido a que esta burbuja es de un tamaño mucho mayor, esta técnica facilita en gran medida la alineación.

Estas técnicas de alineación pueden observarse en el vídeo '**2Alineación**', en el cual se ilustra la generación de burbuja, las técnicas de alineación, la configuración de una burbuja y, como información adicional, algunas configuraciones singulares cuyo comportamiento no se analizará en este trabajo.

Es durante el proceso de alineación cuando la fibra de monitoreo es conectada al interrogador, ya que el patrón de interferencia que éste muestre dará indicios sobre el estado de alineación que exista y de las variaciones inducidas por los movimientos que se realicen.

Una vez que se tiene la burbuja alineada con la punta de prueba de monitoreo y se registre un patrón de interferencia que se asemeje a la función de Airy, lo único que resta por variar es la distancia que existe entre ellas, es decir, la longitud de la cavidad FP. Con el fin de modificar únicamente la longitud respetando la alineación, los ajustes que se realizan son con el motor al que está sujeta la fibra de monitoreo.

Cuando se tiene la respuesta esperada, las fibras son adheridas con esmalte al portaobjetos para que queden fijas. Cuando el esmalte seca, las fibras ópticas son desconectadas de los equipos y la muestra se pone a curar en una parrilla siguiendo las indicaciones del fabricante (mostradas en el apartado B.2). El adherir las fibras, desconectar del equipo y colocar la muestra en la parrilla son acciones que se deben hacer con sumo cuidado, ya que el mínimo movimiento en las fibras cambiará o perderá la respuesta obtenida. Terminado este proceso, el PDMS queda solidificado y el arreglo final de la muestra queda establecido; es decir, se tiene fabricada una *punta de prueba*.

3.5 Resultados y discusión.

En el transcurso del periodo experimental se concretaron varias *puntas de prueba*; a continuación se muestran las fotos obtenidas con el microscopio y los patrones de interferencia registrados con algunas de ellas.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

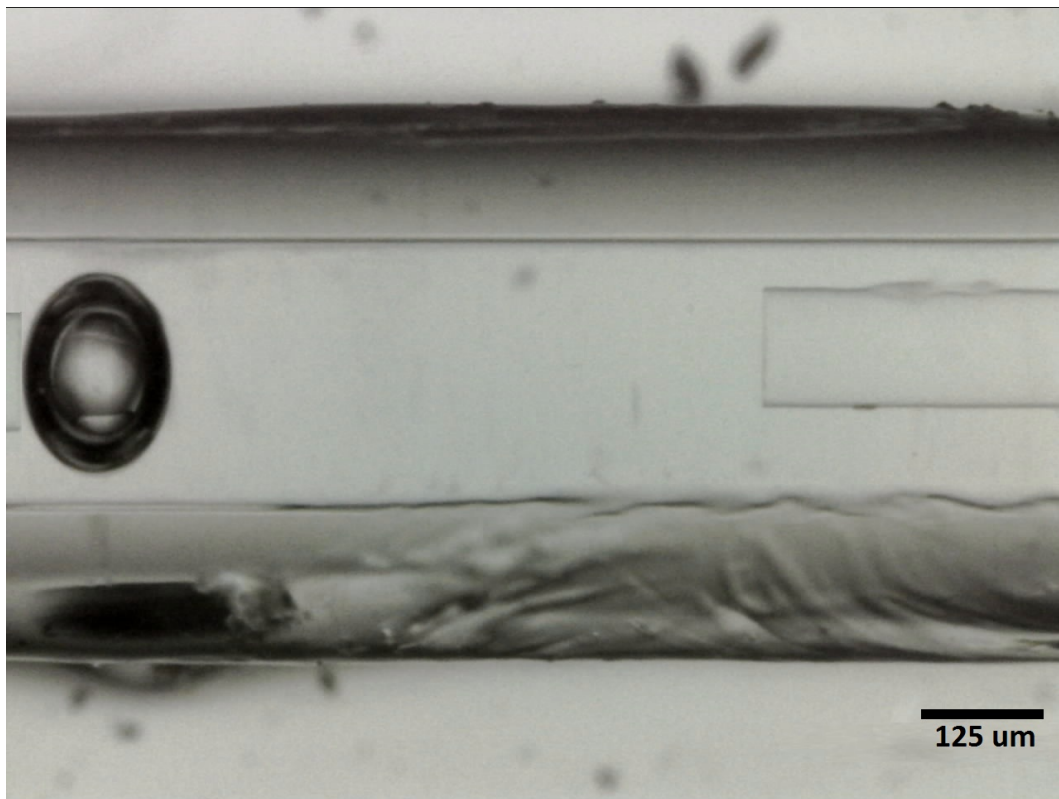


Figura 3.7: Punta de prueba N°2 vista por el microscopio.

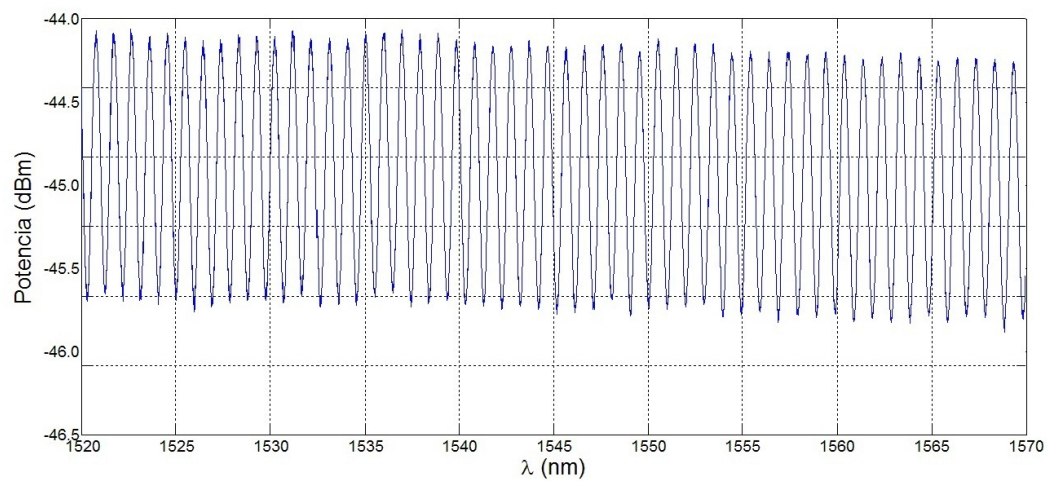


Figura 3.8: Patrón de interferencia arrojado por la punta de prueba N°2.

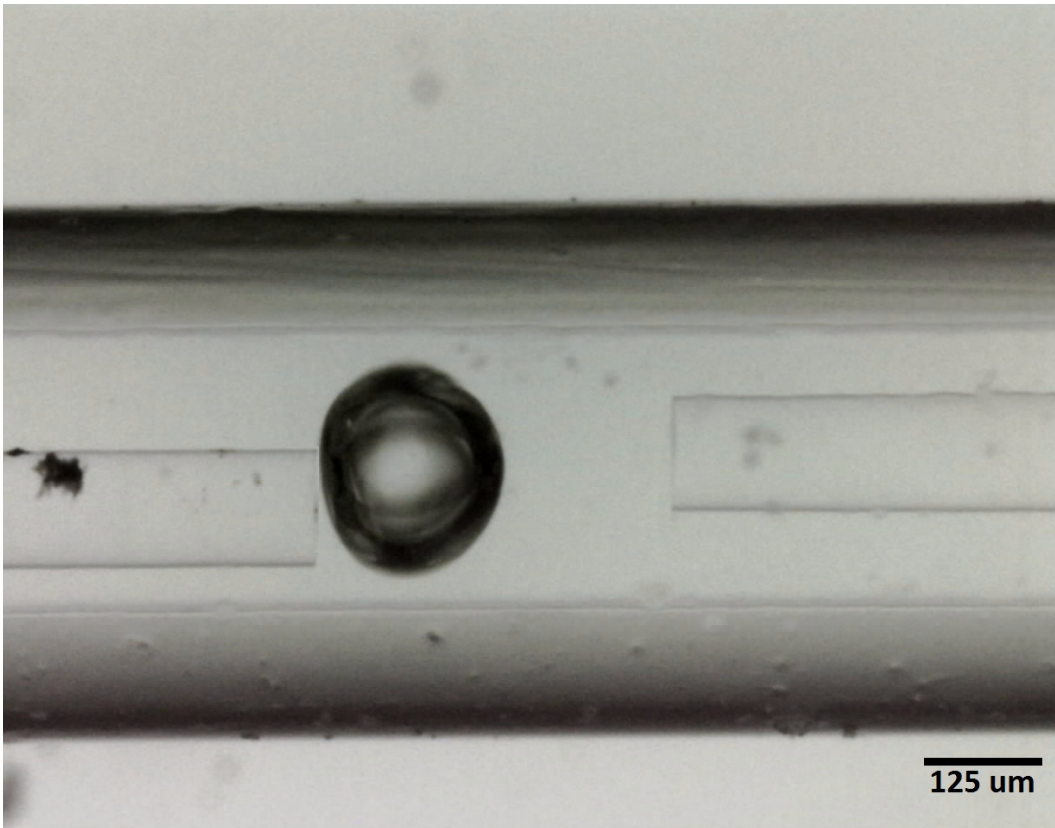


Figura 3.9: Punta de prueba N°5 vista por el microscopio.

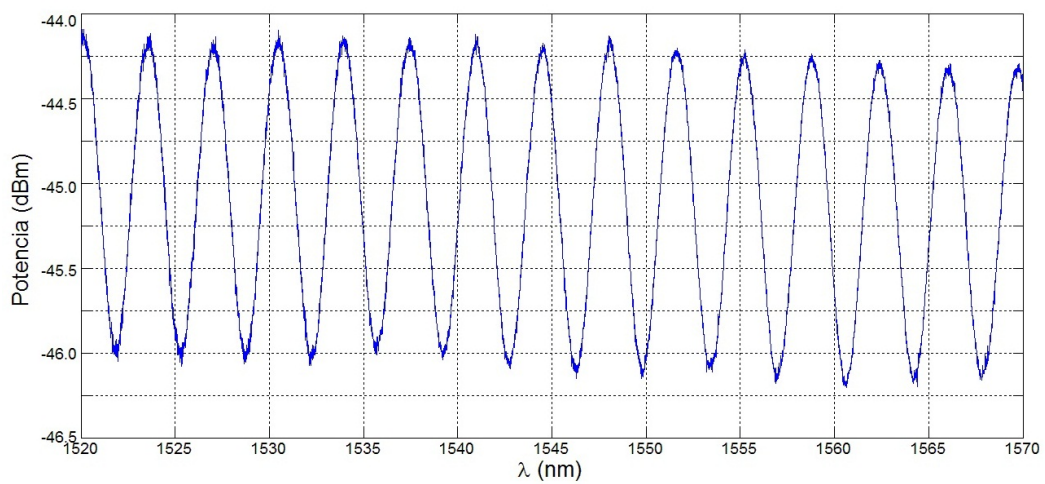


Figura 3.10: Patrón de interferencia arrojado por la punta de prueba N°5.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

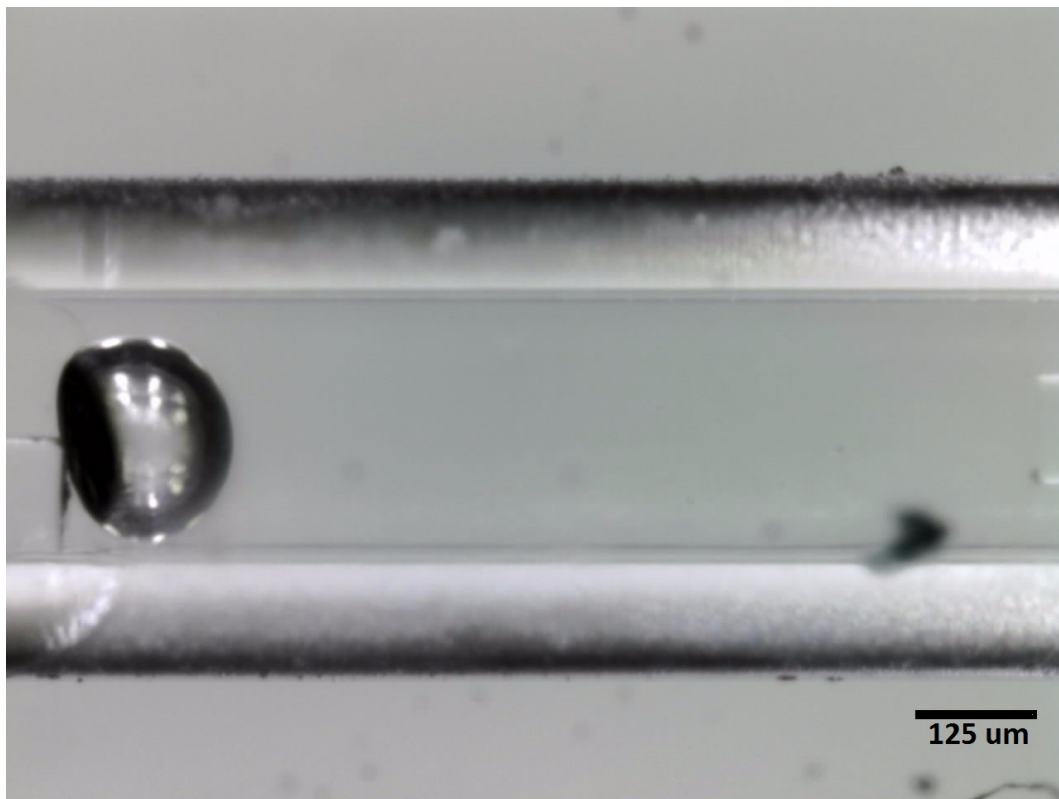


Figura 3.11: Punta de prueba N°8 vista por el microscopio.

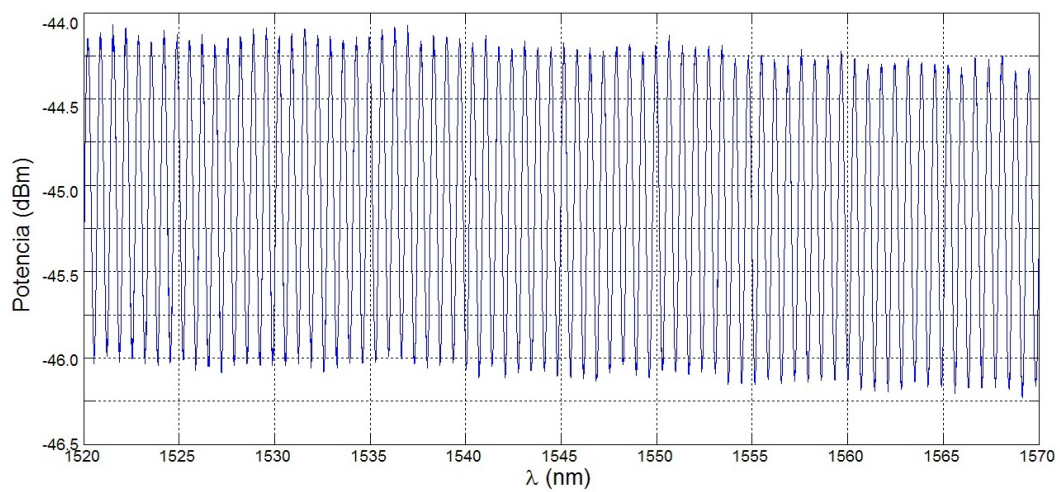


Figura 3.12: Patrón de interferencia arrojado por la punta de prueba N°8.

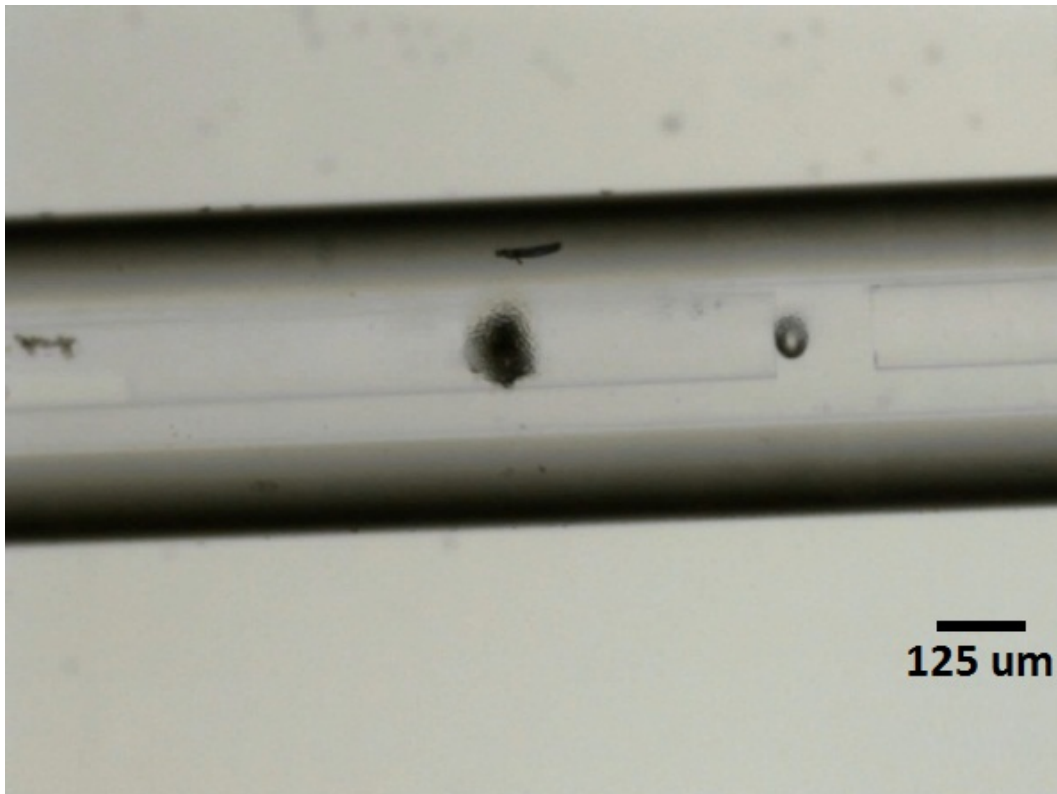


Figura 3.13: Punta de prueba N°9 vista por el microscopio.

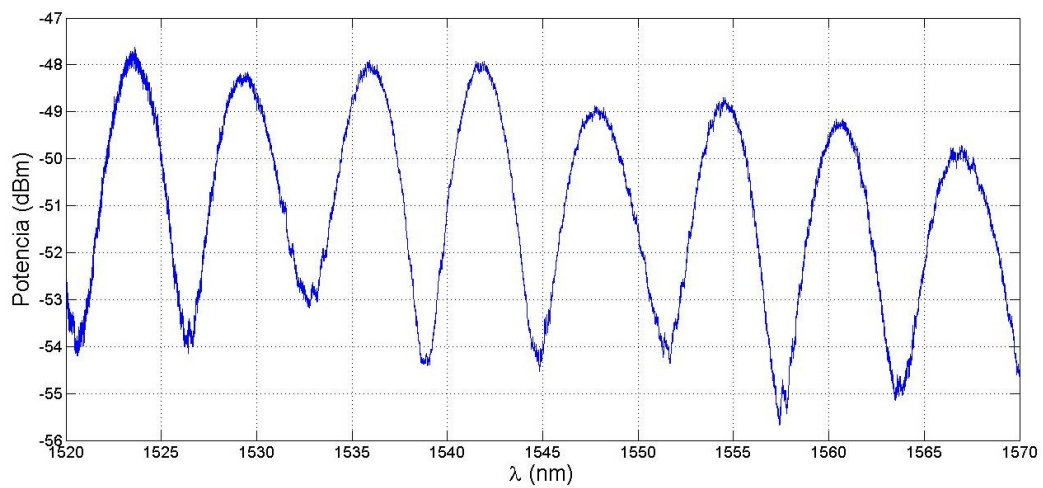


Figura 3.14: Patrón de interferencia arrojado por la punta de prueba N°9.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Las fotografías fueron tomadas por el microscopio y su escala se muestra del lado inferior derecho; para todas, el segmento de línea representa $125 \mu m$; aunado a eso, se anexa la Tabla 3.1 en donde se indican las magnitudes de cada una de las puntas de prueba fabricadas. Por su parte, los datos de los patrones de interferencia fueron obtenidos con el interrogador y graficados con *MATLAB*; como estos fueron tomados una vez que el PDMS había curado, se asume que esta será la respuesta que presente invariablemente el dispositivo, siempre y cuando las condiciones a las que sea expuesto sean las mismas.

Punta	Dist. FO de monitoreo-Burbuja [um]	Diámetro burbuja [um]
1	433.10	325
2	635.56	153.21
3	578.73	151.41
4	612.67	286.97
5	174.29	186.63
6	135.56	173.96
7	855.63	133.80
8	901.40	140.86
9	87.51	43.75
10	341.02	92.95

Tabla 3.1: Dimensiones de las puntas de prueba.

Partiendo de los resultados obtenidos, se concluye que es posible realizar dispositivos utilizando el arreglo experimental expuesto en este trabajo. Esta afirmación no se sustenta únicamente en que en las fotografías de las puntas de prueba se ve el mismo arreglo que en la figura 3.1, también tiene su base en que los patrones de interferencia corresponden a lo especulado teóricamente para un interferómetro FP de dos espejos.

Además, el que se haya logrado varias veces el mismo arreglo de elementos y que la forma de onda de la respuesta sea la misma, nos da la pauta a pensar que el experimento es repetible y de un comportamiento apegado, en todos los casos, a lo esperado teóricamente.

Pot otro lado, si se observan los patrones de interferencia, es apreciable que la separación entre máximos ($\Delta\lambda_{FSR}$) es diferente para cada uno de ellos. Y, al observar las fotografías, es notable que las separaciones entre la fibra de monitoreo y la primer pared de la burbuja también varían de una punta de prueba a otra. Con esto queda comprobado experimentalmente el hecho de que el patrón de interferencia depende de las dimensiones del interferómetro FP; aunque faltaría demostrar que, como se supuso teóricamente, la dimensión que influye en el interferograma es la distancia *fibra-burbuja* (l).

CAPÍTULO 3. FABRICACIÓN DE FILTROS INTERFEROMÉTRICOS FABRY-PEROT

Hasta este punto se ha hablado de que la técnica de fabricación de puntas de prueba, aunque minuciosa, es exitosa puesto que se lograron distintas configuraciones apegadas al diseño y con una respuesta conforme a lo esperado teóricamente; sin embargo este trabajo no se limita a probar u optimizar un proceso de fabricación, este intenta responder a las preguntas e inquietudes que surgieron después de elaborados los dispositivos:

- *¿Es en realidad la distancia fibra-burbuja la correspondiente a la longitud de la cavidad FP?*
- *¿Se pueden obtener configuraciones distintas al diseño experimental? ¿Cuál será su respuesta?*
- *¿Cómo es la relación entre las dimensiones del interferómetro y $\Delta\lambda_{FSR}$?*
- *¿Es posible fabricar un dispositivo basándose en un valor de $\Delta\lambda_{FSR}$ dado?*
- *¿Es posible modificar los patrones de interferencia obtenidos originalmente? ¿De qué forma? ¿Cuánto cambia?*

Estas y otras preguntas quedan resueltas implícitamente en el siguiente capítulo, cuyo objetivo es caracterizar los dispositivos fabricados.

Capítulo 4

Análisis y caracterización espectral.

Para hacer el análisis de la respuesta de las puntas de prueba, se implementó un procedimiento de análisis que permitiera relacionar los parámetros espectrales con las dimensiones de la cavidad. Éste se hizo para cada una de las configuraciones de punta de prueba obtenidas y consiste en:

1. Obtener la señal reflejada (patrón de interferencia).
2. Medir con ImageJ las dimensiones geométricas de la punta de prueba en las fotografías tomadas con el microscopio.
3. Comparar con la respuesta teórica.
4. Calcular de la transformada de Fourier rápida (*FFT, Fast Fourier Transform*).
5. Graficar la respuesta de la punta de prueba en función de λ nm y, por separado, N° de máximos.
6. Obtener la relación entre las dimensiones y el $\Delta\lambda_{FSR}$ del dispositivo.

En este capítulo se desarrollan y explican cada uno de estos puntos y, finalmente, se muestran como resultado las gráficas que representan el comportamiento característico de los filtros ópticos interferométricos fabricados.

Es importante señalar que con el fin de caracterizar de manera más completa los filtros ópticos fabricados, se decidió tomar, además de los datos provenientes de las puntas de prueba consumadas, los patrones de interferencia observados durante el proceso de fabricación.

4.1 Obtención de la señal reflejada.

Existen dos formas de obtener la información durante el proceso de caracterización de las puntas de prueba. Cada una de estas formas está asociada directamente a los programas incluidos en el Anexo C.2 y su uso depende de lo que se requiera. Si se desean obtener los datos de manera automática n veces cada cierto tiempo fijo (t), es conveniente utilizar el programa *Timed.vi*; mientras que, el *Boton.vi* es de utilidad cuando se quieren adquirir los datos de n instantes determinados indicados de forma manual. Debido a las características de los instrumentos virtuales y a la elaborada técnica de fabricación, ambos acaban siendo igual de útiles, puesto que se pueden utilizar en la misma medida.

La información significativa para el análisis únicamente puede presentarse durante y posterior al proceso de generación de la burbuja, porque es con este proceso cuando se empieza a modificar la geometría de la punta de prueba. Debido a esto, la adquisición y almacenamiento de los datos que lee el interrogador comienza a hacerse algunos instantes previos a la formación de la burbuja.

Conforme se genera la burbuja, esta incrementa su tamaño, ocasionando que la fibra de monitoreo perciba cada vez más cerca a la primer pared de la burbuja. Este acercamiento se traduce en la modificación de la longitud L de la cavidad FP y, por ende, en variaciones en el patrón de interferencia. El WDM permite eliminar cualquier señal residual del diodo láser utilizado para generar las burbujas. Como la generación de la burbuja es de forma continua, el *Timed.vi* es de utilidad, puesto que con un t muy pequeño, realiza el almacenamiento de los datos del interrogador casi de forma continua. El *Timed.vi* también se utilizó durante las técnicas de alineación, puesto que la mayoría de los movimientos son continuos.

Por su parte, el *Boton.vi* se utilizó cuando una vez generada la burbuja lo único que se modificaba era la posición de la fibra de monitoreo. Se optó por este programa porque los movimientos del motor son discretos, entonces, cada que se daba un paso con el motor se le indicaba al programa que guardara los datos de ese instante. Esta forma de adquisición generó un compendio de datos que contempla puntas de prueba con mismo tamaño de burbuja pero diferente posición de fibra de monitoreo.

Si a los datos espectrales obtenidos para las puntas de prueba fabricadas se le agregan los datos para muestras con misma posición de fibra de monitoreo pero distinto tamaño de burbuja, además los datos de muestras con igual tamaño de burbuja y distinta posición de fibra de monitoreo, se tiene una gran base de datos que comprende una cantidad extensa de distintas configuraciones.

4.2 Comparación con la respuesta teórica.

Un aspecto importante de la caracterización de las puntas de prueba es verificar si la longitud de la cavidad FP (L) era equivalente la distancia entre fibra y la primer pared de la burbuja, y tener una noción clara de si el patrón de interferencia obtenido experimentalmente corresponde a la ecuación del FP de dos espejos (2.14) o al de tres espejos (2.18). Para lograr esto, se utilizaron los modelos teóricos para estimar los valores esperados para la longitud de la cavidad.

El cálculo teórico de la respuesta de las cavidades se realizó con un programa en *Mathematica* [16], el cual permite simular la respuesta teórica de un FP de 2 y 3 espejos. Este programa tiene como parámetros de entrada los índices de refracción n_i , los coeficientes de reflexión r_i y la(s) longitud(es) de la(s) cavidad(es) L_i ; y, como salida, arroja la gráfica del patrón de interferencia teórico, basada en las ecuaciones (2.14) y (2.18). En la figura 4.1 se muestra una punta de prueba con la nomenclatura que se tomó en cuenta para el ingreso de datos al programa de simulación. Esta nomenclatura hace alusión a los siguientes parámetros:

Espejo 1 es la interfaz entre la punta de la fibra (SMF) de monitoreo y el PDMS.

Espejo 2 es la interfaz entre el PDMS y la primera pared de la burbuja.

Espejo 3 es la interfaz entre la segunda pared de la burbuja y la fibra con depósito o el PDMS, según sea el caso.

n_1 es el índice de refracción del núcleo de la fibra (SMF).

n_2 es el índice de refracción del PDMS.

n_3 es el índice de refracción del interior de la burbuja.

n_4 es el índice de refracción de la SMF o del PDMS, según sea el arreglo.

r_1 es el coeficiente de reflexión del *Espejo 1*.

r_2 es el coeficiente de reflexión del *Espejo 2*.

r_3 es el coeficiente de reflexión del *Espejo 3*.

L_1 es la distancia entre la punta de la fibra de monitoreo y la primera pared de la burbuja.

L_2 es el diámetro de la burbuja.

Recordando que $r = \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} + n_i}$, se tiene que:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{n_{PDMS} - n_{SMF}}{n_{PDMS} + n_{SMF}} \\ r_2 &= \frac{n_{int_{burb}} - n_{PDMS}}{n_{int_{burb}} + n_{PDMS}} \\ r_3 &= \frac{n_{SMFoPDMS} - n_{int_{burb}}}{n_{SMFoPDMS} + n_{int_{burb}}} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Considerando que r está en función de los índices de refracción, se evidencia que para la simulación únicamente se necesitan los índices de refracción y las longitudes características de la punta de prueba.

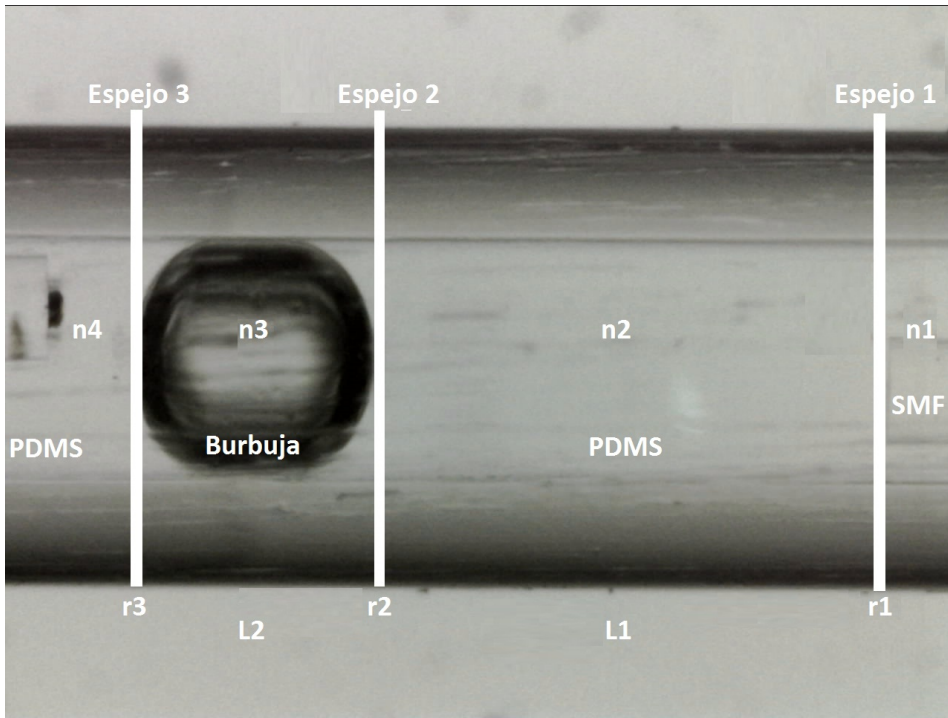


Figura 4.1: Punta de prueba mostrando la nomenclatura utilizada para la simulación.

En cuanto a los índices de refracción, en un principio se utilizaron los indicados en las especificaciones de cada uno de los materiales:

$$\begin{aligned} n_{SMF} &= 1.451 \\ n_{PDMS} &= 1.3997@1554nm \end{aligned} \tag{4.2}$$

Y se supuso que en el interior de la burbuja existía aire: $n_{int_{burb}} = 1$

Respecto a las longitudes de la cavidad, éstas se midieron con ayuda del programa *ImageJ*, el cual permite indicar la escala de la captura del microscopio en $nm - píxeles$ y con eso obtener los valores de L_1 y L_2 .

Después de realizar los cálculos de las respuestas teóricas de algunas puntas de prueba, se observó que los resultados no concordaban con los datos experimentales. Esto se puede atribuir a que el programa para la simulación teórica tiene limitaciones en cuanto a considerar otros factores además de $n's$ y $L's$ (factores como: pérdidas por absorción, por dispersión, por ángulo de incidencia, etc.). Con el objetivo de compensar estas limitaciones, se hizo necesaria la obtención de *factores de corrección* que al ingresarse al programa hicieran que la respuesta teórica fuera similar a la

4.2. COMPARACIÓN CON LA RESPUESTA TEÓRICA.

n_1	n_{SMF}	1.451
n_2	n_{PDMS}	1.934
n_3	$n_{int_{burb}}$	1.399
r_1	$r_{SMF-PDMS}$	0.1426
r_2	$r_{PDMS-Burbuja}$	0.1605

Tabla 4.1: Valores utilizados en las simulaciones.

experimental. La *Obtención de los factores de corrección* se presenta en el Anexo D, y se basa en considerar un *índice de refracción equivalente* n_{eq} para cada material. Para los experimentos reportados en este trabajo, se obtuvieron los siguientes valores: $n_{eq} = 1.934$ para el PDMS y $n_{eq} = 1.399$ para el interior de la burbuja. Teniendo estos datos, se simularon los patrones de interferencia correspondientes a los datos adquiridos experimentalmente.

En las siguientes figuras se presenta la configuración de las puntas de prueba y se hace una comparación entre los interferogramas experimentales y teóricos. En las figuras puede observarse también la evolución de la respuesta de la punta de prueba, las imágenes corresponden a tres respuestas características durante el proceso de fabricación de dos puntas de prueba distintas. En las primeras imágenes (Figuras 4.2 y 4.5) se observa el patrón de interferencia para cuando la burbuja está creciendo y está adherida al micro-calentador. Unos instantes después (Figuras 4.3 y 4.6) se detiene el crecimiento de la burbuja, por lo que el diámetro de ésta ha cambiado con respecto al anterior y en consecuencia, ha cambiado también la separación entre la fibra y la burbuja. Finalmente, las últimas imágenes (Figuras 4.4 y 4.7) muestran ejemplos de los patrones de interferencia obtenidos cuando la burbuja se ha desprendido de la FO. Nótese que cada una de estas configuraciones genera un patrón de interferencia característico, pues tanto el tamaño de la burbuja y la distancia L_1 cambian para cada una de estas etapas. También es importante resaltar que en las últimas imágenes se observa que si la fibra no está adherida a la punta con depósito se obtiene un patrón de interferencia que presenta **modulación**, por lo que este trabajo, además de buscar caracterizar la respuesta de un FP de dos espejos, también se enfocará al **FP de tres espejos**, cuya respuesta es modulada.

Para los patrones de interferencia teóricos, se utilizaron los parámetros de la tabla 4.1 en todos los casos.

Para los cálculos también se especificaron las longitudes para cada una de las configuraciones y la r de la última interfaz dependiendo del caso en específico; estas magnitudes se midieron con *ImageJ* y se presentan en la Tabla 4.2.

Dimensiones	Ejemplo 1 (um)	Ejemplo 2 (um)
Durante la generación de la burbuja r3=0.0182	L1=295.06 L2=27.778	L1=191.842 L2=97.973
Finalizada la generación de burbuja r3=0.0182	L1=100.443 L2=50.24	L1=234.865 L2=101.351
Con la burbuja desprendida de la FO r3=0.1605	L1=203.7 L2=50.24	L1=134.93 L2=23.81

Tabla 4.2: Dimensiones de las configuraciones presentadas.

4.2. COMPARACIÓN CON LA RESPUESTA TEÓRICA.

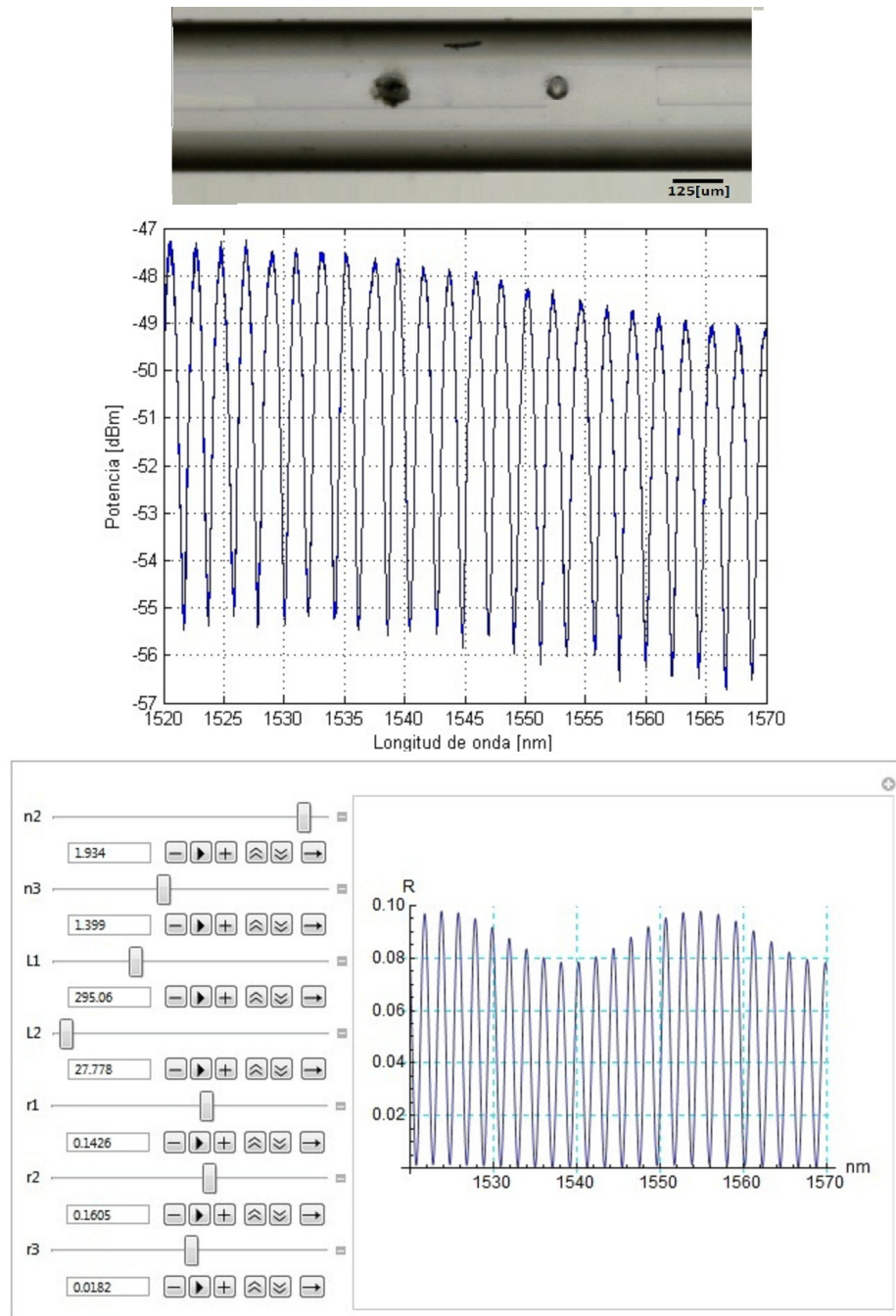


Figura 4.2: Ejemplo 1: Configuración para un instante durante la generación de la burbuja y los espectros obtenidos con el interrogador (superior) y con el programa de simulación (inferior).

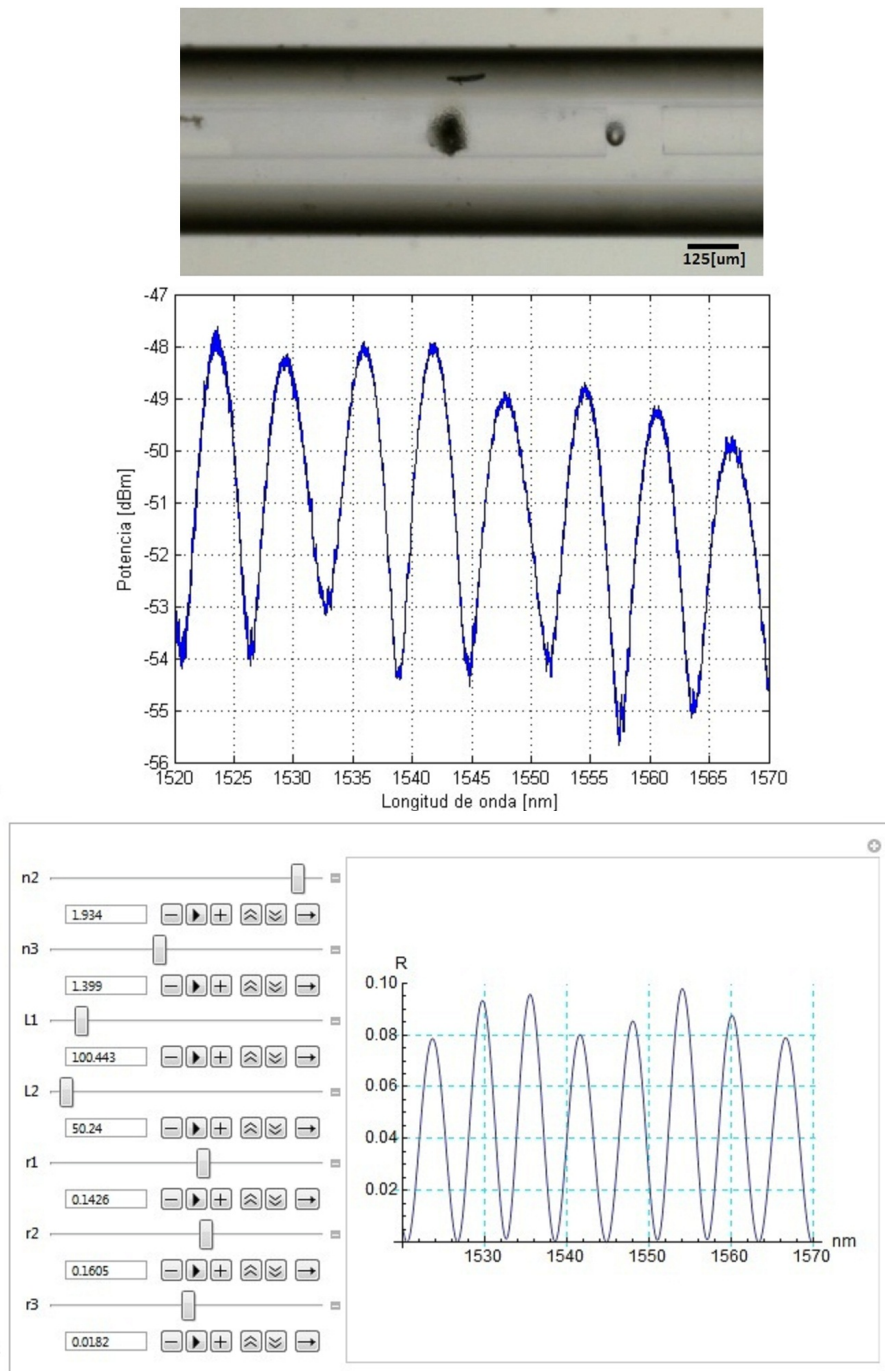


Figura 4.3: Ejemplo 1: Configuración para cuando ha finalizado la generación de la burbuja. Se muestran también los espectros obtenidos con el interrogador (superior) y con el programa de simulación (inferior).

4.2. COMPARACIÓN CON LA RESPUESTA TEÓRICA.

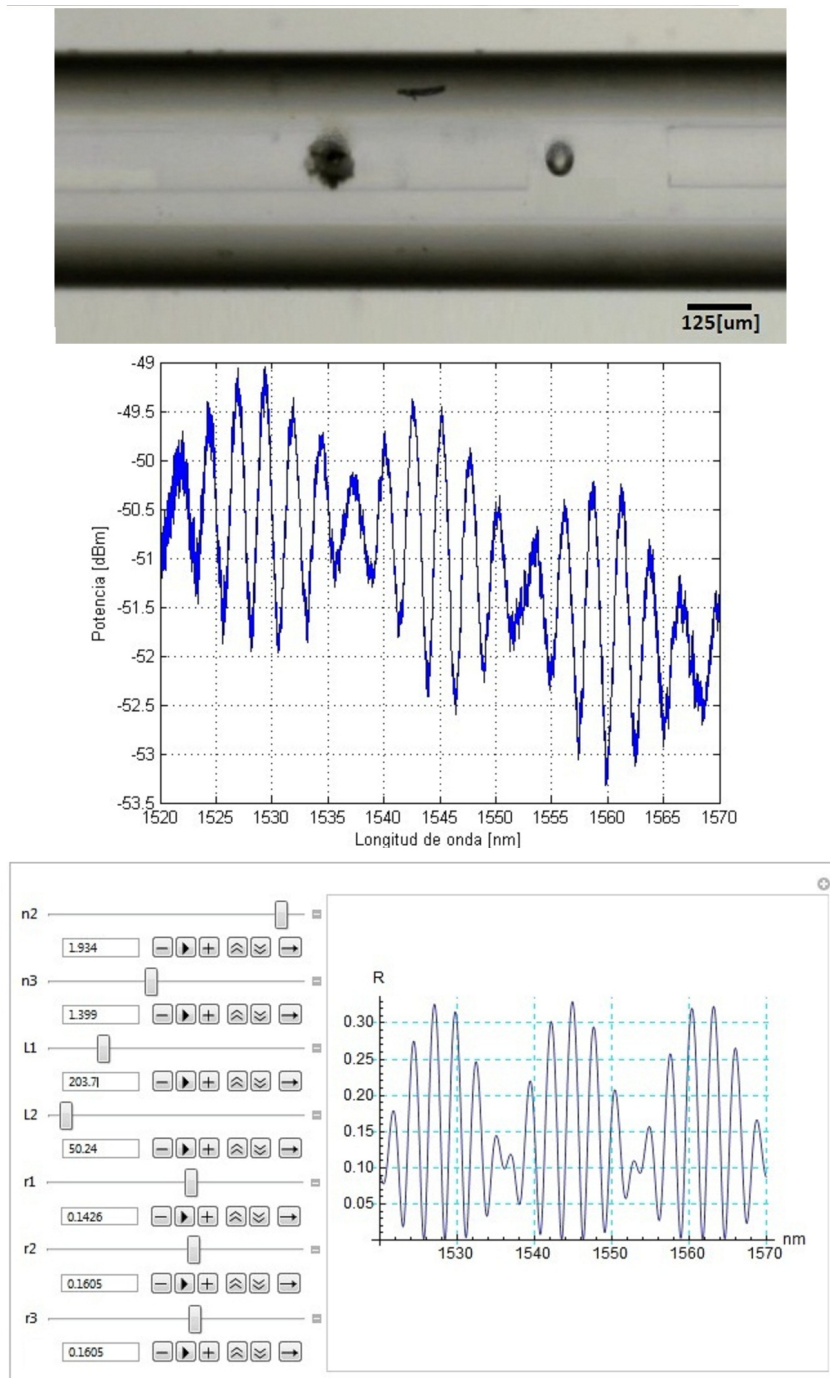


Figura 4.4: Ejemplo 1: Configuración para cuando la burbuja está desprendida del micro-calentador. Se muestran también los espectros obtenidos con el interrogador (superior) y con el programa de simulación (inferior).

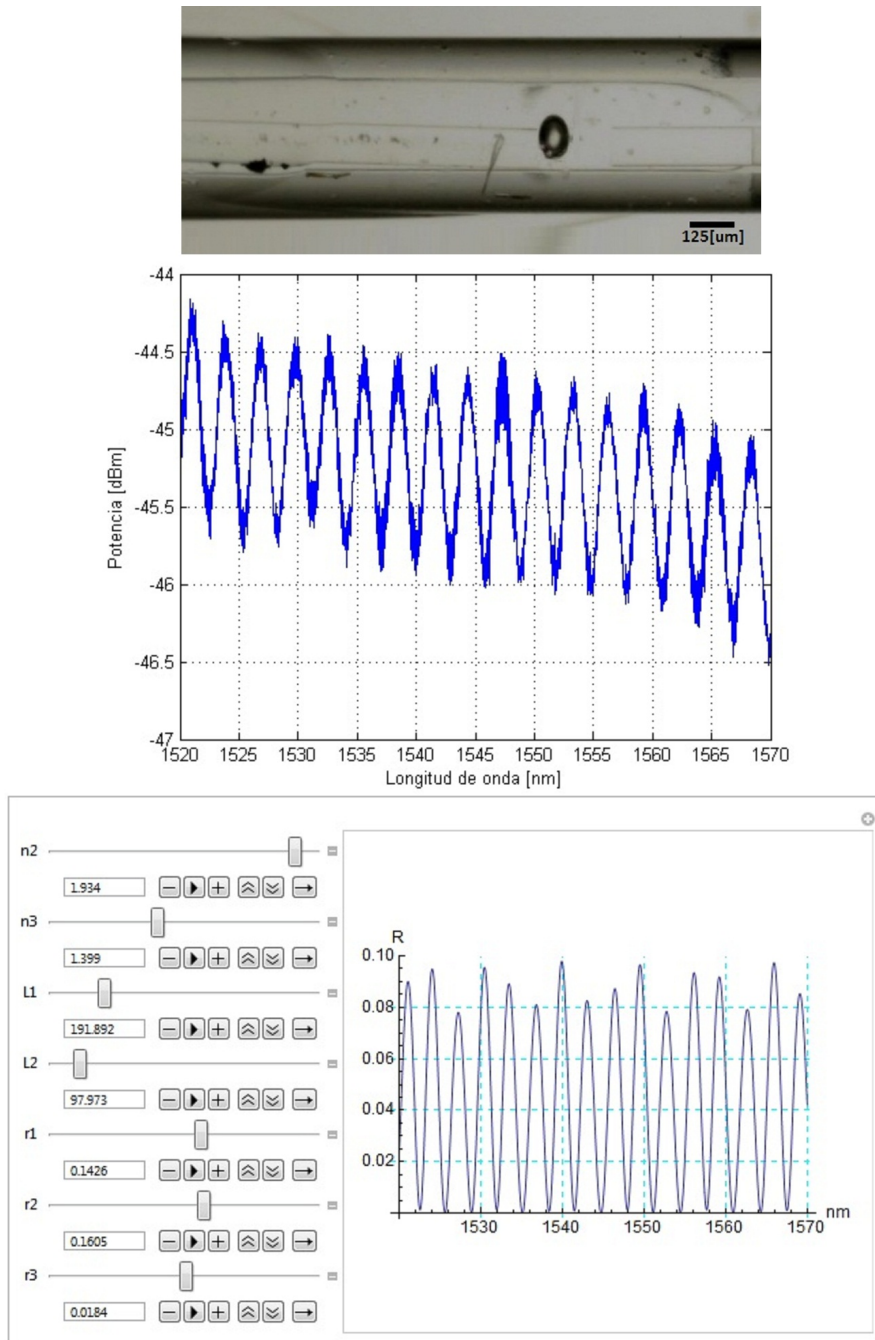


Figura 4.5: Ejemplo 2: Configuración para un instante durante la generación de la burbuja y los espectros obtenidos con el interrogador (superior) y con el programa de simulación (inferior).

4.2. COMPARACIÓN CON LA RESPUESTA TEÓRICA.

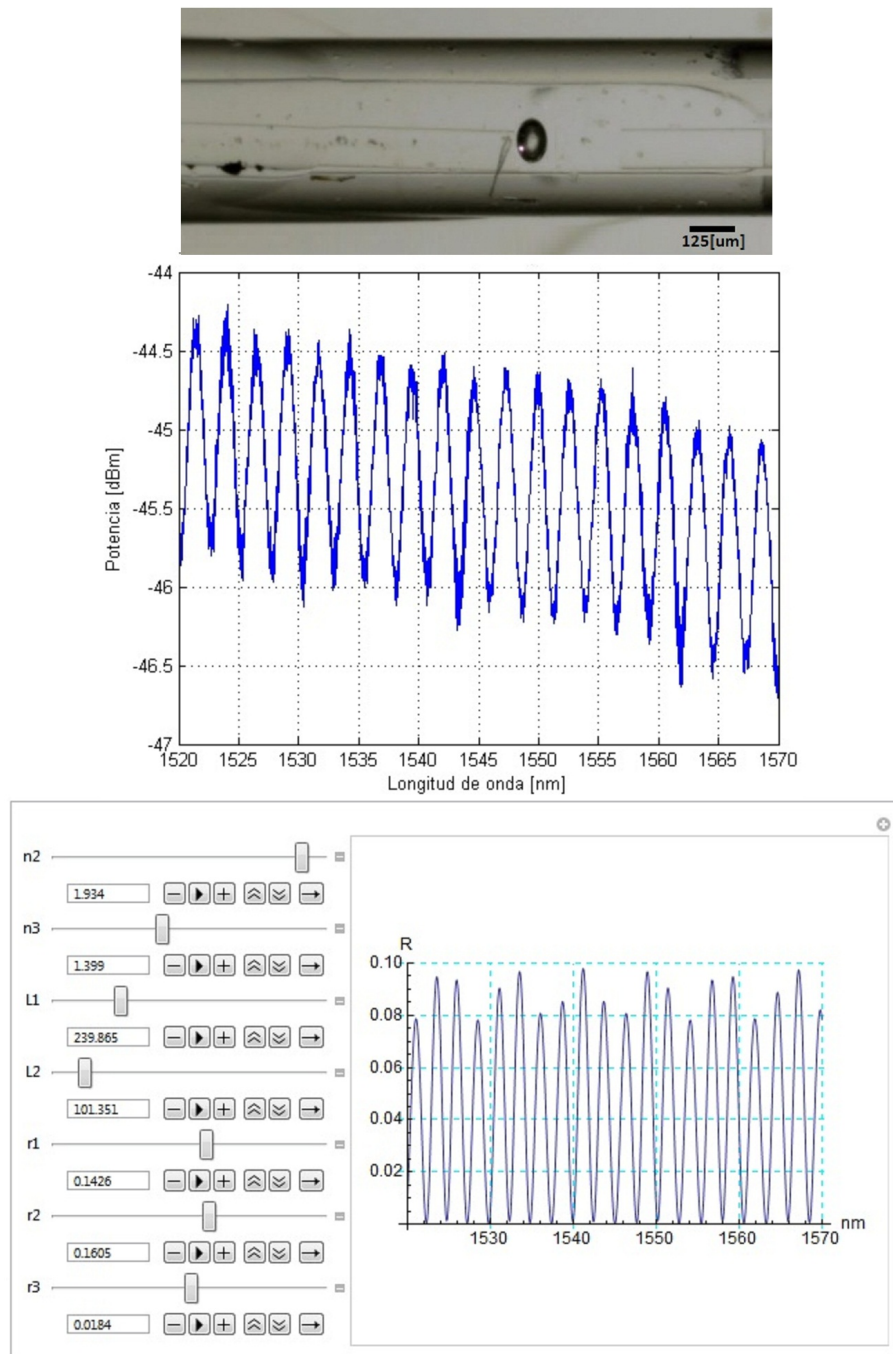


Figura 4.6: Ejemplo 2: Configuración para cuando ha finalizado la generación de la burbuja. Se muestran también los espectros obtenidos con el interrogador (superior) y con el programa de simulación (inferior).

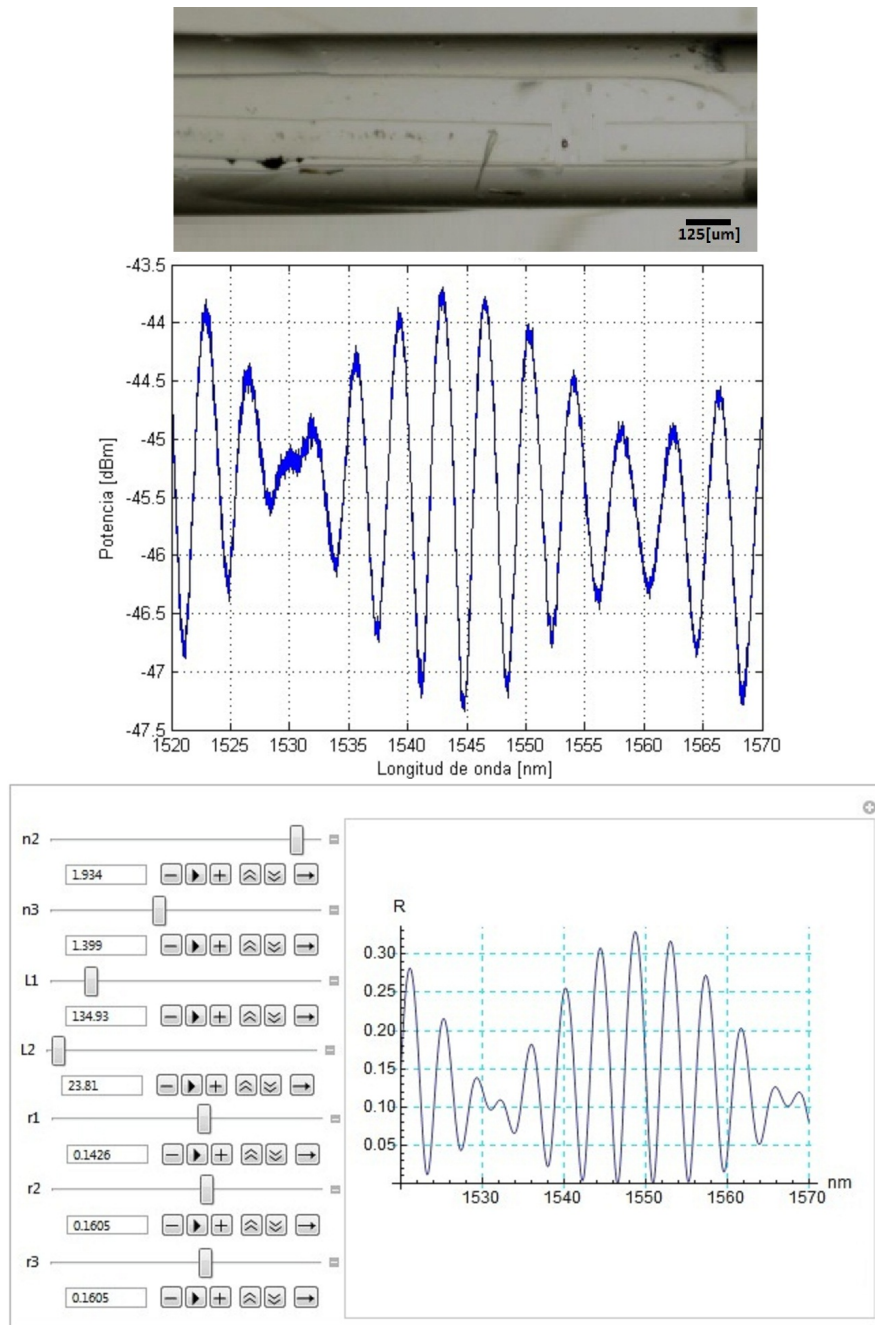


Figura 4.7: Ejemplo 2: Configuración para cuando la burbuja está desprendida del micro-calentador. Se muestran también los espectros obtenidos con el interrogador (superior) y con el programa de simulación (inferior).

4.2. COMPARACIÓN CON LA RESPUESTA TEÓRICA.

Después de analizar estas y otras muestras, se concluyó que, independientemente de la configuración obtenida, siempre es posible obtener espectros similares a los experimentos con el programa de simulación. Esto es importante porque verifica la existencia de la correspondencia teórico-experimental y el apego de los filtros ópticos fabricados al principio de operación del interferómetro FP; además el programa de simulación también puede utilizarse para predecir la respuesta de próximos experimentos.

4.2.1 Análisis del comportamiento del filtro óptico.

En el Diseño y principio de operación del filtro interferométrico Fabry-Perot (Sección 3.1), se indica que sólo dos interfaces son de interés: FO-PDMS y PDMS-Interior de la burbuja, porque se parte de la suposición de que la tercera superficie (microcalentador) tiene reflectividad nula $r_3 = 0$; esta afirmación sugiere que el modelo a utilizar es el del FP de dos espejos. Sin embargo, después de considerar los valores de los índices de refracción equivalentes obtenidos y sin considerar el efecto del microcalentador por ser desconocido, se decidió utilizar el modelo FP de tres espejos en todos los casos considerando $r_3 = 0.0182$ para poder apreciar las variaciones que este parámetro tercera superficie genera.

Debido a la concordancia entre el modelo teórico y el experimental, para determinar qué parámetros son los que determinan la respuesta de los filtros ópticos, se aprovechó el programa de simulación del FP de tres espejos para analizar cómo cambia el patrón de interferencia al modificar un parámetro a la vez. Tomando en cuenta las características de las puntas de prueba fabricadas se consideraron los valores antes mencionados en la Tabla 4.1 y quedaron como parámetros a variar de forma independiente: L_1 , L_2 y r_3 .

En cuanto a r_3 , se sabe que cuando toma el valor de cero el modelo de tres espejos se simplifica al modelo de tan sólo dos debido a que la última superficie no funge como espejo. Con el programa de simulación se comprobó esto y además se observó que conforme el valor de r_3 aumenta la existencia de una señal modulada se hace más evidente. Este tipo de efecto es de esperarse, ya que al aumentar la reflectividad de la tercera superficie, la señal reflejada aumenta y con ello también el efecto de una segunda cavidad FP (asociada a L_2 del dispositivo).

En cuanto a las longitudes, al aumentar L_1 el periodo de la señal moduladora disminuye y al aumentar L_2 el periodo de la señal portadora también disminuye. Analizando estos resultados se puede concluir que:

- Los filtros ópticos interferométricos fabricados se comportan como un interferómetro Fabry-Perot de tres espejos (dos cavidades FP) que tiene como respuesta una señal modulada cuyos parámetros dependen de L_1 , L_2 y r_3 .
- El índice de modulación lo determina r_3 . Debido a esto, cuando la burbuja queda adherida a la fibra con la que se generó ($r_3 = 0.0182$) la respuesta es

muy similar a la obtenida con un arreglo de dos espejos por lo que el índice de modulación es cercano a cero; tal es el caso de las puntas de prueba expuestas en los resultados del Capítulo 3. Cuando la burbuja se separa de la fibra con depósito, es decir, cuando se encuentra inmersa en PDMS ($r_3 = 0.1605$), el aumento en la reflectividad de la tercer superficie ocasiona que el índice de modulación aumente y la señal modulada sea más evidente.

- La primer cavidad FP del filtro está formada por la punta de la FO de monitoreo y la primera pared de la burbuja, a esta cavidad está asociada L_1 y la señal portadora. La magnitud de L_1 es inversamente proporcional a $\Delta\lambda_{portadora}$.
- La segunda cavidad FP del filtro está formada por las paredes de la burbuja, a esta cavidad está asociada L_2 y la señal moduladora (envolvente). La magnitud de L_2 es el diámetro de la burbuja y es inversamente proporcional a $\Delta\lambda_{envolvente}$.

Con estas conclusiones se tiene definida la respuesta de los filtros ópticos interferométricos fabricados, los parámetros que influyen en ésta y, cualitativamente, las aportaciones que ocasionan cada uno en el patrón de interferencia. Sin embargo, para poder concluir con la caracterización espectral de los dispositivos fabricados, resta hacer el análisis cuantitativo de la relación entre los parámetros modificables (L_1 , L_2 y r_3) y el interferograma. Dado que ya se ha explicado la aportación de los únicos dos valores que puede tomar r_3 , posteriormente se realiza únicamente la caracterización de L_1 y L_2 con respecto al $\Delta\lambda$ correspondiente.

4.3 Uso de la Transformada de Fourier.

Con el fin de poder realizar la comparación de las longitudes de la cavidad (L) con la separación entre máximos ($\Delta\lambda$), fue preciso utilizar un método que permitiera cuantificar ambos parámetros. En el caso de las longitudes se recurrió, como ya se ha comentado, a medirlas a través de ImageJ; mientras que, para cuantificar la separación entre máximos se utilizó la *transformada de Fourier*.

Se decidió utilizar la Transformada de Fourier por las múltiples ventajas que ofrece para el caso particular de los experimentos realizados, ya que después de la transformación, el resultado:

1. Está en función del número de máximos que presenta el patrón de interferencia en el rango evaluado, que es de 50 nm y va de 1520 nm a 1570 nm . Esto permite obtener $\Delta\lambda$ con tan sólo realizar el cociente del rango entre el número de máximos.
2. Permite obtener el número de máximos correspondientes a la señal portadora y a la envolvente de forma simultánea. Ya que es posible identificar las espigas

4.3. USO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER.

que corresponden a cada una de las señales que la conforman y obtener la información respectiva.

La transformada de Fourier se realizó en MATLAB con la función *Fast Fourier Transform (FFT)*. Para ejemplificar los resultados, en este apartado se muestran las FFT del Ejemplo 1. En éstas se evidencia que los espectros obtenidos efectivamente cumplen con la forma del espectro de una señal modulada. En estas figuras se indican con marcadores el número de máximos para la portadora (espiga central) y para la envolvente (banda lateral); así como la espiga secundaria cuya ubicación es múltiplo de la posición de la portadora. A estos valores se les realizó el cociente mencionado para obtener el $\Delta\lambda$ y ambos datos se almacenaron.

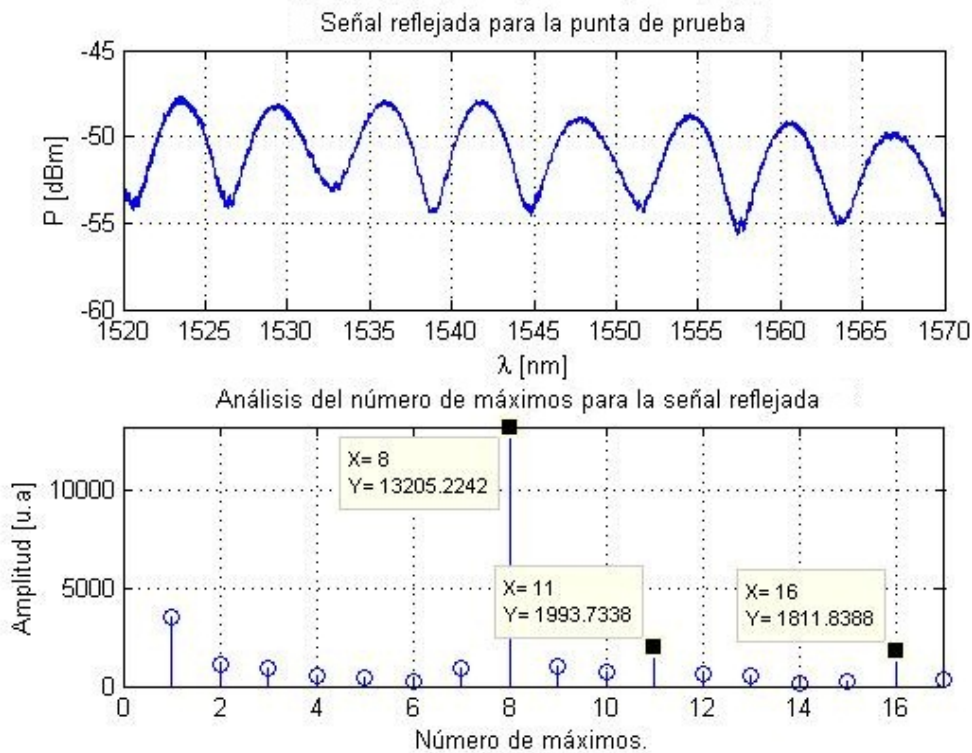


Figura 4.8: FFT del patrón de interferencia para un instante durante la generación de la burbuja.

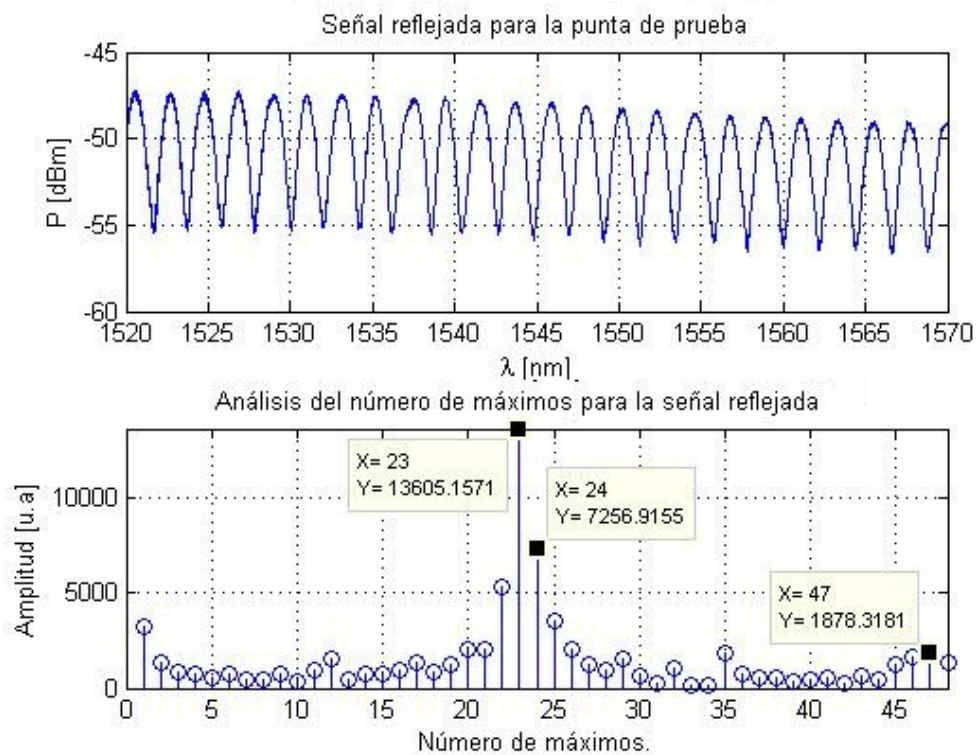


Figura 4.9: FFT del patrón de interferencia al finalizar la generación de la burbuja.

4.3. USO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER.

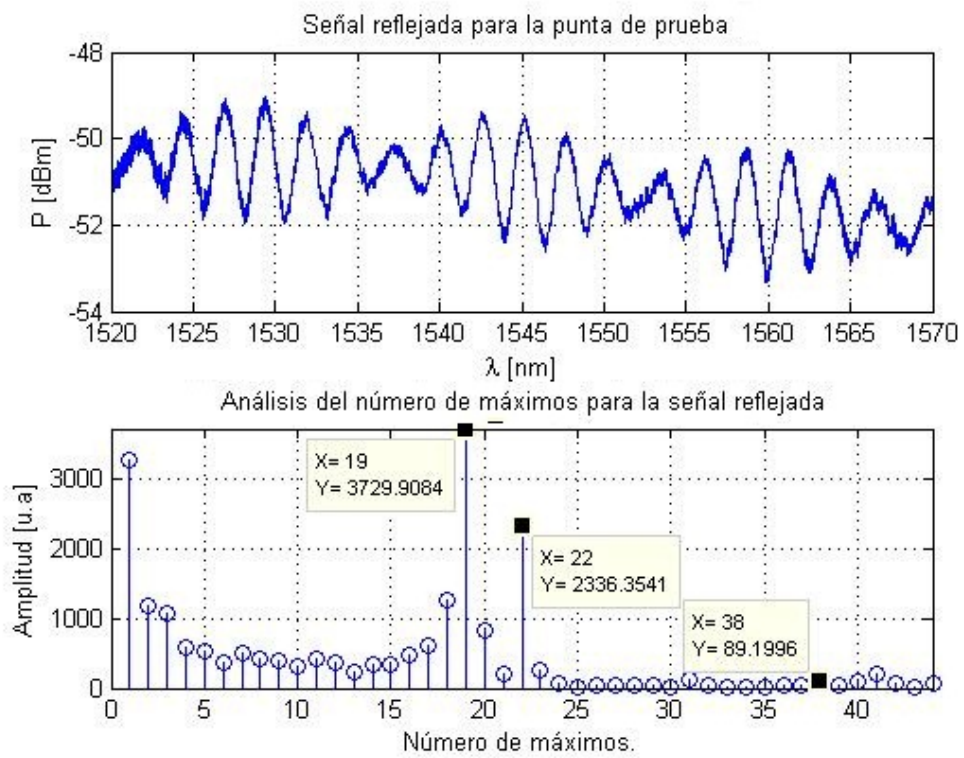


Figura 4.10: FFT del patrón de interferencia al finalizar la generación de la burbuja.

4.4 Resultados: Caracterización espectral en función de las dimensiones del dispositivo.

Los datos obtenidos con la FFT se asociaron a las longitudes medidas para cada cavidad, obteniendo como resultados las gráficas que relacionan L_1 con $\Delta\lambda_{portadora}$ y L_2 con $\Delta\lambda_{envolvente}$. Dichas gráficas que concluyen la caracterización del dispositivo relacionando las dimensiones de éste con su comportamiento espectral se muestran a continuación.

Comportamiento de los parámetros de la portadora en función de la separación fibra-burbuja.

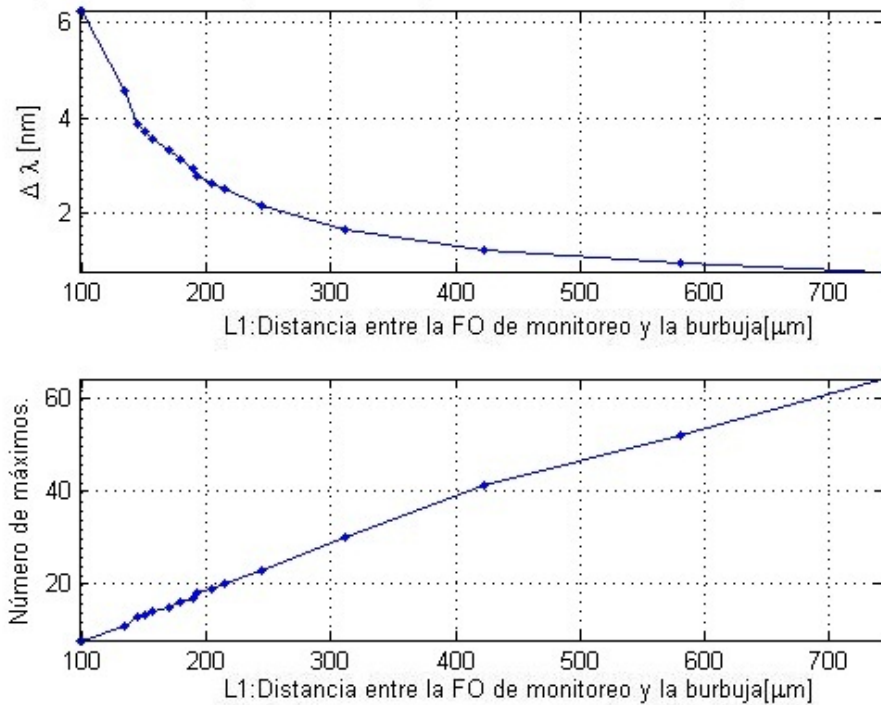


Figura 4.11: $\Delta\lambda$ y número de máximos de la portadora en función de L_1 .

En las figuras 4.11 y 4.12 se observa que la separación entre máximos, tanto para portadora como para envolvente, decae exponencialmente conforme la longitud de la cavidad respectiva aumenta.

Por otro lado, considerando la gráfica de caracterización de medios mostrada en la figura D.10, se sabe que a una distancia L el $\Delta\lambda$ es mayor conforme disminuye el índice de refracción; en las gráficas de comportamiento aquí presentadas esto se cumple. Ejemplo de ello es que a una distancia $L = 100 \mu m$ se puede apreciar que para la envolvente (medio: burbuja) se tiene un $\Delta\lambda \approx 10 nm$, mientras que para la portadora (medio: PDMS) el $\Delta\lambda \approx 6 nm$; esto debido a que $n_{int_{burb}} < n_{PDMS}$.

4.4. RESULTADOS: CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL EN FUNCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL DISPOSITIVO.

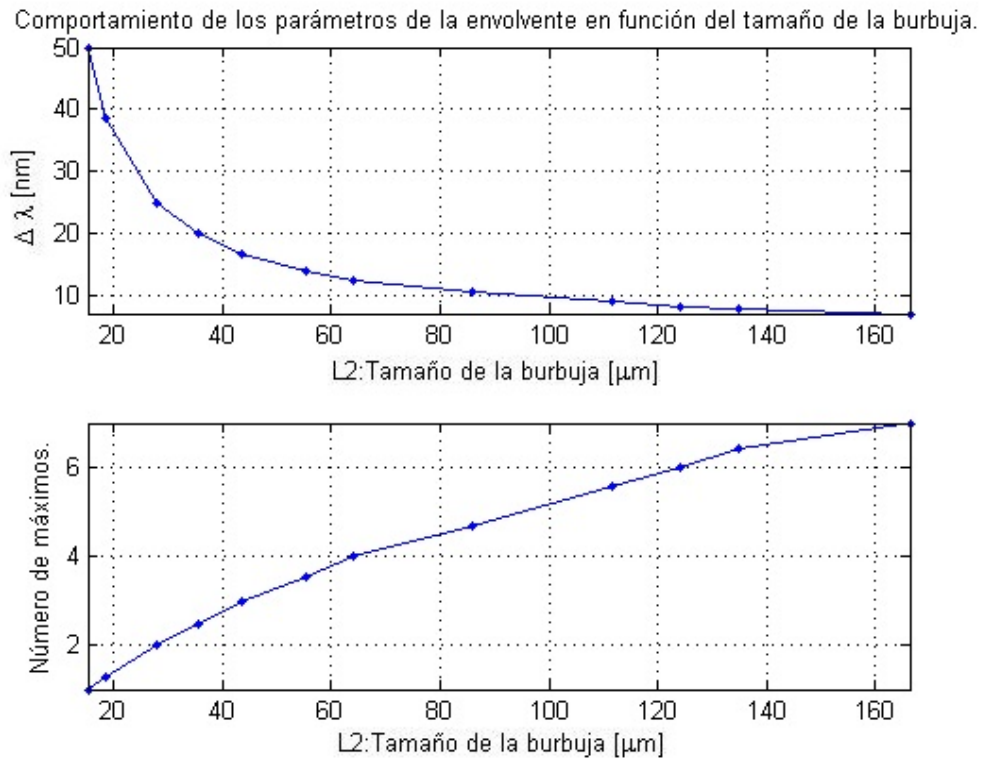


Figura 4.12: $\Delta\lambda$ y número de máximos de la envolvente en función de $L2$.

La caracterización realizada es de utilidad porque, a partir de las gráficas obtenidas y teniendo un valor deseado de ($\Delta\lambda$), se puede fabricar el dispositivo con las medidas correctas que aseguren una respuesta espectral específica. Ya que es posible predecir la respuesta de las 'n' combinaciones de $L1$ y $L2$, se pueden elegir estos parámetros simplemente determinando cuántos máximos se requieren en la portadora y cuántos en la envolvente.

Capítulo 5

Variaciones en la respuesta espectral de los filtros en función de la temperatura.

Como ya se ha mencionado, cuando el material polimérico (PDMS) es sometido a cambios de temperatura experimenta expansión térmica y alteraciones en el índice de refracción. Debido a esto, es de suponerse que los cambios en el material induzcan modificaciones en las características de la cavidad FP y, con ello, cambios en la respuesta espectral de los dispositivos fabricados. En este capítulo se analizan las variaciones en la respuesta espectral de los filtros ópticos fabricados en función de la temperatura.

5.1 Arreglo experimental y adquisición de datos.

En todos los experimentos de análisis térmico se utilizó un montaje experimental que permitiera el monitoreo de la temperatura y la adquisición de la respuesta espectral del dispositivo bajo prueba. Básicamente, este arreglo consistió en una parilla, un termómetro (*Resistance Thermometer Detector, RTD*), el interrogador SM125 y el VI de adquisición de datos.

Para lograr un cambio gradual de la temperatura y evitar que el dispositivo sufriera deterioro al exponerse a estos cambios, las puntas de prueba se introdujeron a un baño térmico. Para la realización de este baño térmico se colocó en un recipiente hielo para disminuir lo más posible la temperatura y con ello lograr un rango de análisis más amplio. Posteriormente se introdujo la punta de prueba y el RTD dentro del recipiente, y ambos se conectaron a los instrumentos de adquisición respectivos. El diagrama y la fotografía del arreglo experimental utilizado se muestran en las figuras 5.1 y 5.2 [4], respectivamente.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

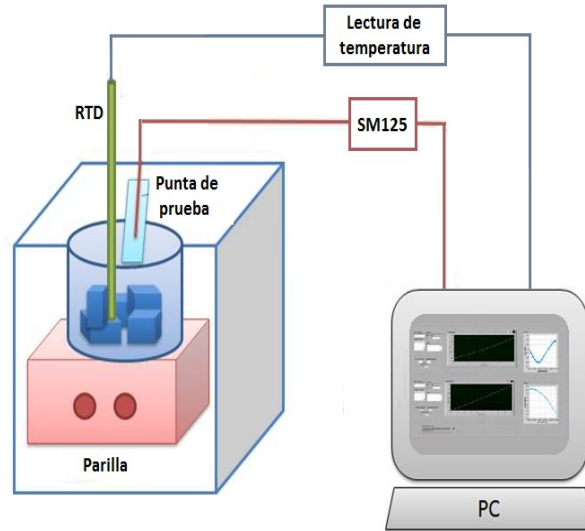


Figura 5.1: Diagrama del arreglo experimental para los experimentos de caracterización térmica (Imagen modificada).

El interrogador y el lector de temperatura del RTD, se encuentran asociados a un instrumento virtual el cual tiene como objetivo adquirir y almacenar de forma automatizada el patrón de interferencia y la temperatura registrada por el RTD durante intervalos de tiempo preestablecidos. Debido a las características de los experimentos, se realizó un VI para leer únicamente la respuesta de una punta de prueba y otro VI para la lectura de dos puntas de prueba de manera simultánea, los programas de ambos instrumentos virtuales se incluyen en el Anexo C.2.2.

Gracias a los instrumentos virtuales de adquisición de datos, al final de cada experimento, se cuenta con un archivo de texto que contiene toda la información necesaria para poder reconstruir la respuesta espectral de la punta de prueba para cada valor de temperatura registrado por el RTD. Los datos que contiene este archivo son la hora de la medición, la temperatura en ese instante y cada una de las longitudes de onda, en el rango de $1520 - 1570 \text{ nm}$ con pasos de 0.01 nm , con sus respectivas potencias.

Para el análisis de datos se utilizó otro instrumento virtual (*anatemp.vi*) cuya función es leer el archivo *txt* y desplegar dos gráficas: la primera gráfica corresponde a la potencia en función de la temperatura para una longitud de onda determinada y la otra gráfica muestra el patrón de interferencia ($P[\text{dBm}]$ vs. $\lambda[\text{nm}]$) para un número de medición específico. Debido a que el VI da la posibilidad de seleccionar la información, a través de λ o el número de medición. Este programa permite hacer un barrido para generar una vista general de lo sucedido en el experimento. Esta

5.2. EXPERIMENTO DE UN CICLO DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

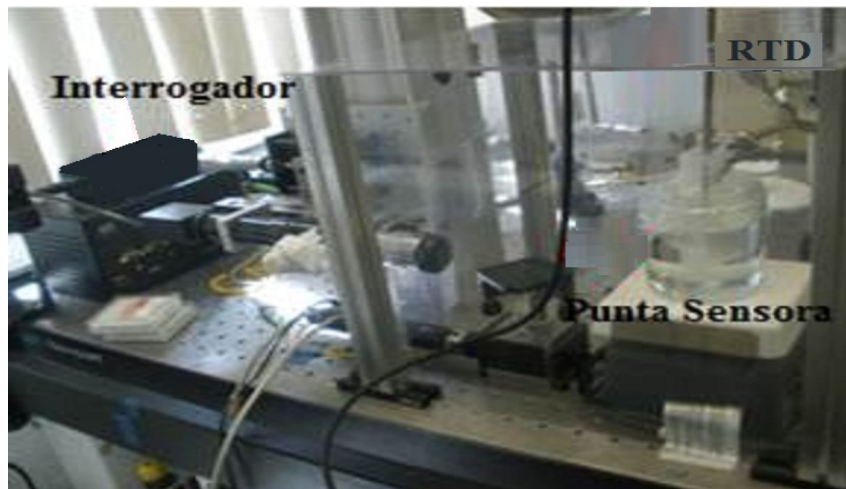


Figura 5.2: Fotografía del arreglo experimental para los experimentos de caracterización térmica (Imagen modificada).

vista previa es de utilidad para determinar la información de interés; sin embargo, el análisis de datos se realizó con Matlab. El programa concerniente a este VI se incluye en el Anexo C.2.3.

5.2 Experimento de un ciclo de ascenso y descenso de temperatura.

El primer experimento realizado para la caracterización de los parámetros espectrales en función de la temperatura fue someter la punta de prueba a un ciclo de ascenso y descenso de temperatura. Los parámetros espectrales que se midieron durante estos experimentos fueron el espaciado entre máximos ($\Delta\lambda$) y el número de picos registrados durante todo el rango espectral. Los objetivos de estas pruebas fueron analizar la respuesta de la punta de prueba durante el ascenso y descenso de temperatura, y establecer su capacidad de recobrar sus características iniciales.

El procedimiento para realizar las pruebas consiste en colocar el filtro óptico a caracterizar y el RTD en el baño térmico. Típicamente, la temperatura inicial es de aproximadamente $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ y al encender la parrilla la temperatura se incrementa hasta llegar a una temperatura constante. Para la adquisición de datos se utilizó el instrumento virtual de un canal con un tiempo de muestreo de 1 min . Para la etapa de ascenso de temperatura se realizaron 120 mediciones y para la etapa de enfriamiento se realizaron 180 mediciones con el mismo periodo de muestreo. El incremento en el número de mediciones para el enfriamiento se debe a que no hay un factor que colaboré en este proceso.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

Una vez que finaliza la prueba, se obtienen las gráficas correspondientes a la evolución de la temperatura y de los parámetros espectrales del filtro en función del tiempo. Con estos datos es posible obtener los cambios espectrales en función de la temperatura.”

En la figura 5.5 se muestra el comportamiento de la temperatura en función del tiempo para ambas etapas. Es observable que este comportamiento es gradual, con lo cual podemos descartar variaciones en el comportamiento espectral debido a modificaciones abruptas de temperatura.

Basados en los resultados obtenidos previamente en el presente trabajo, es posible hacer un análisis cualitativo de lo sucedido con la punta de prueba durante el proceso. Este análisis toma en cuenta que los cambios en temperatura generan modificaciones en las dimensiones y en el índice de refracción.

Con el modelo teórico de dos o tres espejos se pueden estimar los cambios en el tamaño de la burbuja y la longitud L conociendo los espectros para cada temperatura y, de la caracterización espectral realizada en el Capítulo 4, se sabe que conforme aumenta la longitud de la cavidad $\Delta\lambda$ nm disminuye. Por otro lado, el cambio en índice puede determinarse también con ayuda de los experimentos que se muestran en el Anexo D. En estos se muestra que para los filtros fabricados, cuando la distancia entre la fibra y la burbuja es constante pero el índice de refracción n disminuye, $\Delta\lambda$ nm aumenta.

Partiendo de estas premisas se realizaron los siguientes análisis cualitativos para cada etapa. Cabe destacar que en este experimento se sometió a prueba la punta N°5, cuya configuración y patrón de interferencia original se muestran, de nueva cuenta, en las figuras 5.3 y 5.4.

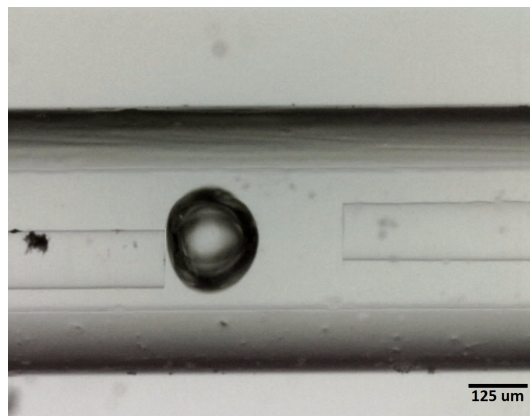


Figura 5.3: Punta de prueba N°5 vista por el microscopio.

5.2. EXPERIMENTO DE UN CICLO DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

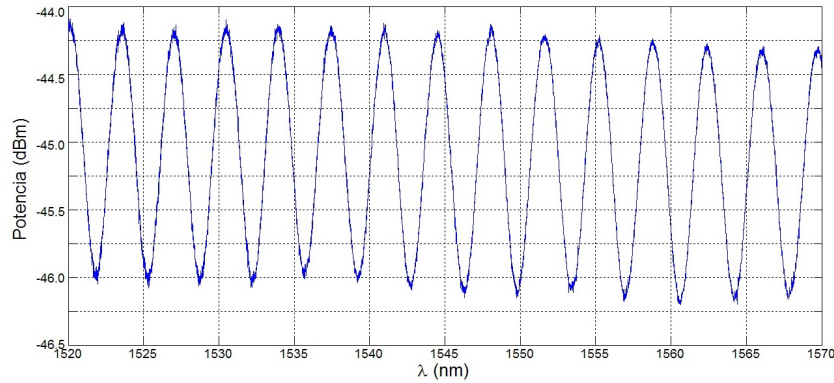


Figura 5.4: Patrón de interferencia arrojado por la punta de prueba N°5.

Para el calentamiento:

En la figura 5.6 para la etapa de calentamiento se aprecia el comportamiento desde los 24 *min* ($20.7^\circ C$) hasta los 88 *min* ($60.34^\circ C$); se eligió este rango porque antes y después de estos límites, respectivamente, no se visualiza un patrón de interferencia definido y, por lo tanto, no se pueden cuantificar de manera certera el número de máximos de dicho patrón.

Esta gráfica empieza en un valor inicial de $\Delta\lambda = 3.849 \text{ nm}$ ($T = 20.7^\circ C$), el cual decae de forma lineal hasta disminuir a $\Delta\lambda = 3.18 \text{ nm}$ ($T = 28.45^\circ C$); dada la primer premisa esto se asocia a la expansión térmica que experimenta el polímero al aumentar la temperatura. Sin embargo, esta tendencia lineal se ve interrumpida cuando $T = 30.44^\circ C$ ya que en este punto $\Delta\lambda$ incrementa su valor abruptamente a 4 nm lo cual únicamente tiene justificación considerando la segunda premisa que lleva a la deducción de que en este lapso existe una disminución en el índice de refracción del PDMS. Tras este cambio en el índice de refracción, se observa nuevamente un comportamiento lineal pero con distinta pendiente como consecuencia del cambio en el n_{PDMS} .

Posterior a esta segunda etapa lineal se presenta una serie de oscilaciones en las que se repite el comportamiento de aumento abrupto y descendencia lineal, lo cual refleja que el PDMS continua experimentando expansión térmica y cambios en el índice de refracción sin llegar a un estado constante. Como se mencionó a la temperatura $T = 60.34^\circ C$ los patrones de interferencia pierden claridad y surge la incertidumbre de si la punta de prueba ha dejado de funcionar o si con el enfriamiento experimentará cierta restitución que le permita recobrar un respuesta perceptible; dicha duda queda esclarecida al analizar la etapa de enfriamiento.

Para el enfriamiento:

En la gráfica de enfriamiento 5.6 se observa claramente como $\Delta\lambda$ tiene un comportamiento ascendente, correspondiente a la contracción térmica; este ascenso presenta pequeñas variaciones en la pendiente lo cual puede deberse a cambios mínimos en el índice de refracción del PDMS. Finalmente, el ascenso se detiene en $T \approx 50^\circ C$ y a partir de ese punto la separación entre máximos se estabiliza, manteniéndose constante hasta finalizada la prueba.

Cabe aclararse que, aunque los parámetros espectrales $\Delta\lambda$ y *número de máximos* permanecen constantes en la última etapa del experimento, existen ligeros cambios en la fase de la señal reflejada por la punta de prueba.

De estos análisis se puede afirmar que el patrón de interferencia arrojado por la punta de prueba varía en función de la temperatura a la que está expuesta; sin embargo, el patrón de interferencia arrojado por la punta de prueba es diferente para la etapa de calentamiento en comparación con la de enfriamiento a la misma temperatura. Por lo que se puede concluir que la respuesta de la punta de prueba no es reversible, aunque la etapa de calentamiento y enfriamiento si muestran tendencias opuestas.

5.2. EXPERIMENTO DE UN CICLO DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

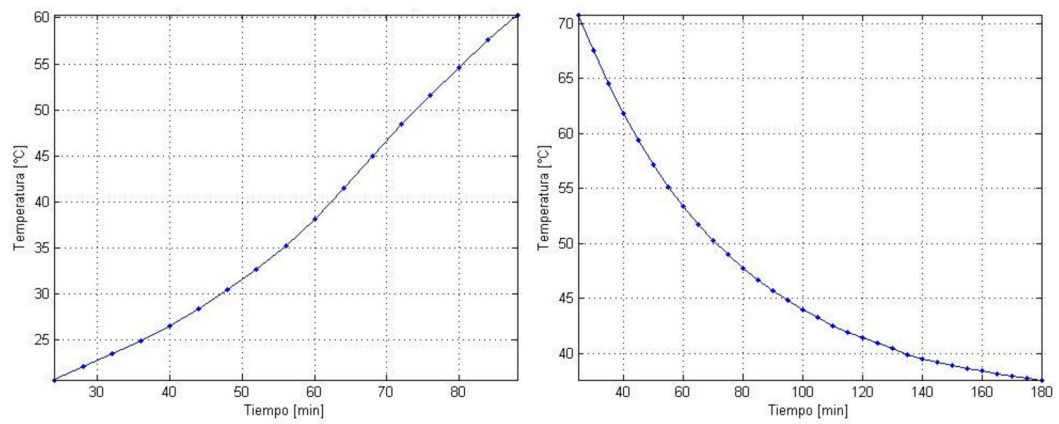


Figura 5.5: Comportamiento de la temperatura $^{\circ}C$ en función del tiempo en la etapa de calentamiento (izquierda) y enfriamiento (derecha).

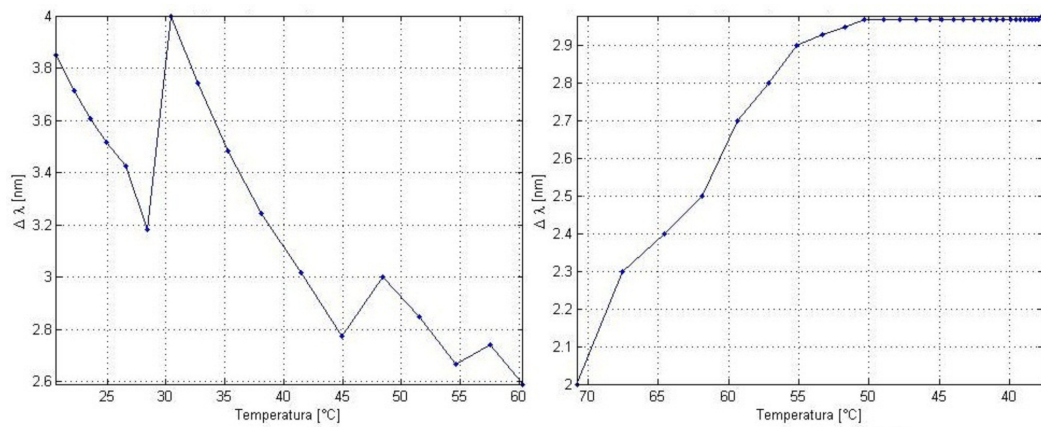


Figura 5.6: Comportamiento de $\Delta\lambda$ nm en función de la temperatura $^{\circ}C$ en la etapa de calentamiento (izquierda) y enfriamiento (derecha).

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

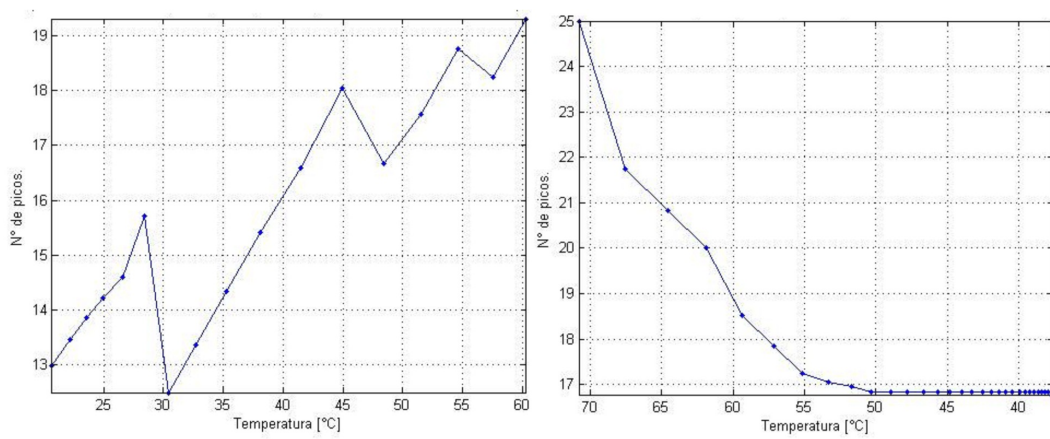


Figura 5.7: Comportamiento del Número de máximos en función de la temperatura °C en la etapa de calentamiento (izquierda) y enfriamiento (derecha).

5.3 Múltiples ciclos de ascenso y descenso de temperatura.

Después de analizar el comportamiento para una punta de prueba, se planteó la idea de repetir el experimento de un ciclo para observar si la respuesta espectral del dispositivo es repetible. Para tal fin se realizó el experimento de múltiples ciclos, el cual consiste en someter la misma punta de prueba a tres ciclos de calentamiento-enfriamiento. El experimento de múltiples ciclos se realizó con dos puntas de prueba, Punta N°5 y Punta N°7, en donde la segunda tiene un $\Delta\lambda_{potadora}$ mucho menor que la primera, esto con el fin de tener un panorama más general. La configuración de la punta de prueba N°7 y el patrón de interferencia se muestran en las figuras 5.8 y 5.9.



Figura 5.8: Punta de prueba N°7 vista por el microscopio.

La adquisición de datos se realizó con el VI de dos canales y teniendo la información necesaria, se determinaron los instantes en los que la punta de prueba alcanzó una temperatura similar para cada ciclo y se graficaron los patrones de interferencia correspondientes a esta temperatura de forma comparativa. Las gráficas de las temperaturas para las diferentes repeticiones del experimento, incluyendo el zoom del rango analizado, se observan en las figuras 5.10 para el calentamiento y 5.11 para el enfriamiento.

En las gráficas de temperatura, es apreciable que en cada una de las etapas, las tres curvas tienen la misma tendencia; esta homogeneidad es la que permite ubicar los instantes de cada ciclo en los que se tienen temperaturas similares para posteriormente graficar los patrones de interferencia y poder comparar el comportamiento de la punta de prueba para los distintos ciclos.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

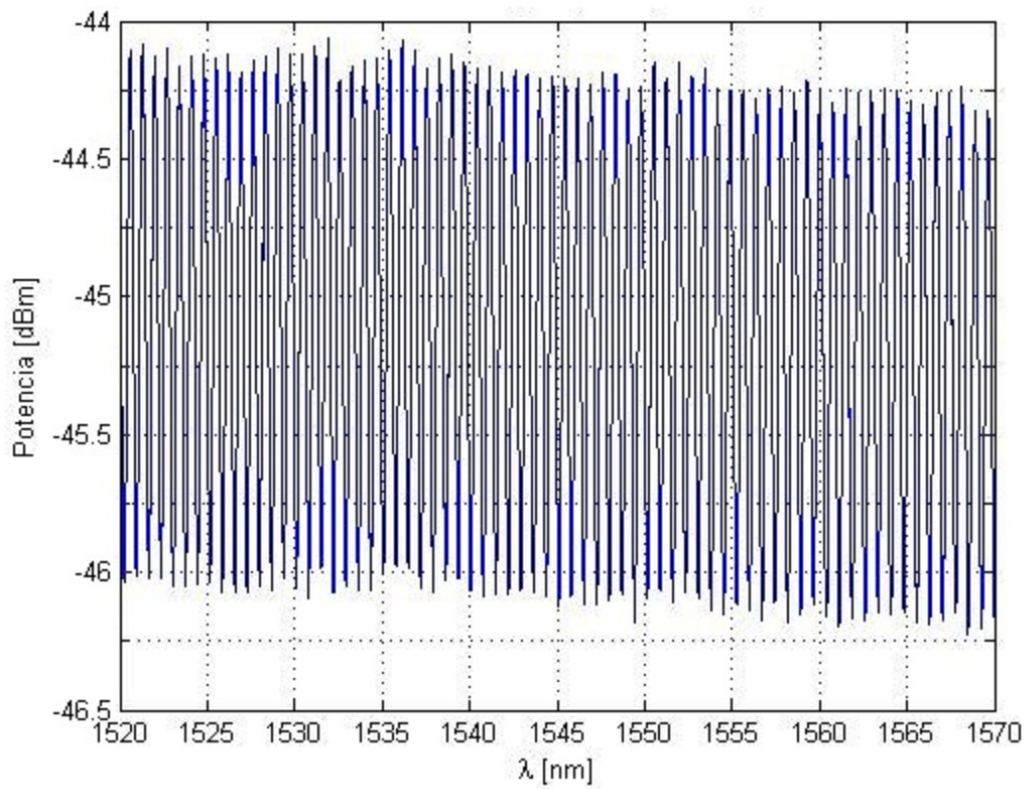


Figura 5.9: Patrón de interferencia arrojado por la punta de prueba N°7.

5.3. MÚLTIPLES CICLOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

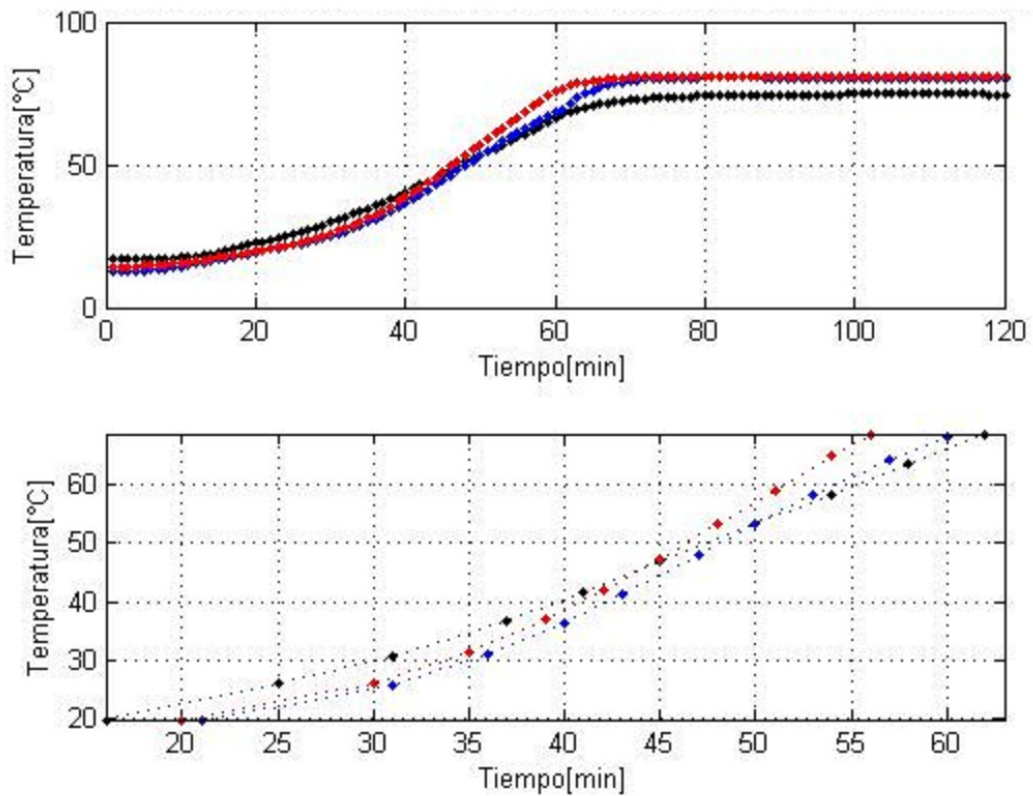


Figura 5.10: Etapa de calentamiento: Comportamiento de la temperatura $^{\circ}C$ en función del tiempo para los múltiples ciclos (superior) y un acercamiento al rango lineal considerado para el análisis (inferior).

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

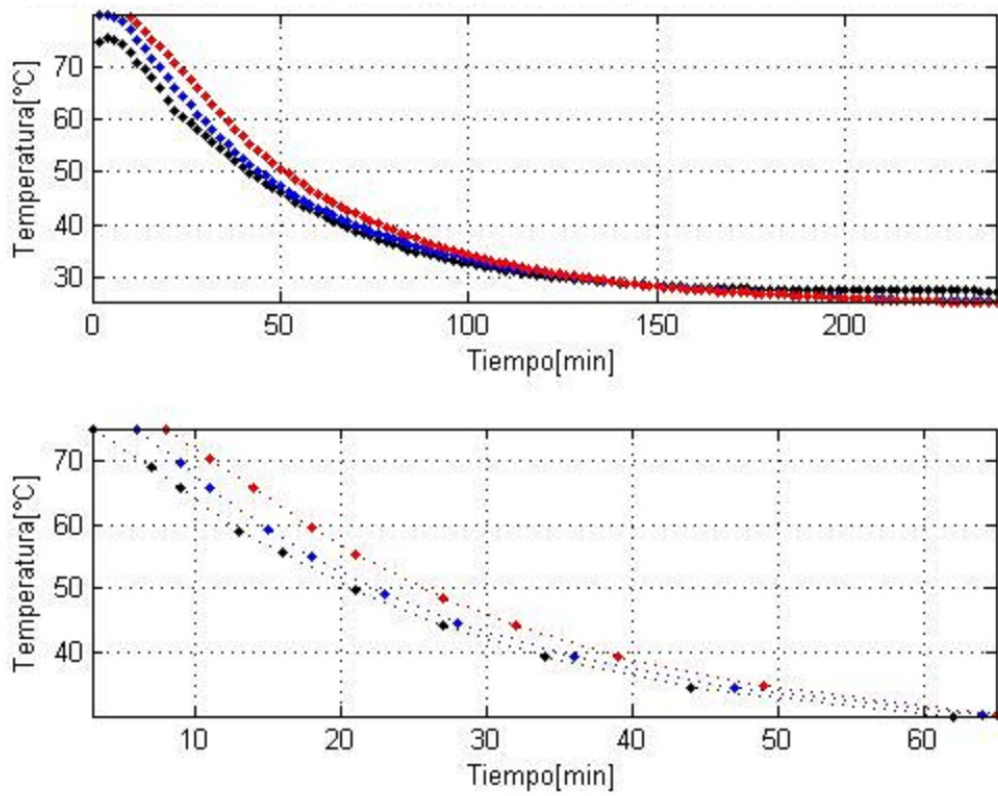


Figura 5.11: Etapa de enfriamiento: Comportamiento de la temperatura $^{\circ}C$ en función del tiempo para los múltiples ciclos (superior) y un acercamiento al rango lineal considerado para el análisis (inferior).

5.3. MÚLTIPLES CICLOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

5.3.1 Resultados para la punta de prueba N°5.

Algunas de las comparaciones de los patrones de interferencia para ciclos distintos a temperaturas similares se muestran en las figuras subsecuentes, en todas estas la señal negra corresponde al primer ciclo, la señal azul al segundo ciclo y la señal roja al tercer ciclo:

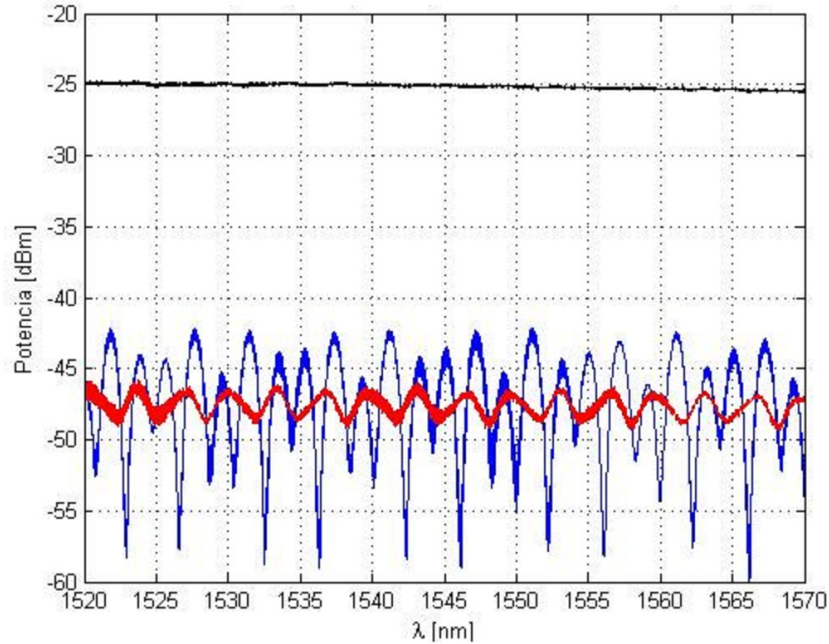


Figura 5.12: Etapa de calentamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°5 para los distintos ciclos cuando $T \approx 20^{\circ}C$.

En la figura 5.12 se aprecia que para el estado donde la temperatura comienza a tener un incremento lineal ($T \approx 20^{\circ}C$) la respuesta de la punta de prueba es muy diferente. Para el primer ciclo la respuesta tiene menores pérdidas pero no existe un patrón de interferencia evidente; lo que en primera instancia nos hace pensar que la punta de prueba ha dejado de funcionar. Sin embargo, para el segundo y tercer ciclo, aparecen patrones de interferencia evidentes pero diferentes el uno del otro (uno con modulación y otro no); con lo cual queda en claro que la punta de prueba sigue funcionando, pero su comportamiento no tiene repetibilidad en ese instante.

En la figura 5.13 se evidencia que para los $T \approx 50^{\circ}C$ el patrón de interferencia de la punta de prueba es muy similar en todos sus parámetros para los tres ciclos; este comportamiento se mantiene para temperaturas previas a los $60^{\circ}C$, en donde el comportamiento es el mostrado en la figura 5.14; en esta figura se observa que las señales no tienen claridad y es difícil encontrar un comportamiento periódico

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

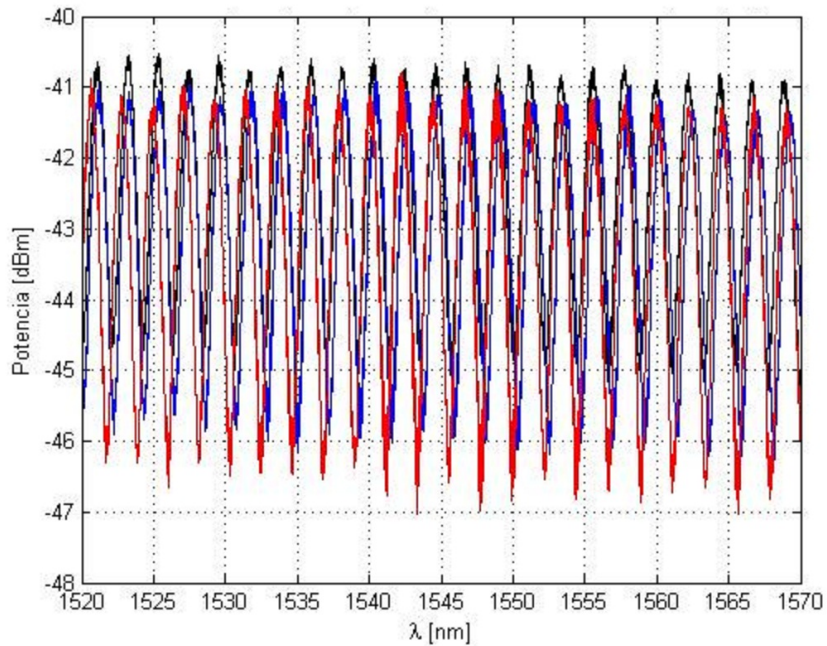


Figura 5.13: Etapa de calentamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N^o5 para los distintos ciclos cuando $T \approx 50^{\circ}C$.

o función de Airy, que es lo que se desea. Esta pérdida de respuesta coincide con lo ocurrido para el experimento de un sólo ciclo presentado anteriormente. Cabe mencionar que conforme avanza el experimento, la identificación de señales se complica aún más.

5.3. MÚLTIPLES CICLOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

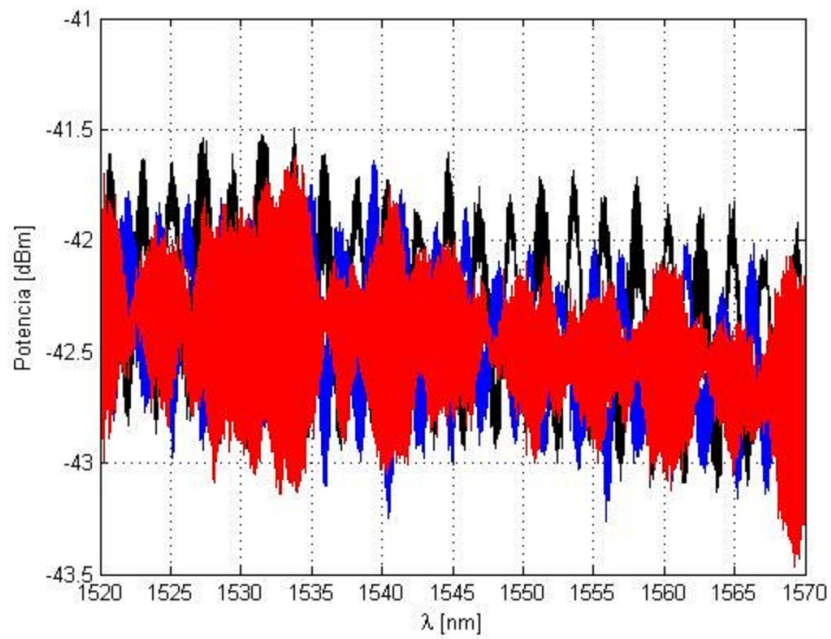


Figura 5.14: Etapa de calentamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°5 para los distintos ciclos cuando $T \approx 60^{\circ}C$.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

En lo respectivo a la etapa de enfriamiento, esta etapa comienza en el último estado del calentamiento ($T \approx 75^\circ C$), cuya respuesta se muestra en la figura 5.15 y en la cual es evidente que los patrones de interferencia pierden claridad.

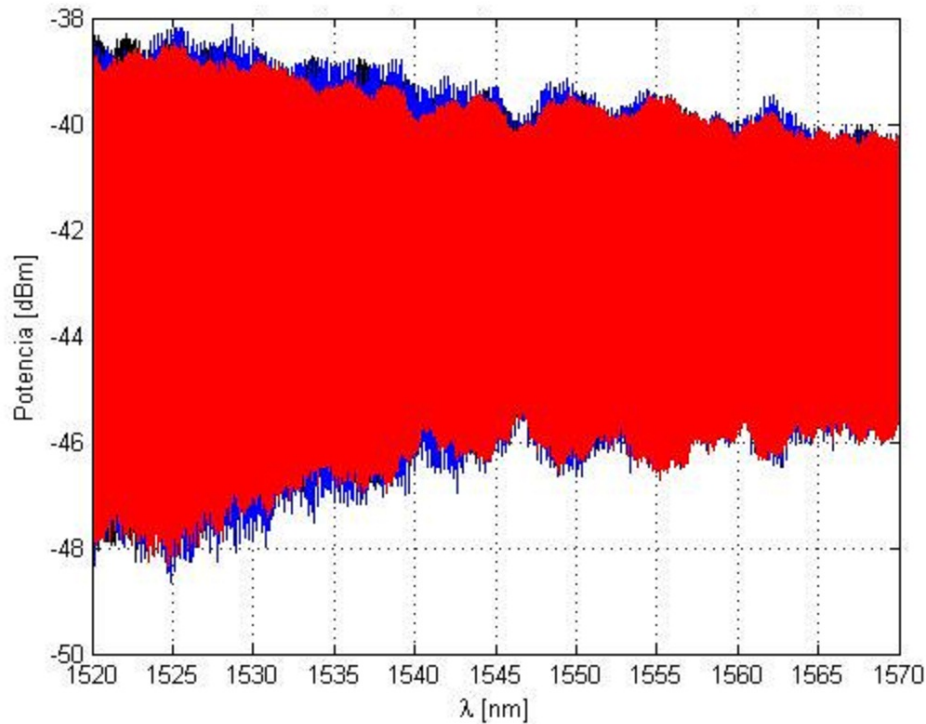


Figura 5.15: Etapa de enfriamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°5 para los distintos ciclos cuando $T \approx 75^\circ C$.

Este comportamiento continúa de manera similar hasta llegar a $T \approx 50^\circ C$, en donde la punta de prueba muestra patrones de interferencia en todos los ciclos 5.16; sin embargo, la respuesta no es tan limpia y no tiene los mismos parámetros que cuando se alcanzó en calentamiento la misma temperatura. Además, las líneas son gruesas y no tienen el mismo contraste.

Finalmente, para la última temperatura que se registró con el experimento después de las 180 mediciones de enfriamiento ($T \approx 30^\circ C$), el patrón de interferencia es claro en todos los ciclos pero los parámetros no son los mismos; lo cual se observa en la figura 5.17.

5.3. MÚLTIPLES CICLOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

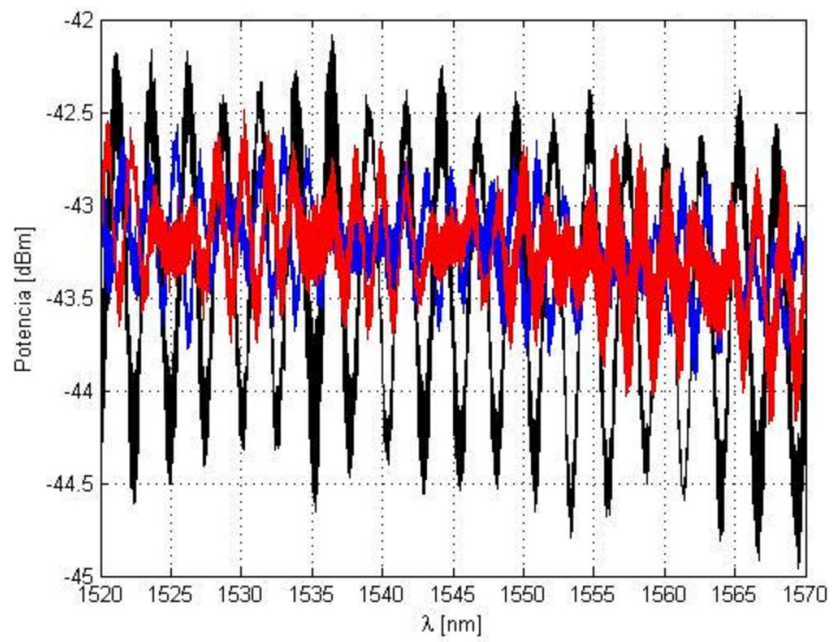


Figura 5.16: Etapa de enfriamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°5 para los distintos ciclos cuando $T \approx 50^{\circ}C$.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

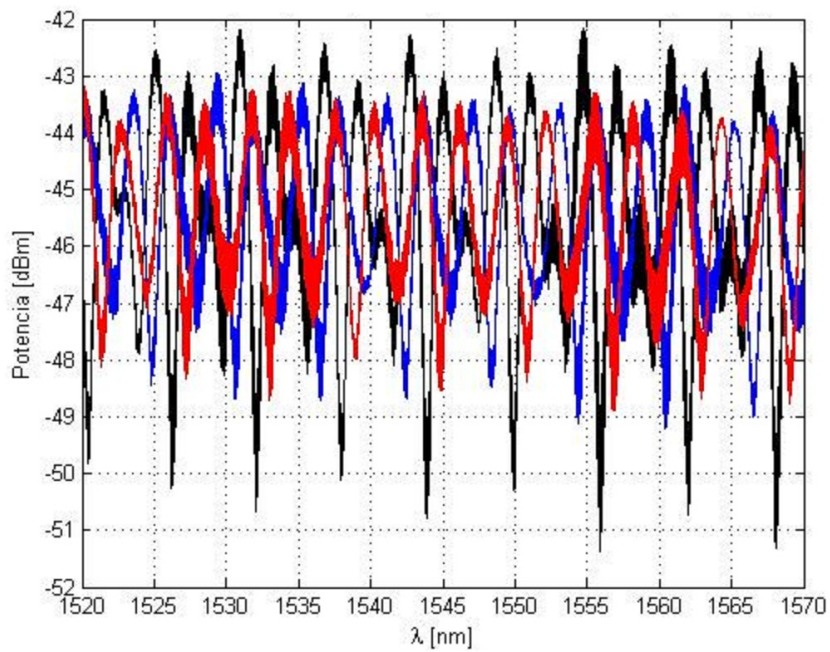


Figura 5.17: Etapa de enfriamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°5 para los distintos ciclos cuando $T \approx 30^{\circ}C$.

5.3. MÚLTIPLES CICLOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

Considerando las gráficas y los comentarios antes planteados para la punta de prueba N°5, podemos concluir parcialmente que para la punta de prueba N°5:

- En cierto rango de temperaturas ($50 - 60^{\circ}C$) la punta de prueba arroja, independientemente del ciclo, el mismo patrón de interferencia; sin embargo, fuera de este rango, el patrón de interferencia aún a la misma temperatura es diferente para cada ciclo.
- En la etapa de enfriamiento, el ancho de las líneas aumenta y el contraste disminuye, lo cual le quita claridad a los patrones de interferencia.
- En ambos casos, calentamiento y enfriamiento, se notan tres etapas claras:
 - **Aparición del patrón de interferencia.** Al inicio de la prueba, el patrón de interferencia puede ser o no claro; en algunos casos, la señal aparenta ser únicamente la componente directa y se puede llegar a pensar que la punta de prueba ha fallado. Es en $T \approx 30^{\circ}C$ cuando invariablemente para cualquier ciclo existe un patrón de interferencia definido.
 - **Igualación de patrón de interferencia.** De 50 a $60^{\circ}C$ el patrón de interferencia es el mismo independientemente del ciclo.
 - **Pérdida del patrón de interferencia.** A los $65^{\circ}C$ el patrón de interferencia producto de nuestro arreglo ya no es visible; se observan una cantidad inmensa de picos producto de una cavidad que no es propia del filtro.

5.3.2 Resultados para la punta de prueba N°7.

Posterior a analizar el comportamiento de la punta de prueba N°5, se decidió hacer el mismo experimento y análisis para la punta de prueba N°7 y los resultados fueron los presentados en este apartado.

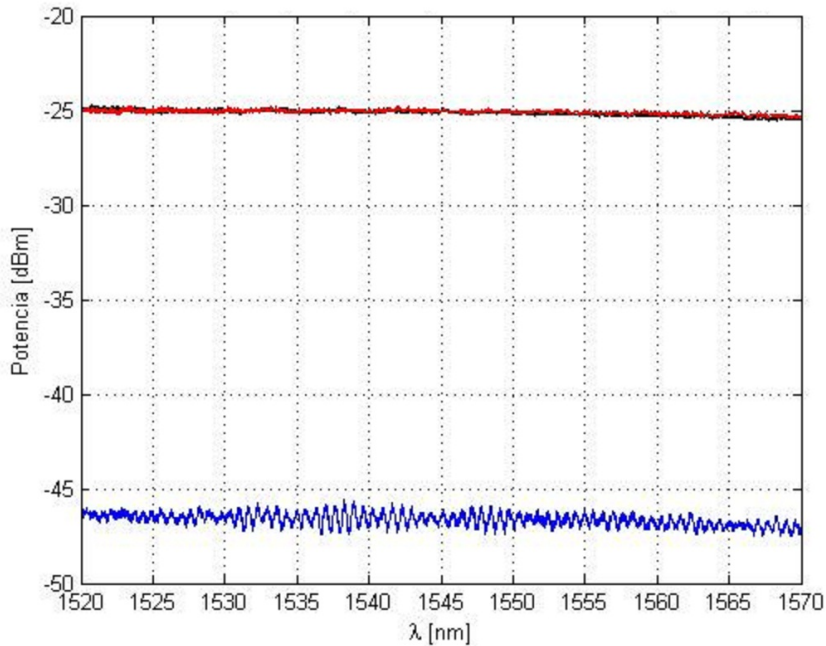


Figura 5.18: Etapa de calentamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°7 para los distintos ciclos cuando $T \approx 20^{\circ}C$.

En la figura 5.18 se aprecia que cuando ($T \approx 20^{\circ}C$) para el primer y el tercer ciclo las señales hacen pensar que la punta ha dejado funcionar; sin embargo, en el segundo ciclo, con una componente directa diferente, se muestra un patrón de interferencia definido.

En las siguientes figuras respectivas a la punta de prueba N°7 se muestra una sección del espectro ampliada (*rango de 10 nm*), esto con el objetivo de evidenciar a mayor detalle el comportamiento de la punta de prueba, ya que al permitir el paso de tantos modos es difícil identificarlos observando el rango espectral original (*1520-1570 nm*). Este dispositivo es de interés ya que tiene una selectividad alta.

la figura 5.19 muestra patrones de interferencia que tienen valores similares para cada uno de sus parámetros (DC, fase, $\Delta\lambda$ y número de picos), lo cual ocurre cuando $T \approx 50^{\circ}C$. En esta figura es claro que la portadora tiene la misma separación entre máximos para todos los ciclos y es necesario decir que el desfase entre señales es debido a la existencia y los cambios de la señal moduladora.

5.3. MÚLTIPLES CICLOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

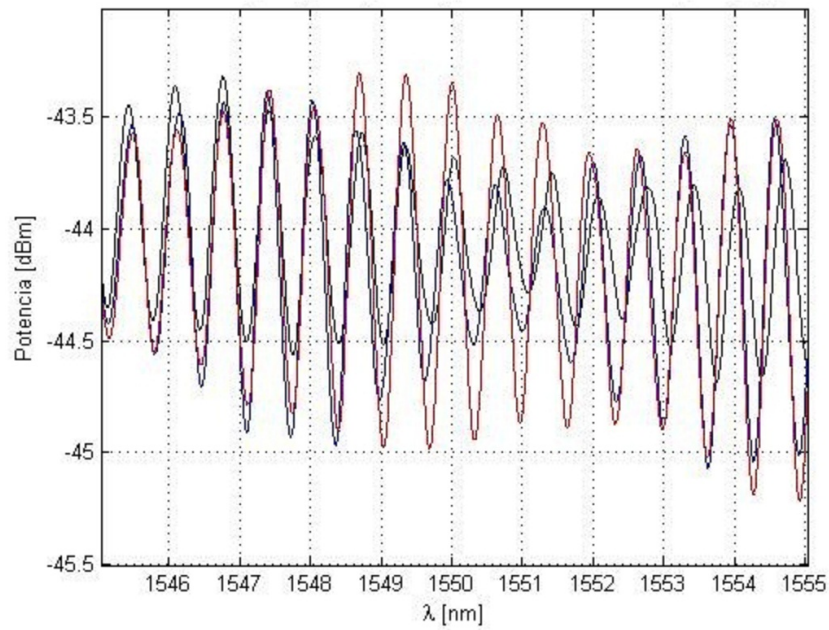


Figura 5.19: Etapa de calentamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°7 para los distintos ciclos cuando $T \approx 50^{\circ}C$.

En el caso de esta punta de prueba, el patrón de interferencia se mantiene a pesar de seguir con el calentamiento y llegar a las mismas temperaturas con las que los patrones de interferencia de la punta de prueba N°5 dejaban de ser claros. Esto se observa en la figura 5.20.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

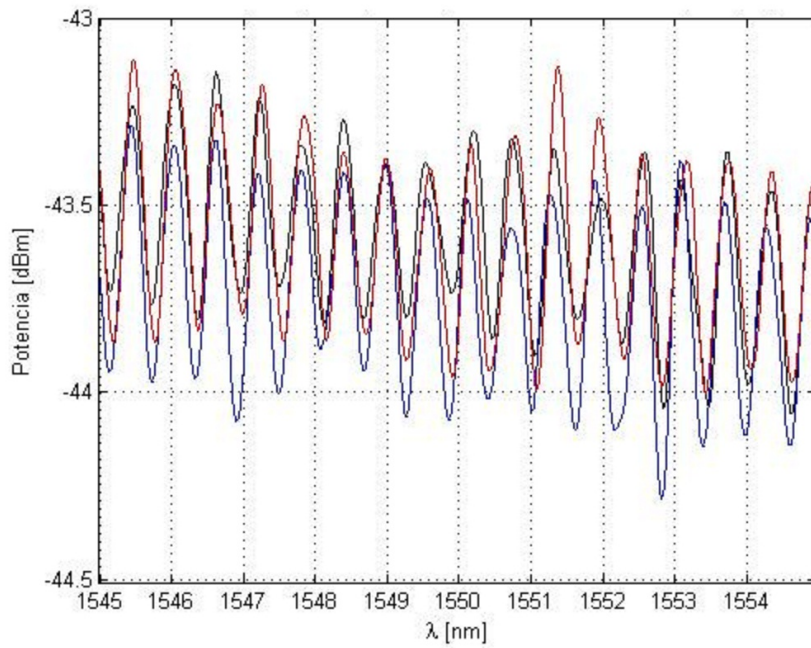


Figura 5.20: Etapa de calentamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°7 para los distintos ciclos cuando $T \approx 70^{\circ}C$.

5.3. MÚLTIPLES CICLOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

En lo respectivo a la etapa de enfriamiento, se hayaron los siguientes resultados:

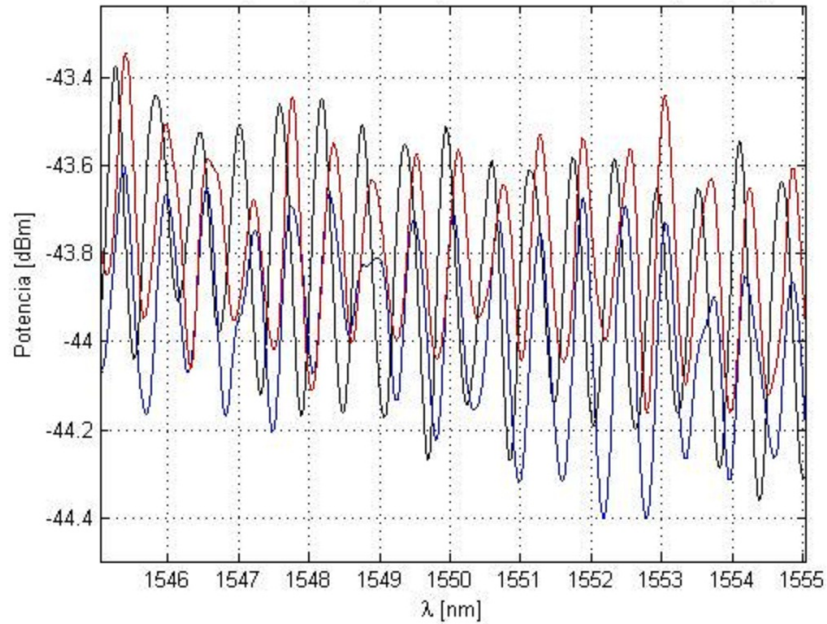


Figura 5.21: Etapa de enfriamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°7 para los distintos ciclos cuando $T \approx 75^{\circ}C$.

En la figura 5.21 es observable que el patrón de interferencia, a pesar de estar a la misma temperatura, en enfriamiento no es el mismo que para la etapa de calentamiento, pero para los tres ciclos se mantiene un patrón de interferencia similar. Este comportamiento es similar durante todo el proceso de enfriamiento por lo que únicamente se presenta el resultado para la última temperatura a la que llegó el experimento después de las 180 mediciones de enfriamiento ($T \approx 30^{\circ}C$) 5.22, en el cual el patrón de interferencia es claro en todos los ciclos pero los parámetros no son los mismos; el periodo de la portadora es el mismo, pero la envolvente modifica la fase entre máximos de la respuesta del dispositivo para cada uno de los ciclos.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

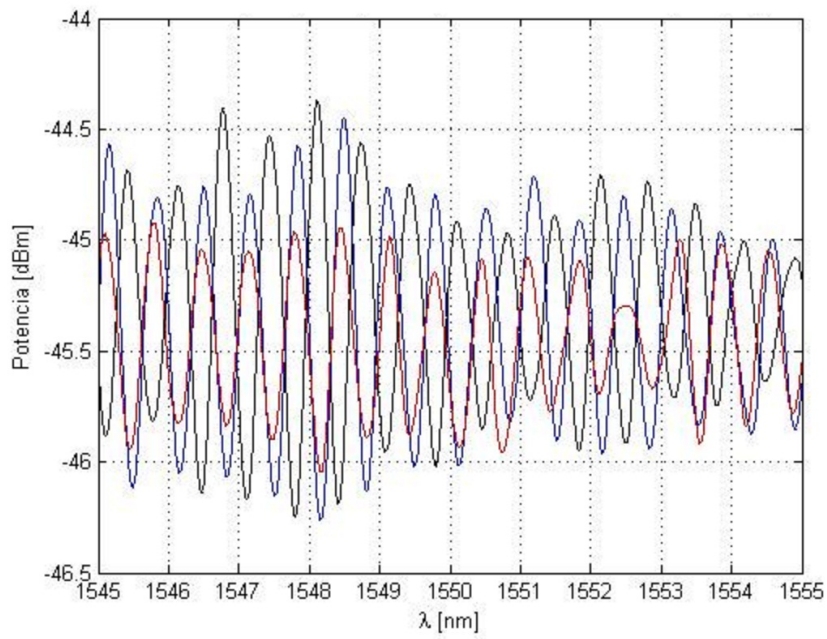


Figura 5.22: Etapa de enfriamiento: Señales reflejadas por la punta de prueba N°7 para los distintos ciclos cuando $T \approx 50^{\circ}C$.

5.3. MÚLTIPLES CICLOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE TEMPERATURA.

Dado el análisis, las conclusiones de forma parcial para la punta de prueba N°7, con separación entre máximos mucho menor al de la punta N°5, son:

- En cierto rango de temperaturas, 50-75°C en ascenso, 75-30°C en descenso, la punta de prueba arroja, independientemente del ciclo, la misma señal portadora en el patrón de interferencia; sin embargo, la envolvente se va modificando invariablemente con la temperatura, lo que ocasiona que la respuesta del dispositivo nunca sea la misma entre un ciclo y otro.
- En la etapa de enfriamiento, las señales mantienen la DC y el contraste, por lo que se obtienen patrones de interferencia distinguibles.
- En ambos casos, calentamiento y enfriamiento, se notan dos etapas claras:
 - **Aparición patrón de interferencia.** Al inicio de la prueba, el patrón de interferencia puede ser o no claro; en algunos casos, la señal aparenta ser únicamente DC. En $T = 30^{\circ}C$ invariablemente para cualquier ciclo existe un patrón de interferencia definido.
 - **Igualación de los parámetros de la señal portadora.** A partir de los $50^{\circ}C$ la señal portadora es la misma independientemente del ciclo; sin embargo, la envolvente nunca es la misma.

5.3.3 Análisis comparativo entre las puntas de prueba.

Considerando los análisis de ambas puntas antes realizados, es posible resaltar los siguientes puntos concluyentes de forma general para el experimento de múltiples ciclos:

1. Es evidente que la respuesta de la punta de prueba es dependiente de la temperatura; lo cual nos permite asegurar que el filtro puede sintonizarse con este factor externo.
2. Existe un rango de temperatura en el que la portadora conserva su $\Delta\lambda$ y amplitud independientemente del ciclo, por lo que puede considerarse como el rango de operación estable para el dispositivo. Cabe señalar que este rango es distinto para cada punta de prueba.
3. Dependiendo del periodo de la envolvente los cambios de fase entre los distintos ciclos se evidencian. Conforme aumenta el periodo de la envolvente los cambios en fase son menos identificables; de tal forma que si la envolvente no es notable los cambios de fase tampoco lo serán (Punta N°5). Caso contrario ocurre con las puntas de prueba cuya respuesta tiene una envolvente de periodo corto (Punta N°7), en las cuales los cambios de fase son más perceptibles.
4. El comportamiento de la punta de prueba a la misma temperatura es diferente para la etapa de calentamiento en comparación a la de enfriamiento, puesto que la respuesta de la punta de prueba no es reversible.
5. En la etapa de calentamiento los patrones de interferencia presentan mayor nitidez y una clara periodicidad en comparación a los obtenidos para el proceso de enfriamiento.
6. Los experimentos con las dos puntas de pruebas muestran que, invariablemente, a los $30^{\circ}C$ existe patrón de interferencia.
7. Las variaciones más importantes en el patrón de interferencia debidas a la temperatura se presentan en la envolvente; tomando en cuenta esto, se puede afirmar que los cambios de temperatura afectan en mayor medida en el tamaño de la burbuja.

5.4 Experimento a temperatura constante.

Con el objetivo de descartar que las variaciones en el patrón de interferencia de las puntas de prueba analizadas con múltiples ciclos de temperatura se debieran a que el dispositivo no estuviera totalmente curado en lugar de ser consecuencia de los propios cambios térmicos, se optó por hacer un experimento que nos permitiera saber las condiciones en las que el PDMS curaba en su totalidad; dicho experimento se explica a continuación.

Para el experimento se utilizaron:

1. Una punta de prueba con el arreglo propuesto en este trabajo; dos fibras y una burbuja dentro de un capilar con PDMS previamente curado (Punta N°5).
2. Una punta de prueba que consta de un capilar con únicamente dos fibras embebidas en PDMS sin curar.

Ambas puntas de prueba se sometieron a una temperatura constante de 40°C durante 24 horas.

Debido a que las parrillas con las que se cuentan en el laboratorio no proporcionan temperaturas bajas ni exactas por estar diseñadas para su uso altas temperaturas, fue necesario idear otra forma para lograr el objetivo de temperatura constante. La solución fue colocar en una parrilla agua para calentarla hasta que la temperatura fuera de aproximadamente la deseada, después de eso poner en operación la parrilla en su menor intensidad con el único fin de estabilizar en un valor constante a la temperatura y, finalmente, teniendo la temperatura deseada ingresar en el recipiente ambas puntas de prueba.

La punta de prueba con el PDMS sin curar tiene como fin realizar el monitoreo de los cambios que sufre el polímero conforme avanza el tiempo en su proceso de curación; además de servir como referencia para identificar la magnitud en las variaciones del PDMS no curado y compararlas con las de la punta de prueba 'curada' para con ello verificar qué tan correcta es esta última afirmación.

El proceso se dividió en dos etapas, la primera constó de 18 horas continuas en las que la temperatura tuvo una variación máxima de 2°C y la segunda etapa se realizó el día siguiente, con una duración 6 horas con un desvío de 0.4°C . En la primer etapa el objetivo es monitorear el cambio en ambos patrones de interferencia, con PDMS curado y sin curar, y cuantificar las variaciones en sus parámetros $\Delta\lambda$, número de picos y fase, por cada hora. La segunda etapa tiene como último fin demostrar que después de esta etapa de curado el patrón de interferencia ya no sufre cambios puesto que se encuentra a temperatura constante y el material polimérico está curado totalmente. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras presentadas en este apartado.

Analizando la figura 5.23 (PDMS curado), es evidente que los parámetros $\Delta\lambda$ y número de picos no sufren variaciones durante el experimento; mientras que, en la

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

figura 5.24 (PDMS sin curar) se ve que estos parámetros van aumentando de forma gradual y escalonada hasta llegar a un valor en donde se estabiliza, lo cual ocurre después de 14 horas de su colocación.

Ahora, enfocándonos a la segunda etapa, cuyo objetivo es la verificación del estado de curación del PDMS, en la figura 5.25 y 5.26, observamos que para ambas puntas de prueba la separación entre máximos y el número de estos permanece constante.

Tomando en cuenta las cuatro gráficas se puede concluir que:

- Si el polímero no está curado, el patrón de interferencia del dispositivo presentará cambios graduales en sus parámetros debido al proceso de curación. De estar curado, el patrón de interferencia conservará $\Delta\lambda$ y número de picos constantes.
- El polímero solidifica y cura de manera efectiva colocándolo 14 horas a una temperatura constante de $40^{\circ}C$.
- Al finalizar la primera etapa ambas puntas de prueba estaban curadas, lo cual se demostró en la segunda etapa en cuyo caso los parámetros espectrales se mantuvieron constantes.

Es importante hacer notar una fina observación del experimento sobre la cual no se tiene una explicación certera de lo sucedido: el cambio de fase de los interferogramas de los dispositivos, puesto que el comportamiento en ese sentido que presentan las puntas de prueba es muy diferente el uno del otro. En el caso de la punta de prueba curada meses antes, el defasamiento no tiene una tendencia aparente, sufre varios ciclos de ascenso y descenso; sin embargo, para la otra punta de prueba, en ambas etapas, la gráfica de comportamiento del cambio de fase tiene una forma muy similar a la gráfica de temperatura. Este cambio de tendencia podría deberse a que los cambios de fase son más perceptibles cuando el periodo de la portadora es pequeño, lo cual hace que tan sólo una fracción de nanómetros de variación en la ubicación de un pico representen cambios de fase muy drásticos; en tanto que a periodos de portadora más elevados, como en el caso de la segunda punta de prueba (sin curar), las variaciones sean más suaves; sin embargo, hasta el momento no se tienen las pruebas suficientes para hacer de este argumento algo concluyente.

5.4.1 Conclusiones.

Finalmente, las dos conclusiones fundamentales de este experimento son que:

- El polímero solidifica y cura de manera efectiva colocándolo 14 horas a una temperatura constante de $40^{\circ}C$.

5.4. EXPERIMENTO A TEMPERATURA CONSTANTE.

- Este experimento demostró que la punta de prueba que fue sometida previamente a ciclos de calentamiento-enfriamiento estaba totalmente curada; por lo que se puede confiar que los resultados obtenidos de manera previa para los ciclos son debidos únicamente a las modificaciones térmicas a las que fue sometido el dispositivo y no a aspectos de curación del polímero.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

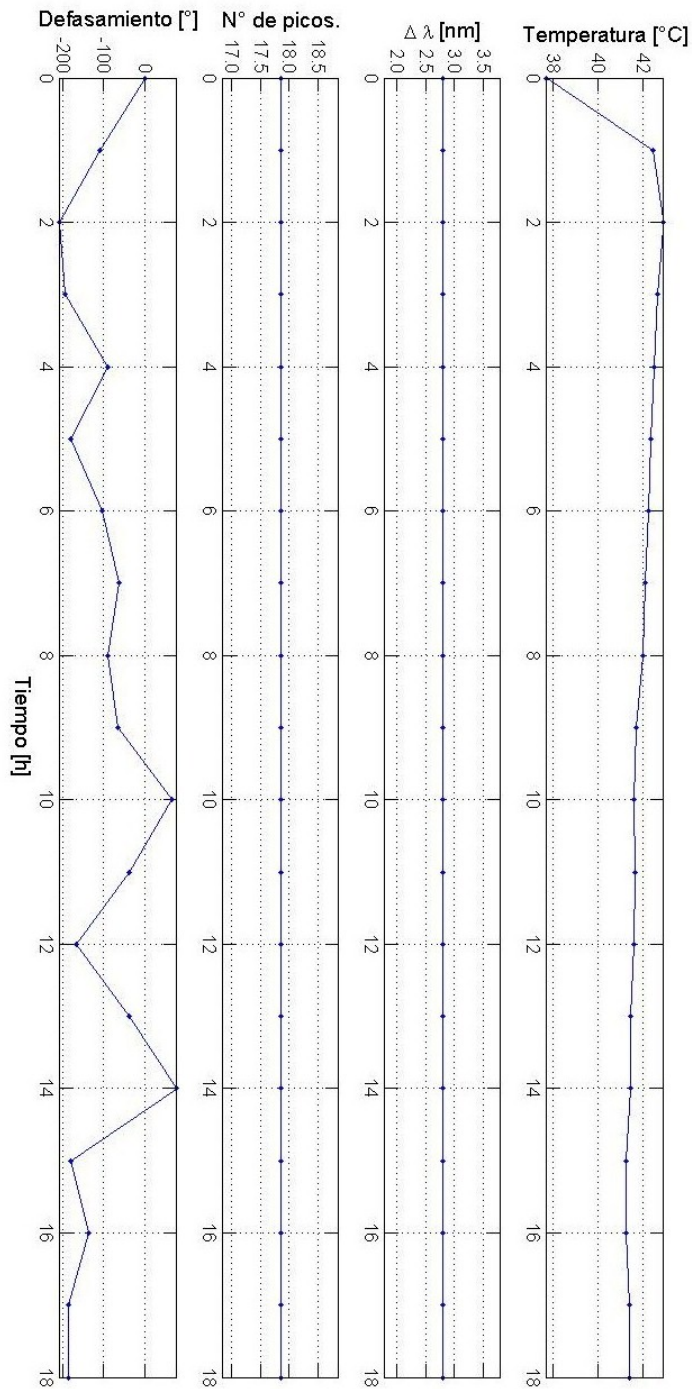


Figura 5.23: Primera etapa: Comportamiento de la punta de prueba con PDMS curado.

5.4. EXPERIMENTO A TEMPERATURA CONSTANTE.

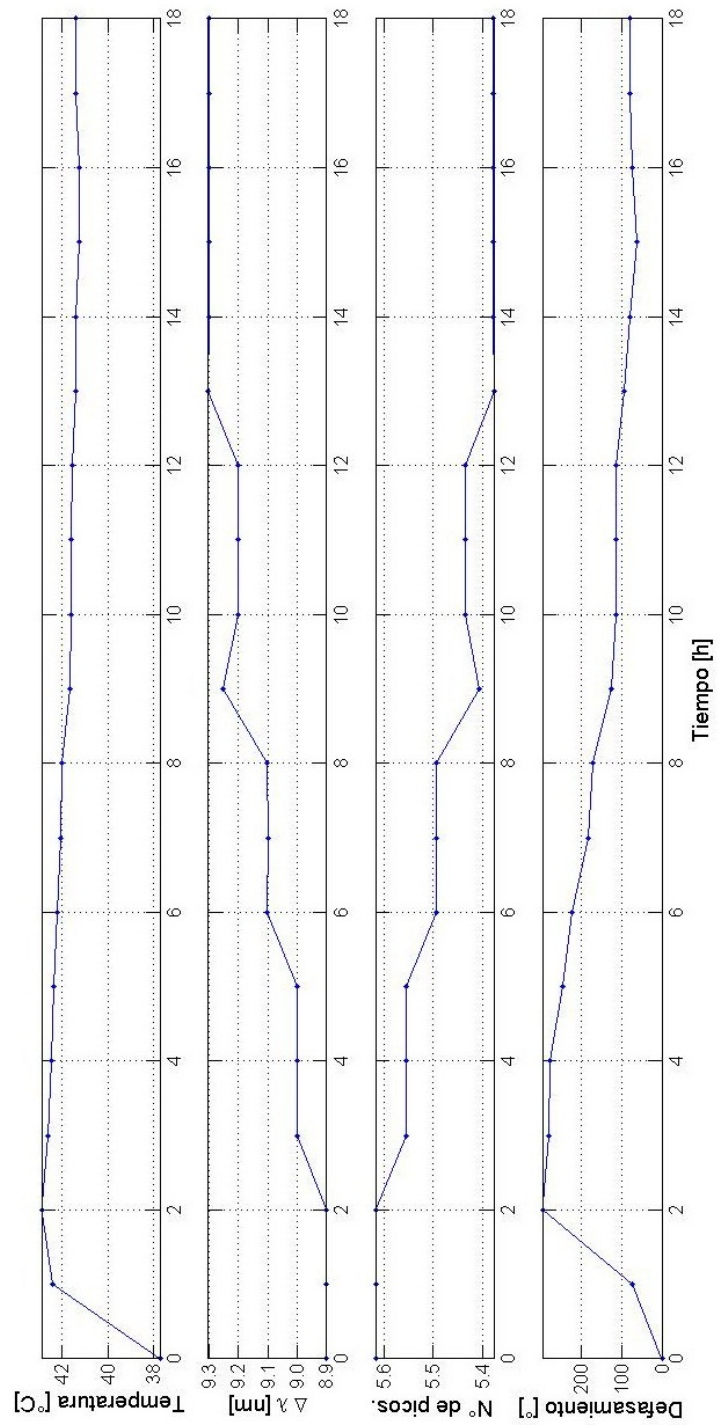


Figura 5.24: Primera etapa: Comportamiento de la punta de prueba con PDMS sin curar.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
 FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

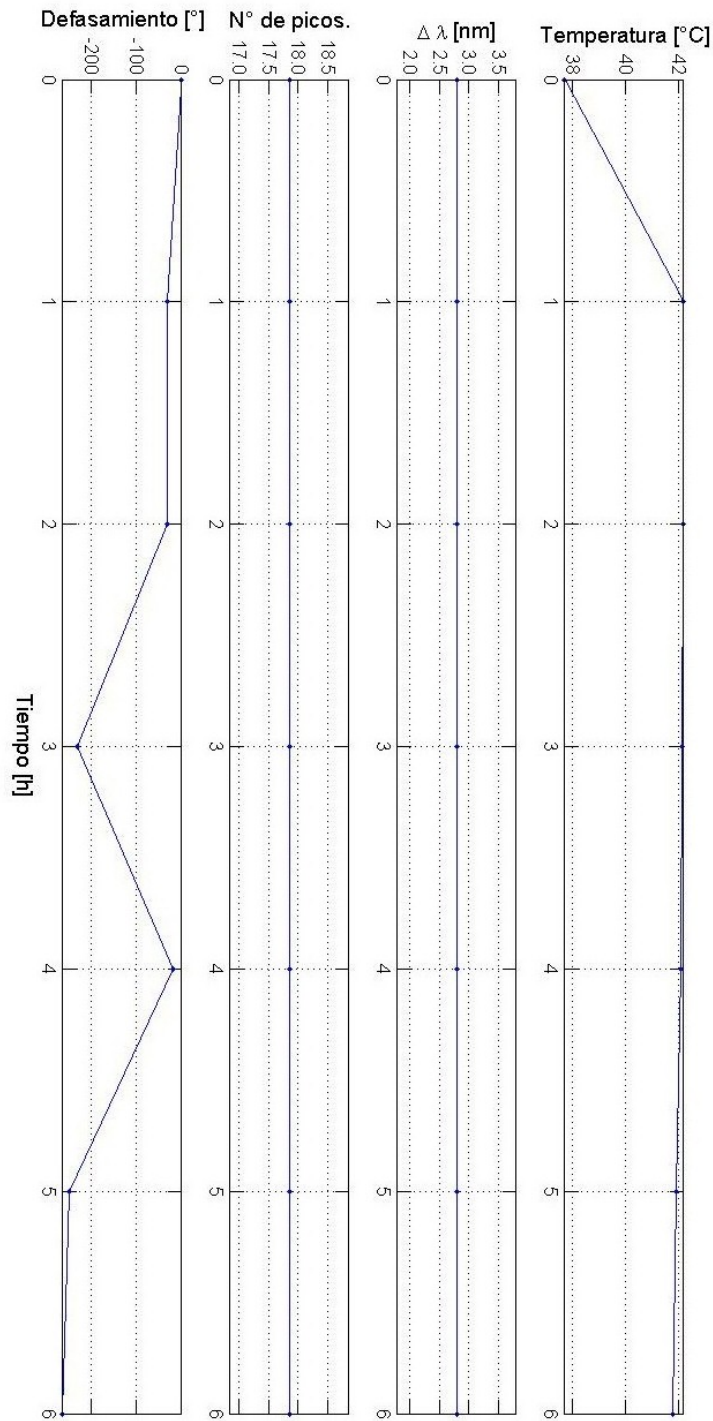


Figura 5.25: Segunda etapa: Comportamiento de la punta de prueba con PDMS curado.

5.4. EXPERIMENTO A TEMPERATURA CONSTANTE.

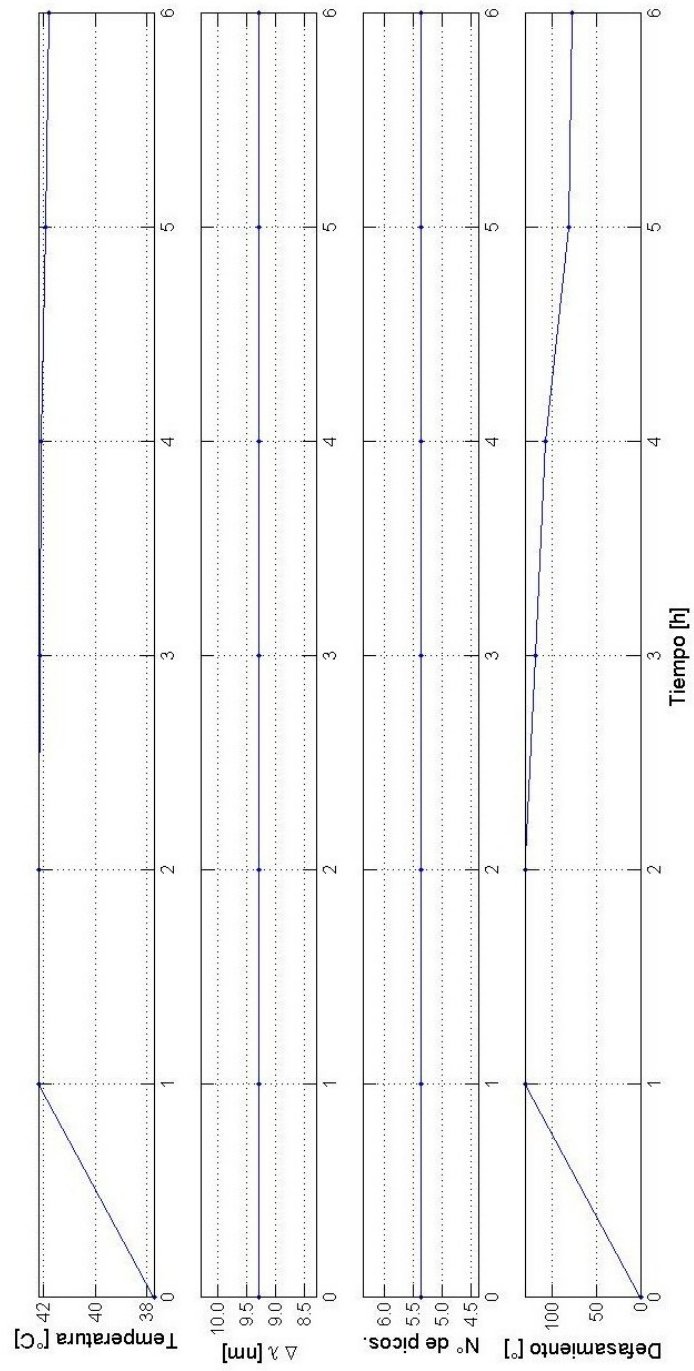


Figura 5.26: Segunda etapa: Comportamiento de la punta de prueba con PDMS sin curar.

CAPÍTULO 5. VARIACIONES EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS
FILTROS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

Capítulo 6

Conclusiones.

El desarrollo de este trabajo permitió concluir que la fabricación de filtros ópticos es viable y repetible; esto gracias a que se logró concretar un proceso de fabricación efectivo que permite elaborar dispositivos cuya configuración se apega al diseño de filtros basados en el interferómetro de Fabry-Perot. Además, el tener instrumentos de control en este proceso posibilita la elaboración de filtros ópticos de diferentes dimensiones y, por ende, de respuesta distinta.

Con fundamento en los filtros ópticos que se lograron consumir, en la Tabla 6.1 se presentan los valores para las figuras de mérito de los filtros con menor y mayor rango espectral ($\Delta\lambda_{FSR}$). Estos corresponden a las puntas etiquetadas como N°8 y N°9, respectivamente.

Figura de mérito	Punta N°8	Punta N°9
$\Delta f_{FSR} GHz$	88.34	789.53
$\Delta\lambda_{FSR} nm$	0.685	6.261
$\Delta\lambda_{FWHM} nm$	0.335	3.500
F_r	2.045	1.789
FdB	2	6

Tabla 6.1: Figuras de mérito obtenidas a partir de los resultados experimentales.

De la tabla presentada, los datos que son de mayor interés corresponden a $\Delta\lambda_{FSR}$, $\Delta\lambda_{FWHM}$ y F_r ya que son los parámetros que caracterizan la calidad y posibles aplicaciones del filtro. Como ejemplo, estos parámetros pueden compararse con un dispositivo comercial como el filtro óptico FP de la marca Micron Optics

Al igual que el filtro óptico desarrollado en este trabajo, este filtro óptico comercial fundamenta su principio de operación en el interferómetro FP, está fabricado a base de fibra óptica y es un dispositivo pasivo. En el *Fiber Fabry-Perot Tunable Filter (FFP-TF2)*, el etalón FP está conformado por la superficie de dos

puntas de fibra óptica separados a una distancia variable controlada por un sistema mecánico (piezo-eléctrico), como se muestra en la figura 6.1 [17]. Gracias al sistema mecánico es un filtro óptico sintonizable. En la figura 6.2 [17] se presenta la respuesta típica del *FFP – TF2* y en la figura 6.3 [17] sus especificaciones.

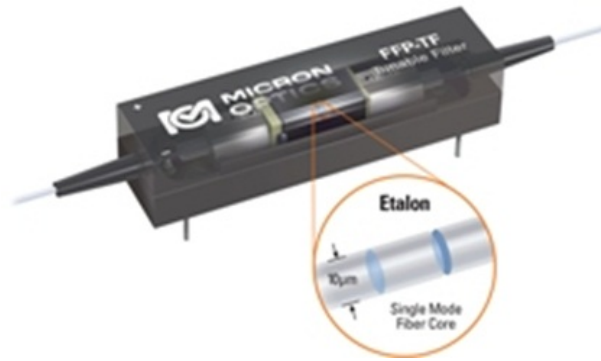


Figura 6.1: Fiber Fabry-Perot Tunable Filter (FFP-TF2) Micron Optics.

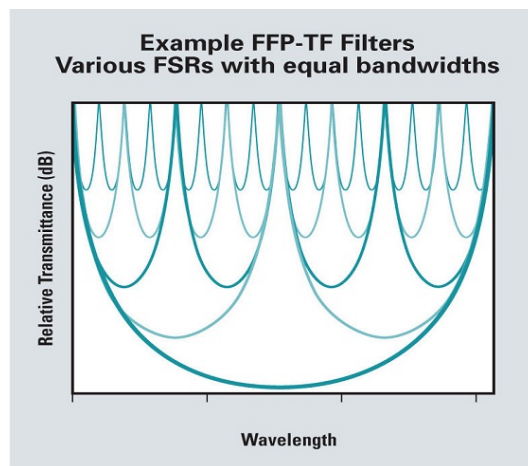


Figura 6.2: Respuesta en transmisión del FFP-TF2.

Al comparar las características espectrales de ambos dispositivos es apreciable que:

1. El filtro comercial opera en distintas bandas, entre ellas la Banda C (1520 – 1570 *nm*), que es la única en la que el dispositivo fabricado fue probado; por lo que se puede decir que ambos comparten la capacidad de operar en dicha banda.
2. En esa banda de operación, en cuanto a $\Delta\lambda_{FSR}$, el filtro comercial tiene un

Specifications		FFP-TF2			
Optical Properties					
Operating Wavelength Range ¹	(Custom)	800 - 1200 nm			
Operating Wavelength Ranges ¹	(Standard)	O-Band	1260 - 1360 nm	C-Band	1520 - 1570 nm
		E-Band	1360 - 1480 nm	L-Band	1570 - 1620 nm
		S-Band	1480 - 1520 nm	C & L Band	1520 - 1620 nm
Free Spectral Range (fixed FSR but selectable within this range)		100 to 45,000 GHz (800 pm to 360 nm at 1550 nm)			
Standard Finesse Values (nominal)		10, 40, 100, 200, 500,			
(For non-standard finesse values up to 16,000 - Contact Micron Optics)		650, 1000, 2000, 4000			
3dB Bandwidth		Equals desired FSR/Finesse			

Figura 6.3: Especificaciones espectrales del FFP-TF2.

rango de operación de $0.8 - 3.6 \text{ nm}$ y el filtro fabricado de $0.68 - 6.2116 \text{ nm}$, lo cual indica que la técnica de fabricación propuesta en este trabajo permite hacer dispositivos cuya respuesta presenta una separación entre canales que puede ajustarse para operar en un rango más amplio.

3. Para el parámetro F_r , es indudable que el filtro óptico tiene valores mucho mayores que el del filtro aquí presentado, lo cual representa que el FFP-TF2 tiene mayor selectividad.
4. Como consecuencia de los altos valores de F_r , el filtro óptico comercial, también presenta anchos de banda ($\Delta\lambda_{FWHM}$) mucho menores que el dispositivo experimental fabricado en este trabajo..

Considerando las observaciones previas se puede decir que el filtro óptico que se fabricó no presenta un alto rendimiento ni un ancho de banda de resolución muy selectivo comparado con un filtro óptico comercial; pero, a pesar de eso, el filtro óptico fabricado tiene la misma respuesta espectral y su separación entre modos (canales) podría ser adecuado para algunas aplicaciones. De acuerdo con el principio de operación de este tipo de filtros, puede intuirse que el motivo de estas deficiencias con respecto al filtro óptico comercial son debidas a la baja reflectividad de las superficies que conforman el interferómetro FP; así que si se desea competir contra el $FFP-TF2$ sería necesario aumentar la R de las superficies parcialmente reflectivas.

En cuanto a la sintonización de los filtros ópticos fabricados, el análisis de las variaciones espectrales en función de la temperatura permitió llegar a la conclusión cualitativa de que los filtros ópticos elaborados son sintonizables por medio de cambios en la temperatura. Esta característica descarta la necesidad de un sistema mecánico adicional, como en el filtro comercial. Sin embargo, la falta de una caracterización cuantitativa de las variaciones espectrales en función de la temperatura orilla a que el sintonizar el filtro óptico experimental en un patrón de interferencia

tenga que hacerse variando la temperatura hasta hallar el comportamiento deseado, lo cual es ineficiente puesto que para cada filtro óptico la respuesta y sus variaciones son diferentes. Dadas estas complicaciones, se concluyó que, a pesar de que el filtro óptico fabricado es sintonizable, es mejor utilizarlo a temperatura constante y no someterlo a cambios bruscos de temperatura.

De manera general, se puede decir que los filtros ópticos fabricados en este trabajo presentan las siguientes ventajas:

- Como todo filtro óptico FP, tiene:
 1. **Respuesta periódica.** El que su respuesta se apegue a la función de Airy asegura su periodicidad; esto es ventajoso puesto que la separación entre canales adyacentes siempre será la misma.
 2. **Gran selectividad de canales.** En este trabajo se obtuvieron filtros ópticos con un $\Delta\lambda_{FWHM}$ de hasta 0.335 nm *Punta de prueba N° 8* y con un contraste, en el mejor de los casos, de 6 dBm *Punta de prueba N° 9*. El primer factor habla de la capacidad de selectividad espectral, mientras que el segundo de la atenuación que reciben las bandas rechazadas, por lo que ambos factores son importantes ya que indican la capacidad que tiene el dispositivo fabricado para extraer, filtrar, únicamente la información de interés.
 3. **Gama de respuestas amplia.** Al ser un filtro cuya respuesta depende de las variaciones en las dimensiones geométricas que tiene, es posible obtener múltiples patrones de interferencia a conveniencia con tan sólo determinar las magnitudes físicas del dispositivo a las que ese comportamiento corresponde.
 4. **Versatilidad de usos.** Debido a sus cualidades, los filtros ópticos FP, son utilizados en varias aplicaciones (sistemas WDM, sensores, filtros de peine, etc.).
- De forma particular, es un dispositivo:
 1. **Fabricado con una técnica innovadora.** La técnica utilizada representa una alternativa innovadora para la fabricación de filtros ópticos FP puesto que, aunque parte del mismo principio de operación que tienen todos los filtros de este tipo, aprovecha las características de los materiales y la generación de la burbuja para hacer un dispositivo con menos requerimientos que los filtros interferométricos convencionales.
 2. **De dimensiones pequeñas.** Ya que al no necesitar de lentes, sistemas mecánicos u otros elementos externos, es un dispositivo muy pequeño. Propiamente, el tamaño de los filtros ópticos fabricados está entre medio y un centímetro.

6.1. PROSPECCIÓN A FUTURO.

3. **Con compatibilidad de conexión (all-fiber).** Debido a que la fibra óptica es parte de los componentes del dispositivo, es fácil realizar la conexión del dispositivo con un sistema de fibras ópticas.
4. **Con capacidad de modular señales.** Lo cual le permite fungir como distintos tipos de filtros y aprovechar esta característica para otras aplicaciones.

Los filtros ópticos con un periodo de envolvente grande tienen una respuesta similar a la de un *filtro comb*, los cuales son utilizados en los sistemas WDM para el bloqueo de canales, como supresores de ruido, o bien, como 'reglas de referencia' en los sistemas receptores para observar el desfaseamiento con el que se reciben las señales ópticas provenientes de cada canal [17]. En el caso particular de los dispositivos que se fabricaron se puede concluir que son aptos para llevar a cabo estas tres funciones en sistemas tanto CWDM como DWDM, puesto que estos requieren separaciones entre canales de 20 nm y 0.8 nm respectivamente [18], las cuales se encuentran dentro del rango de $\Delta\lambda_{FSR}$ obtenido experimentalmente.

Adicional al uso en los sistemas WDM, se pueden explorar muchas otras aplicaciones que aprovechan el comportamiento del filtro, como lo son: el uso de estos para la sintonización de longitudes de onda en un láser, para la extracción de la señal de reloj de señales ópticas codificadas [19] y, de caracterizarse cuantitativamente las variaciones espectrales en función de la temperatura, como sensor de temperatura.

En cuanto a los filtros ópticos con periodo de envolvente pequeño, en el sentido más simple puede ser utilizado como un modulador de señales y, siendo más específicos, también pueden ser de gran utilidad como *Packet lambda filters* [20] los cuales son utilizados para transmitir paquetes equidistantes (crestas de la envolvente) con un número determinado de longitudes de onda (portadora).

Finalmente, la conclusión general de este trabajo es que el proceso de fabricación utilizado permite elaborar filtros ópticos de diferentes características pero manteniendo en común las ventajas antes mencionadas y, por lo tanto, la posibilidad de ser usados en múltiples aplicaciones.

6.1 Prospección a futuro.

Si bien el trabajo realizado llevó a resultados favorables, es conveniente decir que aún quedan factores en los que se pretende profundizar en un futuro; todos estos factores giran en torno de la caracterización del comportamiento de los filtros ópticos en función de la temperatura.

Con el fin de concretar dicha caracterización, se propone implementar un sistema de visualización que respalde o refute las premisas cualitativas que se han expuesto y con eso entender con certeza los cambios que experimenta el filtro óptico al someterse a cambios térmicos.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

Como es apreciable, aún existen ramas en las que se puede profundizar más; sin embargo, el presente trabajo es de suma importancia ya que contiene las bases experimentales y teóricas para contribuir al desarrollo de éstas.

Anexo A

Micro-calentador de fibra óptica.

En este trabajo se utilizó un micro-calentador el cual opera con señales ópticas, es robusto y de dimensiones pequeñas. Este dispositivo está basado en el uso de fibra óptica y nanoestructuras, en específico, nanotubos de carbono (NTC). La técnica de fabricación del micro-calentador consiste en depositar los NTC en la punta de la fibra óptica utilizando radiación láser, el arreglo experimental para la deposición puede observarse en la figura A.1 [2] .

Estos depósitos de NTC en las fibras absorben luz de manera eficiente y proveen de una zona de calentamiento altamente localizada por lo que utilizando estas puntas es posible generar microburbujas en líquidos no absorbentes por medio del uso de un diodo láser de baja potencia operando en modo continuo [3]. Más detalles acerca de esta técnica de generación de microburbujas puede consultarse en las referencias citadas en este anexo.

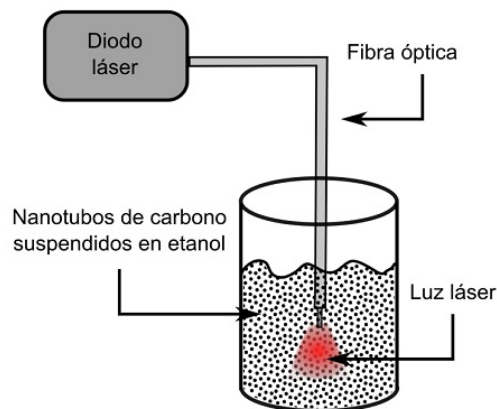


Figura A.1: Configuración básica para la deposición de NTC impulsada por láser.

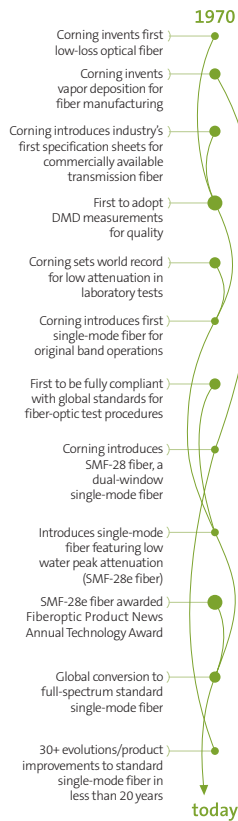
Anexo B

Especificaciones de los materiales utilizados.

B.1 Fibra óptica SMF28e de la marca Corning.

B.2 PDMS Sylgard 184.

**Corning® SMF-28e® Optical Fiber
Product Information**



Evolving Networks Now

At Corning Optical Fiber, we are continually pushing single-mode fiber to new performance levels. Building on our leadership position in the optical fiber industry, Corning is evolving our already formidable products to meet customer requirements like never before. As the first manufacturer to upgrade standard single-mode fiber worldwide, we're providing our customers with greater value today and in the future. Corning® SMF-28e® optical fiber is:

- * Corning's standard single-mode fiber offering, delivering optimized capability, network design flexibility and confidence in long-term performance
- * The world's most widely demanded full-spectrum fiber
- * In compliance with or exceeding the industry's most stringent requirements, including:
 - ITU-T G.652 (Categories A, B, C & D)
 - IEC Specifications 60793-2-50 Type B1.3
 - TIA/EIA 492-CAAB
 - Telcordia's GR-20
 - ISO 11801 OS2
- * The industry leader in comprehensive standard single-mode fiber specifications

As Corning's premier standard single-mode fiber, SMF-28e fiber is one in a long line of optical innovations. Corning SMF-28e, an ITU-T G.652.D-compliant optical fiber, is expanding the capability of the world's most dynamic metropolitan and access networks.

PI1344 | ISSUED: DECEMBER 2007 | ISO 9001 REGISTERED | 
 SUPERSEDES: MAY 2007

Figura B.1: Hoja de especificaciones de la FO SMF28e (1/2).

B.2. PDMS SYLGARD 184.

Optical Specifications

Fiber Attenuation

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	0.33 – 0.35
1383**	0.31 – 0.35
1550	0.19 – 0.20
1625	0.20 – 0.23

*Maximum specified attenuation value available within the stated ranges.
 **Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

Alternate attenuation offerings available upon request.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α .

Macrobend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.05
50	100	1310	≤ 0.05
50	100	1550	≤ 0.05
60	100	1625	≤ 0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

Cable Cutoff Wavelength (λ_{ccf})

$\lambda_{ccf} \leq 1260$ nm

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm \cdot km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): $1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$
 Zero Dispersion Slope (S_0): $\leq 0.089 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
PMD Link Design Value	$\leq 0.06^*$
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD₀). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for a 0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ maximum PMD.

Dimensional Specifications

Glass Geometry

Fiber Curl	≥ 4.0 m radius of curvature
Cladding Diameter	$125.0 \pm 0.7 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$\leq 0.5 \mu\text{m}$
Cladding Non-Circularity	$\leq 0.7\%$

Coating Geometry

Coating Diameter	$245 \pm 5 \mu\text{m}$
Coating-Cladding Concentricity	$< 12 \mu\text{m}$

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation	
		1310 nm, 1550 nm & 1625 nm (dB/km)	
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤ 0.05	
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C* up to 98% RH	≤ 0.05	
Water Immersion	23 \pm 2°C	≤ 0.05	
Heat Aging	85 \pm 2°C*	≤ 0.05	
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05	

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

Figura B.2: Hoja de especificaciones de la FO SMF28e (2/2).

Product Information
Electronics

DOW CORNING

Sylgard[®] 184 Silicone Elastomer

FEATURES & BENEFITS

- Flowable
- Room temperature and heat cure
- Good dielectric properties
- Rapid, versatile cure processing controlled by temperature
- High transparency allows easy inspection of components

COMPOSITION

- Two-part
- 10 to 1 mix ratio
- Polydimethylsiloxane elastomer

Transparent encapsulant with good flame resistance

APPLICATIONS

Sylgard[®] 184 Silicone Elastomer is suitable for:

- LED Lighting encapsulation
- Power supplies
- Connectors
- Sensors
- Industrial controls
- Transformers
- Amplifiers
- High voltage resistor packs
- Relays
- Adhesive/encapsulant for solar cells
- Adhesive handling beam lead integrated circuits during processing

TYPICAL PROPERTIES

Specification Writers: These values are not intended for use in preparing specifications. Please contact your local Dow Corning sales office or your Global Dow Corning Connection before writing specifications on this product.

Property	Unit	Result
One or Two Part	-	Two
Color	-	Colorless
Viscosity (Base)	cP	5100
	Pa-sec	5.1
Viscosity (Mixed)	cP	3500
	Pa-sec	3.5
Thermal Conductivity	btu/hr ft °F	0.15
	W/m °K	0.27
Specific Gravity (Cured)	-	1.03
Working Time at 25 °C (Pot Life - hours)	hr	1.5
Cure Time at 25 °C	hrs	48
Heat Cure Time at 100 °C	minutes	35
Heat Cure Time at 125 °C	minutes	20
Heat Cure Time at 150 °C	minutes	10
Durometer Shore	-	43
Dielectric Strength	volts/mil	500
	kV/mm	19
Volume Resistivity	ohm*cm	2.9E+14
Dissipation Factor at 100 Hz	-	0.00257
Dissipation Factor at 100kHz	-	0.00133
Dielectric Constant at 100 Hz	-	2.72
Dielectric Constant at 100 kHz	-	2.68
Linear CTE (by DMA)	ppm/°C	340
Tensile Strength	PSI	980
	MPa	6.7
	Kg/cm ²	69
Refractive Index	@ 589 nm	1.4418
Refractive Index	@ 632.8 nm	1.4225
Refractive Index	@ 1321 nm	1.4028
Refractive Index	@ 1554 nm	1.3997

Figura B.3: Hoja de especificaciones del PDMS Sylgard 184.

Anexo C

Equipo utilizado.

C.1 MTS50-Z8 Thorlabs

Para la fabricación de los filtros ópticos se utilizó la plataforma multi-ejes MTS50-Z8 de la marca Thorlabs. Este set incluye tres motores junto con sus controladores y algunas piezas (ángulos, platinas) que permiten configurar la plataforma en los ejes XY , XZ y/o XYZ según convenga, esta última configuración se observa en la figura C.1. En el caso particular de este trabajo, para controlar la FO con depósito se montó un sistema XZ motorizado en una platina manual con corrimiento en el eje Y ; mientras que del otro lado se utilizó el motor restante en el eje X para darle movimiento a la fibra de monitoreo.



Figura C.1: Configuración de la plataforma MTS50-Z8 en los ejes XYZ .

Motion Control

▼ CHAPTERS

Manual Stages

Motorized Stages

Multi-Axis Platforms

Actuators

Controllers

▼ SECTIONS

Linear Translation

Microscopy Stages

Rotation

Goniometers

25 and 50 mm Travel Motorized Translation Stages



Features

- Compact Modular Design
- Bundle Offer Includes TDC001 T-Cube Driver and Power Supply
- High-Load Linear Guide Rails
- Modular Design Allows Multi-Axis Configurations
- Built-In Limit Switches on the Stage
- Hall-Effect-Encoded DC Servo Motors

Specifications

- **Travel Range**
 - MTS25: 25 mm
 - MTS50: 50 mm
- **Recommended Controller:** TDC001
- **Max Velocity:** 3 mm/s
- **Stage/Bearing Construction:** Aluminum/Recirculating Ball Bearing
- **Bidirectional Repeatability:** 1.6 µm
- **Backlash:** <6 µm
- **Min Achievable Incremental Movement:** 50 nm
- **Max On-Axis Load Capacity (Vertical):** 10 lbs (4.5 kg)
- **Max On-Axis Load Capacity (Horizontal):** 26.4 lbs (12 kg)
- **Absolute On-Axis Accuracy**
 - MTS25: 145 µm
 - MTS50: 290 µm
- **Max Percentage Accuracy**
 - MTS25: 0.3%
 - MTS50: 0.7%
- **Home Location Accuracy:** ±4%
- **Pitch**
 - MTS25: 0.04°
 - MTS50: 0.05°
- **Yaw**
 - MTS25: 0.05°
 - MTS50: 0.06°
- **Weight:** 0.75 lbs (0.34 kg)
- **Platform**
 - 1.50" x 1.69" (38.1 mm x 43.0 mm)
 - 4-40 (M3 x 0.5) Tapped Holes, 18 Places
 - 8-32 (M4 x 0.7) Tapped Holes, 1 Place

Linear Displacement per Encoder Count: There are 512 encoder counts per revolution of the motor. The output shaft of the motor goes into a 67:1 planetary gear head. This requires the motor to rotate 67 times in order to rotate the 1.0 mm pitch leadscrew one revolution. The end result advances the stage by 1.0 mm. To calculate the linear displacement of the actuator per encoder count:

- 512 x 67 = 34,304 encoder counts per revolution of the leadscrew
- 1.0 mm/34,304 counts = 2.915 x 10⁻⁵ mm (29 nm) linear displacement of the leadscrew per encoder count.

Linear Translation

Microscopy Stages

Rotation

Goniometers

512

The compact, motorized MTS Series stages feature a dual set of linear rails with a continuously recirculating ball bearing on a moveable carriage. This mechanism provides smooth, low-friction movement. The minimum achievable movement is 50 nm.

Limit switches on the stage ensures controlled motion within the parameters of the unit and prevents overdriving in both directions.

Two travel ranges are available: 25 mm and 50 mm. The stages are configurable in XY, XZ, and XYZ in both left- and right-handed configurations using the Angle Brackets and Spacer Plates. Base plates are also available allowing them to be bolted directly to an optical table. The MTS25-Z8 and MTS50-Z8 stages can be attached to a MTS25A-Z8 or MTS50-Z8 base, respectively, using the four included M3 x 1.0 caphead screws and dowel pins. For added flexibility, multi-axis configuration can be made using a mixture of 25 mm and 50 mm stages.

The MTS bundles include a TDC001 Controller, power supply, and necessary cables for fast out-of-the-box setup and operation.

A complete technical description of the TDC001 T-Cube™ servo driver is found on pages 626 – 627, in the Controllers chapter.





ITEM #	METRIC ITEM #	\$	£	€	RMB	DESCRIPTION
MTS25-Z8	MTS25/M-Z8	\$ 890.00	£ 640.80	€ 774.30	¥ 7,093.30	Compact Motorized 25 mm Travel Translation Stage
MTS25-Z8E	MTS25/M-Z8E	\$ 1,336.50	£ 962.28	€ 1,162.76	¥ 10,651.91	MTS25 Translation Stage Plus TDC001 Controller
MTS50-Z8	MTS50/M-Z8	\$ 989.00	£ 712.08	€ 860.43	¥ 7,882.33	Compact Motorized 50 mm Travel Translation Stage
MTS50-Z8E	MTS50/M-Z8E	\$ 1,425.60	£ 1,026.43	€ 1,240.27	¥ 11,362.03	MTS50 Translation Stage Plus TDC001 Controller
PAA632	PAA632*	\$ 52.80	£ 38.02	€ 45.94	¥ 420.82	Hi Density D-Type Extender Cable, 2.5 m
TPS001	TPS001*	\$ 25.00	£ 18.00	€ 21.75	¥ 199.25	±15 V Power Supply for Single T-Cube
TPS008	TPS008*	\$ 175.00	£ 126.00	€ 152.25	¥ 1,394.75	±15 V Power Supply for up to 8 T-Cubes

*Both Imperial and Metric parts are equivalent. ...Continued on Next Page

Figura C.2: Hoja de especificaciones de la plataforma MTS50-Z8.

C.1.1 multimotor.vi

El set MTS50-Z8 cuenta con software de control; sin embargo, éste es limitado puesto que únicamente permite dar pasos de un tamaño determinado y utilizar el botón *Home/zero*. Con el fin de constrestrar estas limitaciones y hacer el manejo de las platinas motorizadas más ágil, preciso y controlable, se realizó el programa **multimotor.vi**, basado en el control *ActiveX* propio del software original, el cual permite:

- Englobar en un mismo panel los controles para los tres motores evitando abrir el software original para cada motor y los saltos de ventana a ventana.
- Permite indicarle valores de posición determinandos a los cuales llega en un sólo movimiento sin necesidad de pasos; la ventaja de esto radica en que se pueden colocar las fibras en posiciones específicas con mayor control.
- Posibilita a las platinas motorizadas a dar pasos distanciados por un lapso, lo cual es útil para el monitoreo del patrón de interferencia, puesto que este se puede adquirir durante el intervalo en el que los motores permanecen estáticos.

El panel frontal del VI se observa en la figura C.6.

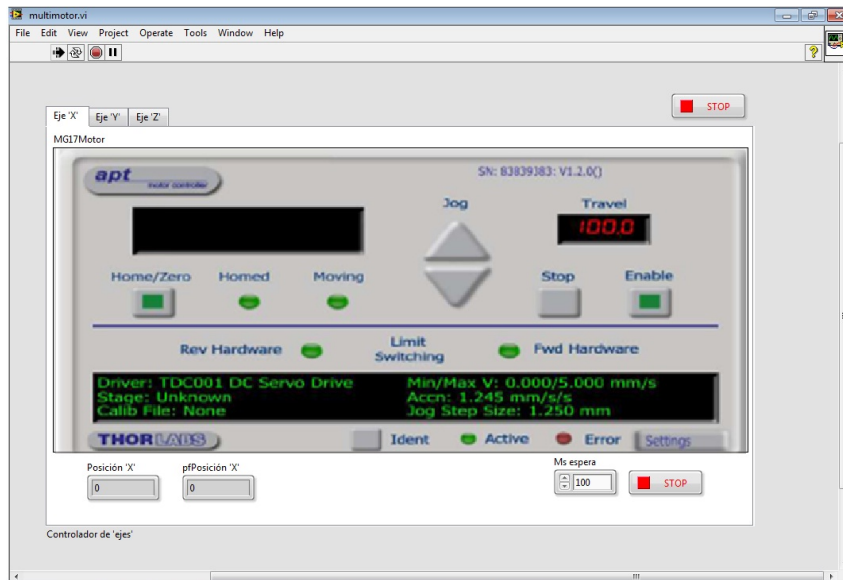


Figura C.3: Multimotor.vi: Panel frontal.

C.2 Interrogador SM125

El interrogador SM125 Micron Optics es un equipo de adquisición de señales ópticas compacto, diseñado específicamente para la medición estática de fenómenos moderadamente dinámicos, como la tensión, temperatura, y la presión; el instrumento se muestra en la figura C.4. Es capaz de adquirir la respuesta de los dispositivos en un rango de longitudes de onda de $1520 - 1570 \text{ nm}$ y en tiempo real, lo cual es conveniente considerando que es en este rango en donde se desarrollan todas las telecomunicaciones por medio de sistemas ópticos.



Figura C.4: Interrogador SM125 Micron-Optics.

En cuanto a software, el programa de adquisición de datos asociado al SM125 es un instrumento virtual que tiene como función principal visualizar la respuesta en frecuencia óptica del o los dispositivos conectados a sus canales; además de esto, ofrece funciones simples como almacenar los datos del gráfico de un instante y visualizar ambos canales de forma simultánea en el mismo gráfico. Sin embargo, el software original no brinda la posibilidad de realizar el almacenamiento de datos de forma automatizada, por lo cual fue necesario aprovechar que es un *.vi para realizar las modificaciones pertinentes que facilitarían la adquisición y manejo de datos para cada experimento. Los diferentes programas realizados en LabView se exponen enseguida.

C.2. INTERROGADOR SM125

sm125 Optical Sensing Interrogator
Product Manual and Technical Reference

2. Specifications

Specifications	sm125-700 (preliminary)	sm125-500	sm125-200
Optical			
Number of Optical Channels	4 (8 & 16 available)	4 (8 & 16 available)	1
Wavelength Range	1510-1590 nm	1510-1590 nm	1520-1570 nm
^a Wavelength Accuracy	1 pm	1 pm	10 pm
^b Wavelength Stability	1 pm	1 pm	5pm
^c Wavelength Repeatability	0.5 pm at full speed, 0.2 pm with 10 averages		
^d Dynamic Range	30dB	50 dB	40dB
Scan Frequency	10 Hz	1 Hz (2 and 5 Hz available)	
Typical Sensor Spacing	> 2 x Sensor Bandwidth		
Optical Connectors	FC/APC (E2000 available)		
Mechanical			
Dimensions	114 mm x 234 mm x 132 mm		
Weight	2 kg (4.5 lbs)		
Environmental			
Operating Temperature	0° to 50°C		
Operating Humidity	0 to 80%, non-condensing		
Storage Temperature	-20° to 70°C (preliminary)		
Storage Humidity	0 to 95%, non-condensing		
Electrical			
Input Voltage	+5 VDC (12 or 24 VDC convertors available)		
AC/DC Convertor	Included (100-240 VAC, 47-63 Hz)		
Power Consumption	18 W typ, 30 W Max		
^e Local Data Storage	Available (external USB memory)		
Interfaces	Ethernet (TCP-IP) (USB, RS-232, RS-485, and wireless Ethernet available)		
Protocols	Custom MOI protocol via Ethernet (Modbus and others available)		
Data Management			
On-Board Firmware	Full-spectrum and peak-detection modes		
Remote Software	Spectral analysis, peak detection, data logger, peak tracking, and instrument control		
LabView Source Code	Allows for customization of remote software		
Options			
Wireless PDA Kit	Wireless Ethernet communication (802.11b), USB adaptor, PDA, and PDA Utilities		
PDA Utilities Software	Data display, data logger, and instrument control		
Channel Expansion	Please See Our 8 or 16 channel sm041 Multiplexers		
Battery Pack (for sm125)	12V rechargeable battery power supply		

050729v

Notes:

- ^a Per NIST Technical Note 1297, 1994 Edition, Section D.1.1.1, definition of "accuracy of measurement"
1 pm accuracy in -700 model for 40nm scan range.
- ^b Captures effects of long term use over full operating temperature range of the instrument.
- ^c Per NIST Technical Note 1297, 1994 Edition, Section D.1.1.2, definition of "repeatability [of results of measurements]"
- ^d Defined as laser launch power minus detection noise floor. Detection BW limits DR for scan rates >2 Hz.
- ^e USB memory operating conditions may differ from sm125 specifications.

Table 2.1: Specifications

7/2005

sm125_Rev_D

Micron Optics, Inc.

Page 9 of 79

Figura C.5: Hoja de especificaciones del interrogador SM125.

C.2.1 VI's de adquisición de datos para la fabricación.

Todos los instrumentos virtuales desarrollados que involucran al SM125 aprovechan el módulo de graficación de espectros y de almacenamiento de los datos que lo conforman. Es importante mencionar que este módulo adquiere muestras del espectro cada 0.05 nm por lo que la reconstrucción del gráfico depende de 10001 datos, los cuales son almacenados en un archivo de texto. Fuera de este módulo, lo demás es propio de cada programa.

BotonSM125.vi

Este instrumento virtual está diseñado para almacenar en un mismo archivo **.txt* los datos pertinentes a un número de lecturas específico (n); y, para cada lectura, muestra gráficamente la señal reflejada por la punta de prueba. Este programa inicia tomando la primera lectura al *correr* el programa, posterior a ésta aparece una ventana emergente en la cual habrá que oprimir 'Aceptar' para tomar la siguiente lectura, con esto el indicador aumenta unitariamente, y así sucesivamente hasta alcanzar el número de lecturas especificado.

Este programa es útil cuando se quieren únicamente muestras específicas, o simplemente, el tiempo de adquisición es discreto, por lo que la indicación manual no afecta.

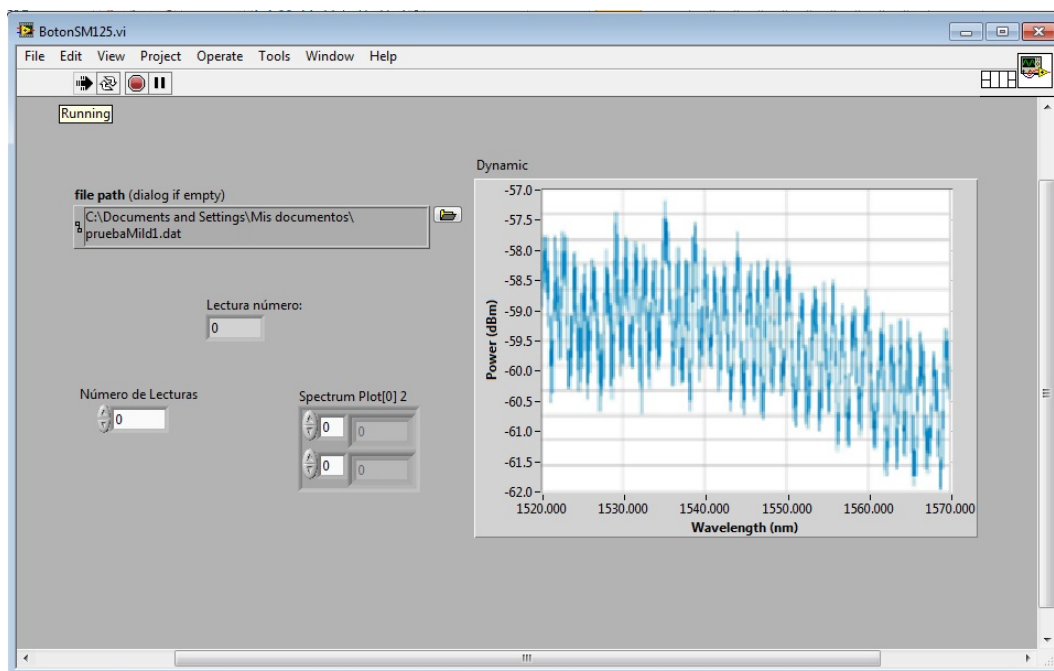


Figura C.6: BotonSM125.vi: Panel frontal.

TimedSM125.vi

Este instrumento virtual está diseñado para almacenar en un mismo archivo **.txt* los datos pertinentes a un número de lecturas específico (n) separadas por un tiempo determinado (t); para cada lectura, este programa muestra gráficamente la señal reflejada por la punta de prueba.

El TimedSM125.vi realiza el número de lecturas indicadas de forma automática, lo que lo hace útil para tomar un número representativo de las muestras de un proceso de cambios continuos sin necesidad de adquirir completamente todas. Esto es ventajoso porque no hay necesidad de utilizar ineficientemente recursos computacionales con el almacenamiento de datos innecesarios.

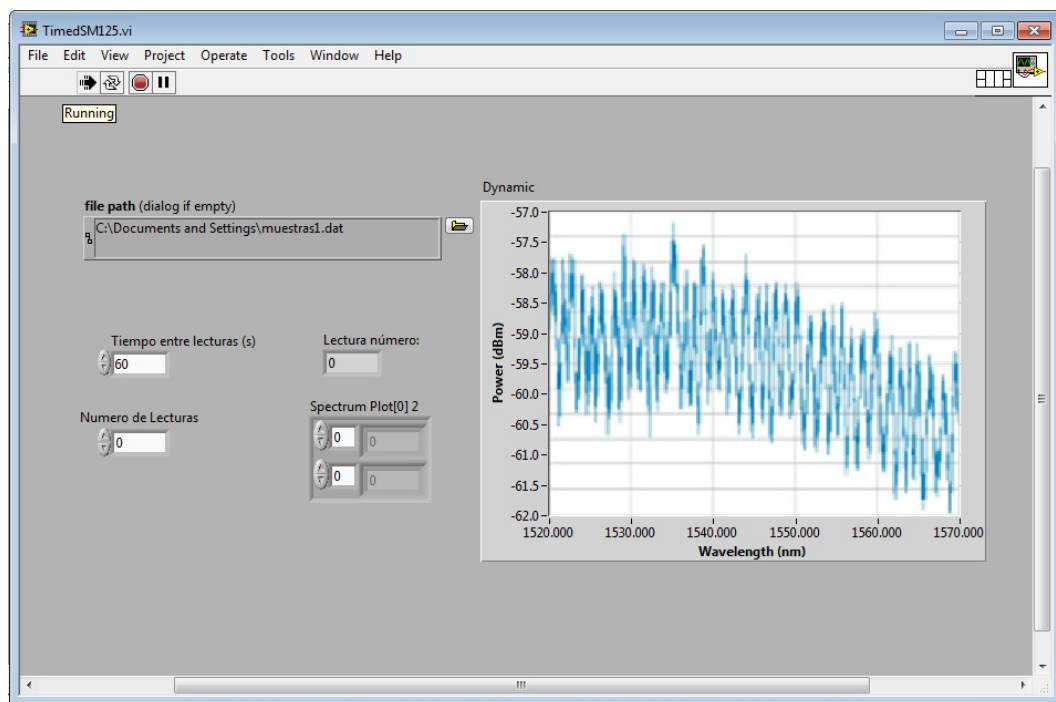


Figura C.7: TimedSM125.vi: Panel frontal.

C.2.2 VI's de adquisición de datos para la caracterización térmica.

Para la adquisición de datos para la caracterización térmica se realizaron dos programas basados en el mismo objetivo que es mostrar el patrón de interferencia gráficamente e ir constuyendo la gráfica de temperatura con cada lectura adquirida. El primer programa *PDMSTempSensorCalVM1c.vi* C.8 está diseñado para un canal y muestra cuatro gráficos: temperatura y patrón de interferencia para la etapa de calentamiento y lo mismo para la etapa de enfriamiento. En tanto que el segundo pro-

grama *PDMSTempSensorCalVM2c.vi* C.9 presenta las mismas gráficas pero agregando las dos gráficas de patrón de interferencia para el segundo canal. Cabe aclarar que para las gráficas de temperatura el programa cuenta con lo necesario para leer el dato proveniente del RTD.

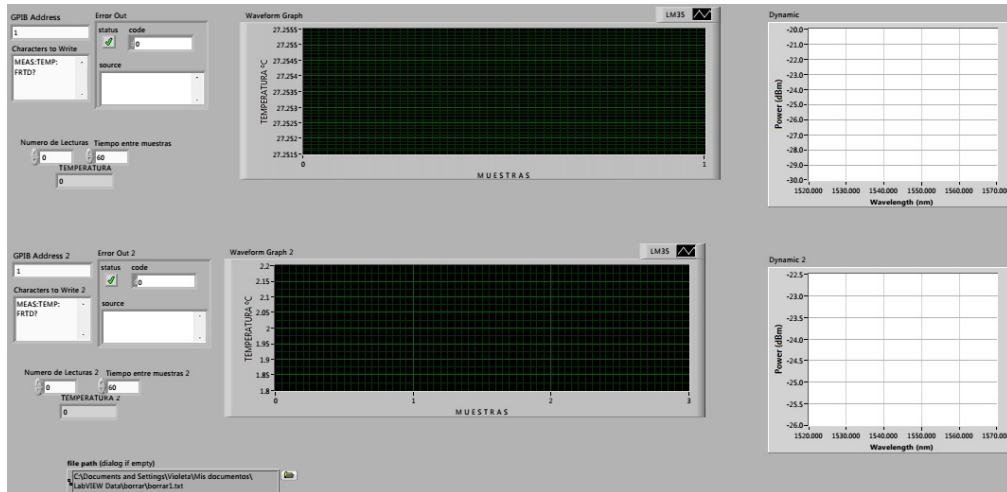


Figura C.8: PDMSTempSensorCalVM1c.vi: Panel frontal.

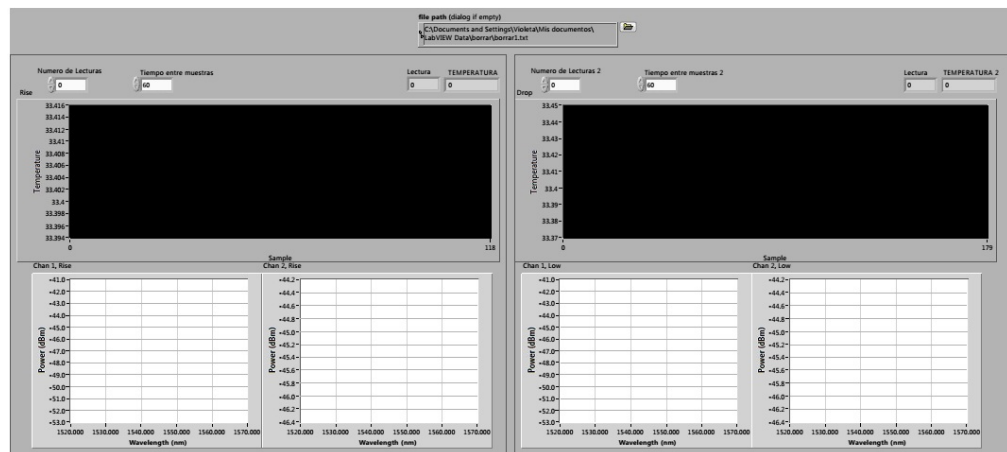


Figura C.9: PDMSTempSensorCalVM2c.vi: Panel frontal.

C.2.3 VI de análisis de datos: anatemv.vi.

Este VI tiene como objetivo dar una vista previa de lo ocurrido durante los procesos involucrados en la caracterización térmica. Cada uno de los programas de

C.2. INTERROGADOR SM125

adquisición arroja archivos que incluyen la información correspondiente a múltiples patrones de interferencia, lo cual se traduce en millones de datos; debido a que replicar cada uno de los patrones de interferencia representa encontrar los datos que corresponden al instante deseado, llamarlos desde MATLAB y hacer la gráfica es un proceso que manualmente implicaría mucho tiempo, se decidió hacer este instrumento virtual que con sólo indicarle la lectura nos permite visualizar el patrón de interferencia correspondiente.

Este programa *lee* el archivo indicado y muestra dos gráficos, en el primero se indica la longitud de onda y se muestra la evolución de la potencia en ésta en función de la temperatura, en tanto que, en el segundo se coloca el número de lectura a analizar y se grafica el patrón de interferencia para la misma.

La utilidad de este instrumento virtual radica en la reducción de tiempos que implica el poder tener una vista previa de los patrones de interferencia, de forma semi-automática, para seleccionar los relevantes y únicamente replicar estos con MATLAB.

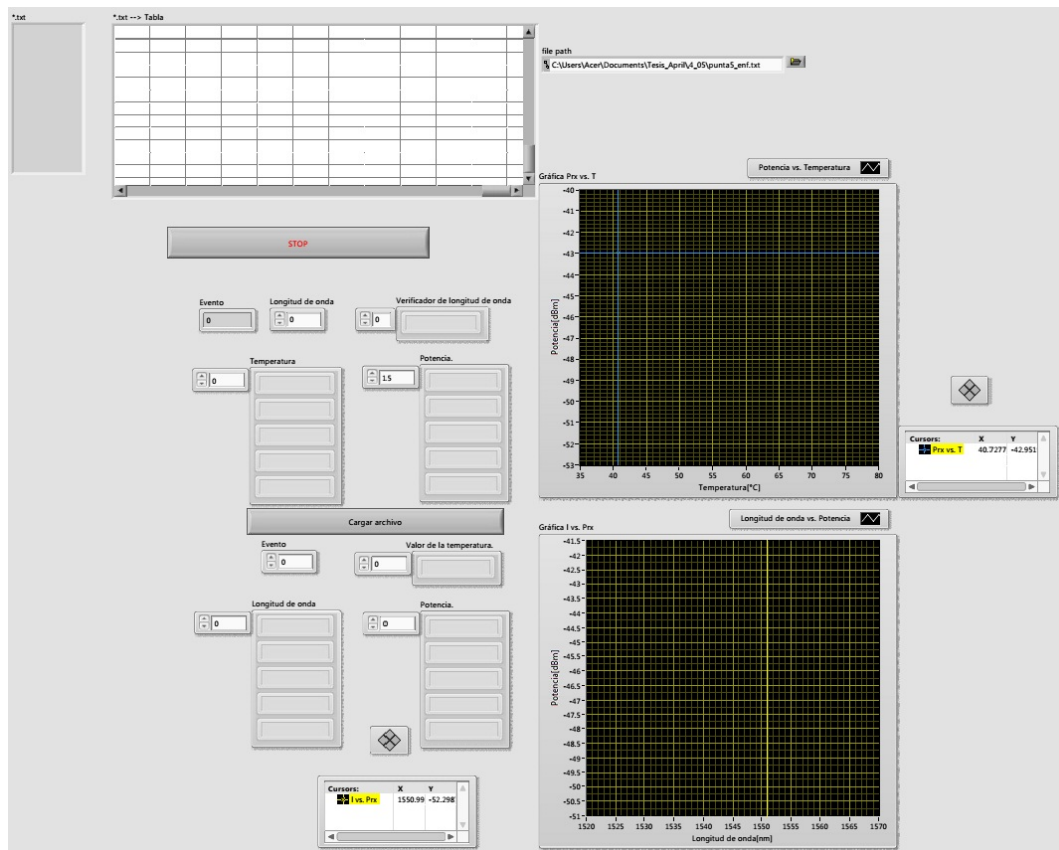


Figura C.10: anatemp.vi: Panel frontal.

ANEXO C. EQUIPO UTILIZADO.

Anexo D

Obtención de los factores de corrección.

Debido a los parámetros de entrada de la simulación, los factores de corrección únicamente podían agregarse a los índices de refracción o a las longitudes; pero, considerando que los parámetros longitudinales son confiables debido a que son cuantificables extrínsecamente, se optó por que las discrepancias teórico-experimentales fueran compensadas adicionando factores en los índices de refracción considerados.

Con el fin de hallar los factores de corrección se realizaron experimentos adicionales para encontrar los *índices de refracción equivalentes* que hicieran que el resultado experimental cumpliera con el teórico. Los experimentos realizados se muestran en este apartado.

Tomando en cuenta que las pérdidas que sufre el haz de luz por su paso por la punta de prueba ocurren en el PDMS y en el interior de la burbuja, los factores de corrección se asocian únicamente a $n_2 = n_{PDMS}$ y $n_3 = n_{int_{burb}}$. Por lo que los experimentos realizados únicamente se enfocaron a hallar factores de corrección para el PDMS y el interior de la burbuja (aire).

Para el estudio de cada material por separado, se elaboró una cavidad FP de dos espejos, cuya configuración es dos puntas de fibra SMF inmersas en el material a estudiar. En esta sencilla configuración los parámetros involucrados son:

$$\begin{aligned}n_1 &= n_3 = n_{SMF} \\n_2 &= n_{material} \\L_1\end{aligned}$$

Considerando que el índice de refracción de la fibra no necesita factor de corrección, se tomó el valor especificado por el fabricante $n_{SMF} = 1.451$. Teniendo este dato y midiendo la distancia entre las puntas de las fibras (L_1), se puede hallar el factor de corrección *n equivalente* (n_{eq}) del material en el que están inmersas, el

ANEXO D. OBTENCIÓN DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN.

cual hace que la respuesta teórica coincida con la experimental. Para encontrar el n_{eq} fue necesario variar este parámetro, junto con $r_1 = r_2$ que dependen del mismo, hasta obtener la gráfica teórica esperada.

Una vez obtenido el n_{eq} para ambos materiales en el arreglo original de la cavidad, se elaboraron distintas configuraciones en donde la distancia entre las puntas de las fibras fuera lo que variara, se adquirieron los datos correspondientes, se graficaron los patrones de interferencia experimentales y se hizo la simulación para cada uno utilizando el n_{eq} ; corroborando que con este mismo valor el patrón de interferencia simulado es igual al experimental en todos los casos. Las figuras demostrativas con algunas de las fotografías de las distintas configuraciones con las que se adquirieron los datos para ambos medios y los patrones de interferencia junto con las simulaciones teóricas respectivas para cada medio en particular, se muestran a continuación.

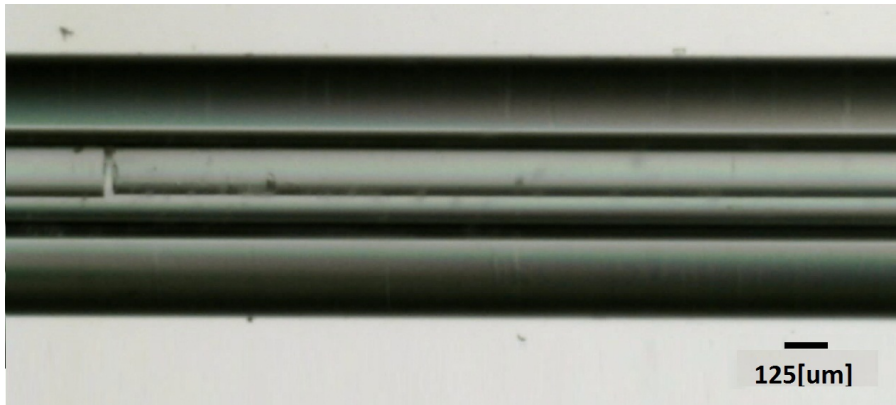


Figura D.1: Fibras ópticas dentro de un capilar a una distancia de $21.5\mu m$

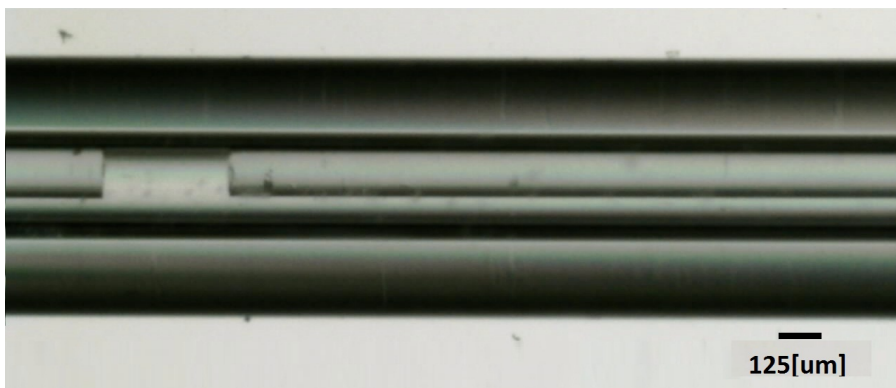


Figura D.2: Fibras ópticas dentro de un capilar a una distancia de $283.1\mu m$



Figura D.3: Fibras ópticas dentro de un capilar a una distancia de $578.2\mu m$

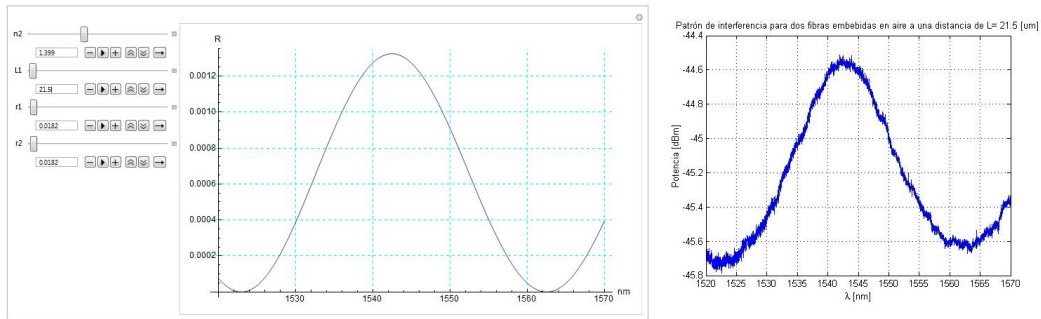


Figura D.4: Comparación teórica-experimental de la respuesta de dos fibras embebidas en aire a una distancia de $21.5\mu m$

Con estos experimentos adicionales se concluyó que utilizando $n_{eq} = 1.934$ para el PDMS y $n_{eq} = 1.399$ para el interior de la burbuja todos los interferogramas simulados corresponden a los obtenidos de manera experimental. Y, dada esta afirmación, se utilizaron los n_{eq} mencionados para las simulaciones de los filtros interferométricos fabricados.

Adicionalmente, se realizó una gráfica que incluyera la caracterización de $\Delta\lambda$ en función de la distancia entre fibras embebidas en cada medio D.10. A esta gráfica se le añade la caracterización de un tercer medio: PDMS curado, la cual se realizó mediante el mismo análisis presentado en este apartado para aire y PDMS.

ANEXO D. OBTENCIÓN DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN.

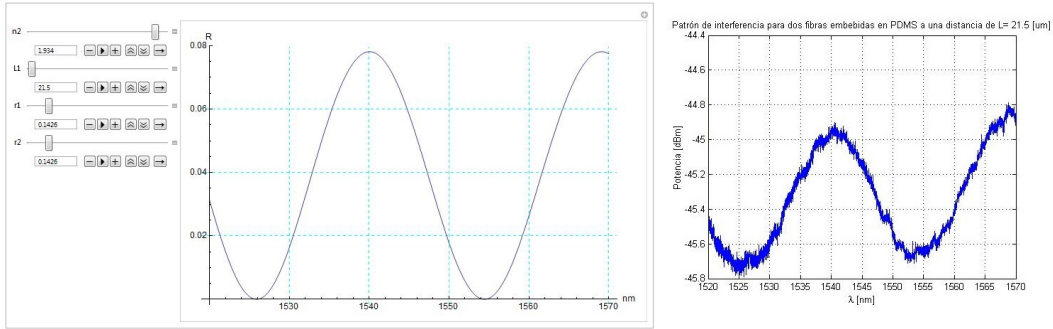


Figura D.5: Comparación teórica-experimental de la respuesta de dos fibras embebidas en PDMS a una distancia de $21.5\mu\text{m}$

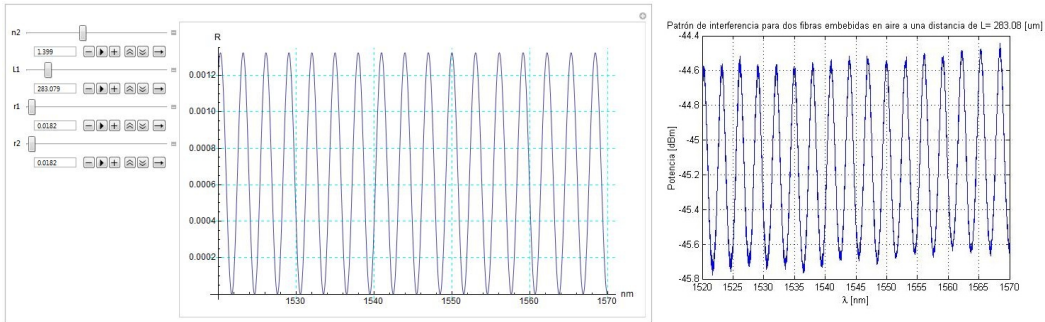


Figura D.6: Comparación teórica-experimental de la respuesta de dos fibras embebidas en aire a una distancia de $283.1\mu\text{m}$

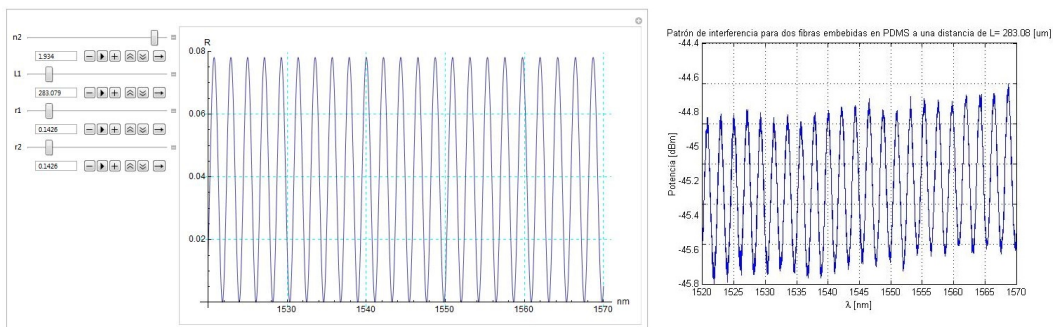


Figura D.7: Comparación teórica-experimental de la respuesta de dos fibras embebidas en PDMS a una distancia de $283.1\mu\text{m}$

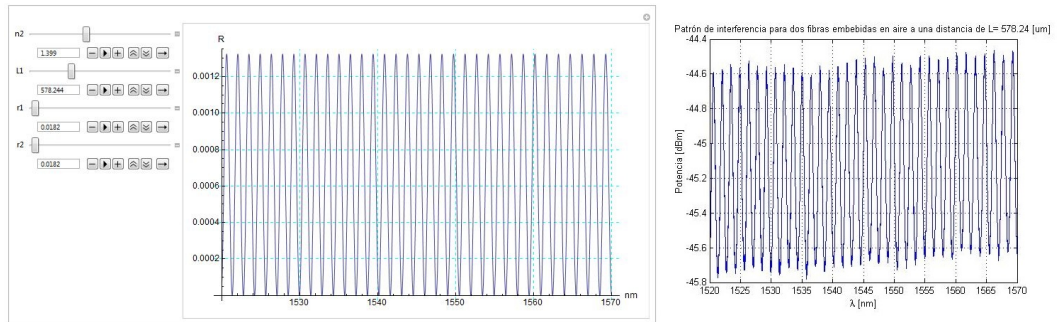


Figura D.8: Comparación teórica-experimental de la respuesta de dos fibras embebidas en aire a una distancia de $578.2\mu m$

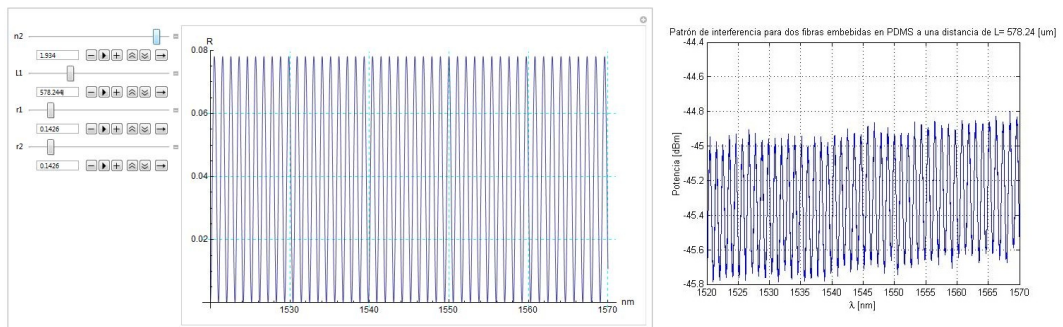
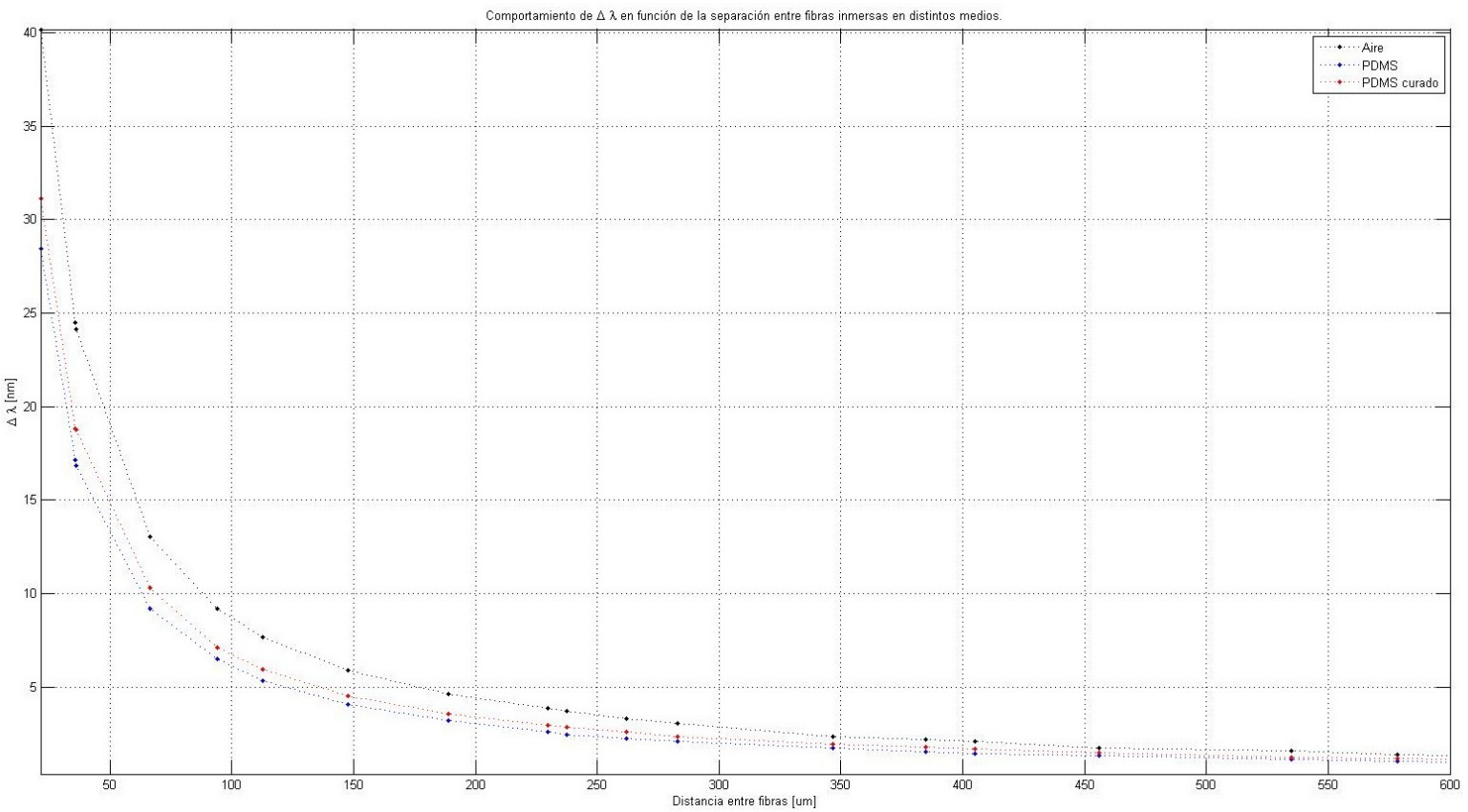


Figura D.9: Comparación teórica-experimental de la respuesta de dos fibras embebidas en PDMS a una distancia de $578.2\mu m$



120
 Figura D.10: Comportamiento de $\Delta \lambda$ en función de la separación entre fibras inmersas en distintos medios.

Anexo E

Trabajos presentados.

1er Simposio de Estudiantes Asociados al IIM.

8th Ibero American Optics Meeting/ 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications (RIAO/OPTILAS 2013)

Simposio Latinoamericano de Química de Coordinación y Organometálica SiLQCOM- International Conference on Polymers and Advanced Materials POLYMAT 2013.



Ciudad Universitaria, a 30 de mayo de 2013

Estimada Mildred Socorro Cano Velázquez

PRESENTE.

Te informamos que tu trabajo con título “*Fabricación de filtros interferométricos de fibra óptica y materiales poliméricos.*”, realizado con el Dr. Juan A. Hernández Cordero ha sido aceptado para participar en el 1er Simposio de estudiantes asociados del IIM, en la modalidad de **Sesión Cartel**. La clave de tu resumen es **MOE01**.

La cita para la presentación de tu cartel es el **Viernes 2 de agosto, 15:30 a 17:00 hrs**, del presente año en el vestíbulo de la biblioteca del Instituto de Investigaciones en Materiales. Te solicitamos llegar 10 minutos antes para preparar y pegar tu cartel. Te recordamos que el cartel debe estar en idioma español y con medidas de 90×110 cm. El diseño es libre. El programa del Simposio está disponible en la siguiente dirección electrónica: <http://www.iim.unam.mx/simpest/>

Al inicio de cada día de actividades del simposio habrá una mesa para el registro, ahí se te hará entrega de las memorias del simposio y de tu constancia de participación.

Para finalizar, aprovechamos este medio para invitarte a participar en las sesiones orales, en las sesiones de carteles, en las mesas redondas y en las actividades culturales del 1er Simposio de estudiantes asociados del IIM.

Saludos Cordiales

Comité Organizador

1^{er} Simposio de Estudiantes Asociados

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México

Figura E.1: Carta de aceptación al 1er Simposio de Estudiantes Asociados al IIM.



 SIMPOSIO DE IIM
ESTUDIANTES



OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

a Mildred Socorro Cano Velázquez

Por haber participado en el

**1^{er} SIMPOSIO DE ESTUDIANTES ASOCIADOS AL INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

Con el trabajo titulado:

Fabricación de filtros interferométricos de
fibra óptica y materiales poliméricos
realizado el 31 de julio, 1 y 2 de agosto del 2013

Dra. Ana María Martínez Vázquez
Directora

Dr. Juan A. Hernández Cordero
Secretario Académico

Innovar • Inventar • Modernizar

(Full) Paper Number: RIA100-42

Tracking Number: RIA13-RIA100-42

Title: Fabrication of polymer Fabry-Perot fiber sensors using optical fiber microheaters

Author Preference: Oral **Presentation Type:** Oral

Contact Author: Dr. Juan Hernandez-Cordero

Affiliation: IIM UNAM

Business Phone: (B) 52 555 622 4588

Alternate Phone:

Mobile/Cell Phone:

Email: jhcordero@iim.unam.mx

Full Author List: J. Hernandez-Cordero, M. Cano-Velazquez, IIM UNAM (Mexico)

Speaker: Dr. Juan Hernandez-Cordero

Speaker Biography: Juan Hernández-Cordero received his BSc. degree in electrical engineering from the National Autonomous University of Mexico (UNAM) in 1992. After completing a year as a research and assistant at the Materials Research Institute (IIM) of the UNAM, he was awarded a full scholarship to pursue graduate studies at Brown University. He earned a Master's and Ph.D. degrees in the Division of Engineering at Brown in 1996 and 1998, respectively. He then spent a year as a Postdoctoral Research Associate at the Laboratory for Lightwave Technology in Boston University. He is currently a full time tenured researcher at the Materials Research Institute (IIM) of the UNAM, where he has established the Laboratory for Fiber Lasers and Optical Fiber Sensors. His fields of interest include optical fiber sensors, fiber lasers and fiber devices; currently, he is also pursuing research in random lasers and fiber optic traps for materials science applications.

Abstract Text: We report on a novel fabrication technique for polymer based Fabry-Perot (FP) optical fiber sensors. The FP interferometers are based on microbubbles generated in the polymer by means of a microheater fiber probe. Upon inserting the probe and a cleaved single-mode fiber in a capillary tube containing the polymer, a microbubble can be readily generated which can serve as a reflective surface. A FP cavity is thus formed by the microbubble and the single-mode fiber tip and temperature or strain deforming the bubble can be detected upon monitoring the FP resonances. The fabrication and performance of these devices as temperature and strain sensors is presented in this paper.

Keywords: Optical fiber sensors, Fabry-Perot interferometers, Polymer processing, Temperature sensors

Extra File:

Figura E.3: Datos de la presentación en el RIAO/OPTILAS 2013.

Fabrication of polymer Fabry-Perot fiber sensors using optical fiber microheaters

Mildred S. Cano-Velázquez and Juan Hernández-Cordero*

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México
A.P. 70-360, Cd. Universitaria, México D. F. 04510, México.

ABSTRACT

We report on a novel fabrication technique for polymer based Fabry-Perot (F-P) optical fiber sensors. The F-P interferometers are based on microbubbles generated in the polymer by means of a microheater fiber probe. Upon inserting the probe and a cleaved single-mode fiber in a capillary tube containing the polymer, a microbubble can be readily generated which can serve as a reflective surface. A F-P cavity is thus formed by the microbubble and the single-mode fiber tip and temperature or strain deforming the bubble can be detected upon monitoring the FP resonances. The fabrication and performance of these devices as a temperature sensor is presented in this paper.

Keywords: Optical fiber sensors, Fabry-Perot interferometers, polymer processing, temperature sensors.

1. INTRODUCTION

Interferometric fiber optic sensors have been used extensively in a wide variety of applications, and Fabry-Perot (F-P) sensors in particular represent one of the most versatile configurations¹. Chemical and physical parameters such as strain, gas concentration, refractive index and temperature have been successfully quantified or monitored using F-P sensors as a key component for compact and high-resolution devices^{1,2}. In general, the materials used within the cavity define the sensitivity and measuring range of these sensors, and the advent of new materials is constantly opening new possibilities for developing compact and highly sensitive devices.

F-P cavities are commonly constructed using two optical fibers in close proximity, thus yielding the so-called Extrinsic Fabry-Perot Interferometric (EFPI) sensor^{3,4}. Typically, these are formed upon placing two optical fibers on opposite ends of a capillary tube with a gap between them. In this approach, fiber positioning within the capillary is critical, since the cavity length effectively defines the spectral response of the sensor. Alternatively, a F-P cavity may be formed upon processing the fiber tip with laser pulses², or upon splicing fibers with different geometries such as single-mode and photonic crystal fibers⁵. Recently, EFPI sensors based on microbubbles have been reported; these may be formed during fusion splicing of fibers⁶, or via capillary effects in silica tubes spliced to standard single-mode fibers⁷. Strain, pressure and temperature have been measured with these devices over ranges limited by the materials used for fabrication.

We have recently introduced a novel approach for generating microbubbles in liquid media utilizing photothermal effect in carbon nanostructures⁸. Since nanostructures can be readily incorporated onto the endfaces of standard optical fibers, localized heat can be generated using a low power laser diode launched into the fiber core. This arrangement effectively operates as an optical fiber microheater, which among other interesting applications, may be used for generating micron-size bubbles in different liquid media. Taking advantage of the size of these devices, we have successfully used them for fabricating F-P sensors in polymer media⁹. In this paper, we present the latest advances in the manufacturing process of these polymer-based microbubble fiber sensors. The experimental arrangement used for sensor fabrication is based on a computer-controlled system for fiber manipulation and bubble growth monitoring. Capillary tubes filled with polydimethylsiloxane (PDMS) are used for housing both, the sensing fiber and the optical fiber microheater; thus, a microbubble can be generated in the polymer serving as a reflective surface for the F-P cavity. Using motorized actuators, the relative position of the optical fibers and the microheater can be adjusted precisely and the size and location of the bubble can be readily modified. Using signal post-processing, we evaluate features such as sensitivity and the influence of the size of the bubble in the spectral response of the sensors. We further assess the performance of the F-P devices as temperature sensors.

*jhcordero@iim.unam.mx; phone +52 55 5622-4588; fax +52 55 5622-4602.

2. SENSOR FABRICATION

2.1 Optical fiber microheaters

The F-P sensors are fabricated using optical fiber microheaters developed in our laboratory and these rely on the photothermal effects generated in carbon nanoparticles when irradiated with laser light. A microheater is fabricated via optically driven deposition of carbon nanoparticles onto optical fiber end faces⁸. This is achieved by means of a laser diode (975nm, 200mW max. output power), standard single-mode optical fiber (SMF-28) for laser guiding and deposition, and nanoparticles dissolved in an ethanol solution. The fibers are cleaved and subsequently immersed in the solution; when the laser diode is turned on, the deposition process begins yielding a fiber endface with a layer of nanoparticles.

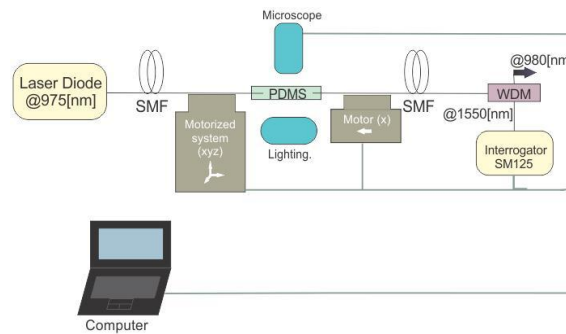


Figure 1. Experimental arrangement for fabrication of F-P sensors: the relative position of the microheater and the sensing fiber is controlled via motorized stages. The process is continuously monitored with a microscope and recorded in a personal computer.

Photothermal effects in nanoparticle clusters arise from enhanced field effects. These have been verified under different experimental conditions when the nanoparticles are irradiated with laser light¹⁰. In optical fibers with nanoparticle deposits, the localized photothermal effects lead to bubble formation in the vicinity of the fiber tip when immersed in liquid media. Bubbles can thus be generated and their size can be controlled upon adjustments of the output power of the laser diode. The fiber tips effectively operate as microheaters useful for generating micron-size bubbles in liquids with a wide range of viscosities. For the proposed sensors, we focused on polydimethylsiloxane (PDMS), a biocompatible and versatile polymer used in a wide range of applications.

2.2 F-P cavity fabrication

The arrangement for fabrication of the F-P sensors is shown schematically in Figure 1. Glass capillary tubes filled with PDMS are used for hosting both, the fiber microheater and the sensing fiber; these are fed on opposite ends of the capillary tube. Alignment between both fibers is achieved by means of a computer controlled 3D translational stage and the gap between the microheater and the sensing fiber is also adjusted with an additional motorized stage. During the fabrication process, the backreflected signal from the sensing fiber is continuously monitored using a fiber Bragg grating interrogator (Micron Optics, sm125). As seen in the figure, a WDM is used at the input of the interrogator to prevent any residual light from the LD to reach the detection system. Bubble growth and alignment is also monitored during fabrication with a microscope (DinoLite); data and image acquisition together with fiber alignment is conveniently controlled with a virtual instrument developed in LabView.

Initially, a small gap is left between the microheater and the sensing fiber. Once this is fixed, the laser diode is turned on and a bubble starts growing nearby the microheater. When the bubble reaches a target size, the laser diode is turned off; upon adjusting the 3D stage, the fiber microheater is displaced inside the capillary and the bubble can be positioned

within a desired distance from the sensing fiber. The F-P cavity is thus formed between the sensing fiber endface and the microbubble. Finally, if required, the microheater can be carefully removed from the capillary. Figure 2 shows images of two sensors with different spacing between the microbubble and the sensing fiber.

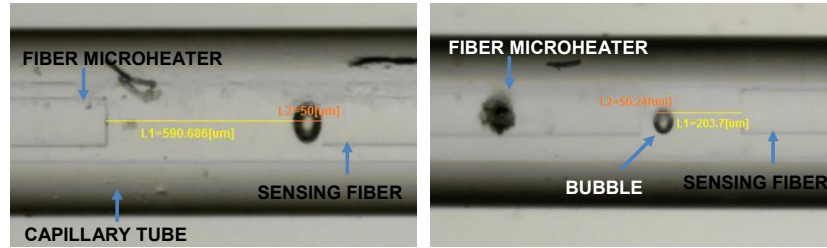


Figure 2. Images of two F-P microbubble polymer sensors with different gaps and bubble sizes. In both cases the fiber microheater remains within the capillary tubes.

3. SPECTRAL FEATURES OF THE F-P SENSORS

As with any F-P cavity, the spectral features of the sensors are given by the geometry and refractive index of the material within the reflective surfaces. In the fiber-bubble configurations, the spectral response depends on the distance between the bubble and the fiber endface (i.e., the gap between the bubble and the fiber tip), the bubble size and the refractive index of the PDMS. The backreflected signal registered by the FBG interrogator is similar to that obtained with multimirror F-P interferometers, showing a typical interference signal (carrier), with a short wavelength period, and modulated by an envelope with a longer period.

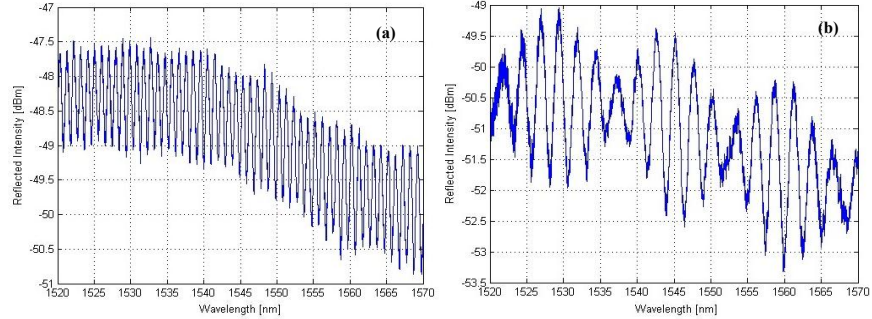


Figure 3. Spectral response of the two sensors shown in Figure 2: (a) large bubble in close proximity to the sensing fiber; (b) small bubble away from the sensing fiber.

Figure 3 shows the interference signals registered with the F-P sensors shown in Figure 2. While a large bubble close to the sensing fiber yields a pattern with practically no modulation envelope (Fig. 3a), a small bubble away from the fiber tip shows a strongly modulated signal (Fig. 3b). Since our setup allows for varying the bubble size and the gap between the bubble and the fiber, we were able to evaluate the effects of these parameters on the spectral response. For a small and fixed gap, an increase in the bubble size yielded only small changes in the modulation index of the envelope. In contrast, for a fixed bubble size, changes in the gap strongly affect the period of the envelope signal. Although further work is required to fully analyze these effects, it is clear that proper signal processing should allow for discerning

between changes in the size of the microbubble and changes in the gap. This should be of interest for sensing applications since temperature and/or strain may affect the bubble and the gap in different ways and this might provide an alternative for a self-referencing scheme.

4. SIGNAL PROCESSING AND ANALYSIS

Signal analysis has been performed following two approaches: one is based on a multi-mirror F-P resonator model and the other through FFT analysis. The theoretical model for data analysis is based on multilayer thin films matrix methods¹¹. The incident and transmitted waves are given by:

$$\begin{pmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{pmatrix} = \frac{1}{t_1 t_2 \dots t_{N-1}} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{pmatrix} \quad (1)$$

E_i^+ is the amplitude of the electric field vector on the left-hand side of the input mirror i ($i=1,2,\dots,N$) for a wave front propagating to the right; E_i^- is the amplitude on the left-hand side of mirror i for a wave front traveling to the left; t_1, t_2, \dots, t_{N-1} are transmission amplitude coefficients for every interface, A, B, C and D are the resulting elements of the matrix analysis for the phase changes of the optical wave after multiple reflections inside the cavity.

The transmission amplitude coefficient of the stack of N mirrors is expressed as:

$$t = \frac{t_1 t_2 \dots t_{N-1}}{A - r_N B} \quad (2)$$

where r_N is the reflection amplitude coefficient for the N^{th} interface. The transmission intensity coefficient is given by

$$T = t t^* \quad (3)$$

In our case, the interference pattern observed in the optical interrogator corresponds to the reflection spectrum. Neglecting losses due to absorption, scattering, diffraction or misalignment, the reflection intensity coefficient can be obtained as $R = 1 - T$.

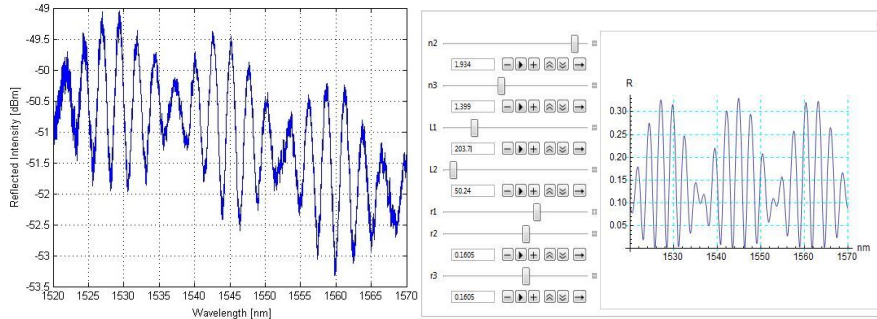


Figure 4. Spectrum registered with the FBG interrogator (left) and its corresponding fitting using the multi-mirror F-P model (right).

The multi-mirror model considers only flat reflective surfaces and allows for adjusting parameters such as the gap between the bubble and the fiber, bubble size and refractive indices. Upon fixing one of these parameters, the model can be used for fitting the experimental spectrum and the values for the remaining parameters can be readily obtained. As shown in Fig. 4, the multi-mirror model fits the registered spectra reasonably well. Nonetheless, calculations can be time consuming and a more efficient scheme is needed for real-time sensor decoding.

Post-processing the spectra with a FFT provides information of the carrier and the envelope of the modulated signal. Through proper scaling of the FFT, the index of the transformation yields the number of peaks within the full spectral range swept by the FBG interrogator. Other features of the signal that are obtained with this analysis include the number of peaks of the envelope and the period of the modulated signal. Through this analysis we were able to investigate the influence of the bubble size and the gap on the modulated signal. This was done upon adjusting the size of the bubble and its position within the capillary tube by means of the LD power and the 3D stage, respectively. While the bubble size only affects the envelope of the signal, the carrier is modified by the gap between the bubble and the sensing fiber.

The curves shown in Figure 5 illustrate the changes in wavelength spacing and number of peaks in the envelope and the carrier. Increasing the bubble size decreases the wavelength spacing and increases the number of peaks registered for the envelope. Similar effects were observed for the carrier but for changes in the gap between the bubble and the sensing fiber. Notice also that the sensitivity to these parameters (e.g., bubble size and gap) is also different in both cases. While changes in the bubble size mostly affect the wavelength spacing of the envelope, changes in the gap affect the number of peaks of the carrier more notably. More experimental work is needed to fully elucidate these effects; nonetheless, this behavior may indicate that a strongly modulated signal and its corresponding FFT could provide a means for discerning between refractive index changes and bubble expansion induced by temperature and/or strain in the F-P sensors.

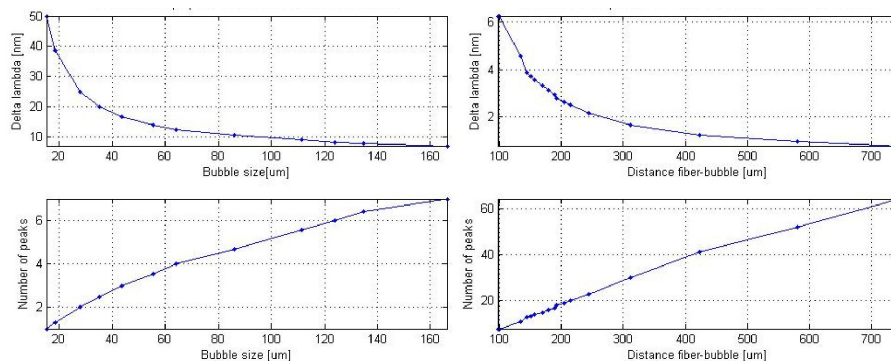


Figure 5. Changes in wavelength spacing and number of peaks of the modulated signal: the bubble size only affects the envelope (left column) and the gap affects the carrier (right column).

5. SENSOR PERFORMANCE: TEMPERATURE RESPONSE

The response of the F-P sensors was evaluated using a glass container with ice and water serving as a thermal bath. A PRT (Platinum Resistive Thermometer) was placed inside the glass in close proximity to the probe to obtain reference values for the changes in temperature. In order to minimize environmental perturbations, the setup was isolated by means of a Plexiglas box. The experimental procedure involved increasing the temperature of a hot plate placed underneath the thermal bath and recording the corresponding spectra registered by the fiber interrogator. With this arrangement, the temperature can be increased up to 70°C and then decreased slowly to room temperature upon turning the hot plate off. Both, the temperature and the corresponding spectrum were recorded periodically over adjustable periods of time and post-processed using both, the multi-mirror F-P model and FFT analysis. Figure 6 shows the spectral shift registered in an F-P sensor for a small range of temperatures.

As shown in Figure 7, post-processing of the experimental data yields the temperature changes as a function of time. The PRT readout is then used as the temperature reference for analyzing the spectral features of the F-P sensors when exposed to temperature changes. As an example, Figure 7 shows the changes in wavelength spacing and the number of

peaks in the spectrum of one sensor as a function of time (i.e., as the temperature is increased). In this case, the spectrum of the F-P probe showed only a small envelope variations (see Fig. 2a) and only the carrier yields useful information. During heating, the wavelength spacing decreases while the number of peaks in the spectrum increase. Following the results shown in Figure 5, the response of this sensor is mostly based on an increase in the gap between the bubble and the sensing fiber (i.e., the length of the F-P cavity), and this can be attributed to thermal expansion and refractive index changes of the PDMS.

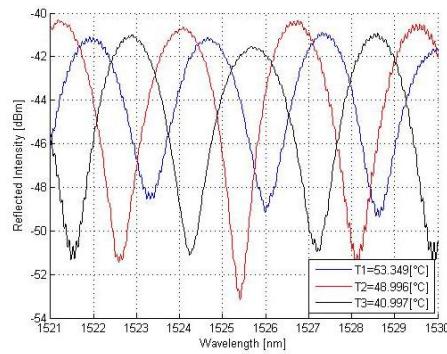


Figure 6. Changes in the backreflected signal registered with the FBG interrogator for three different temperatures.

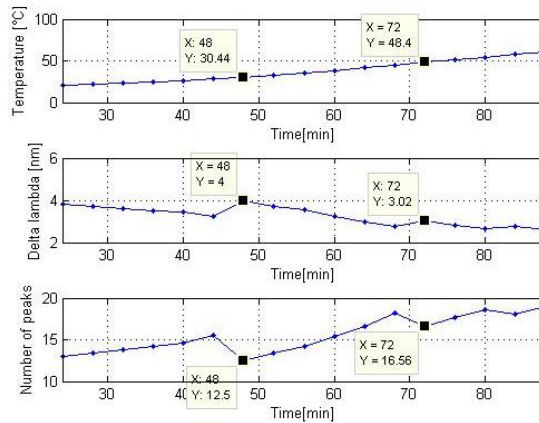


Figure 7. Changes in the spectral features of the F-P sensors registered during heating. The temperature is monitored with a calibrated PRT (a) and spectral features such as wavelength spacing (b) and the number of peaks in the spectrum can be correlated with temperature changes.

Further analysis of the experimental results show that a linear response of the sensors is obtained only for limited ranges of temperature. Notice however that this is due to the periodic response of the F-P cavity and unwrapping algorithms may be used for decoding the sensors over a larger temperature range. As seen in Figure 6, the sensitivity of the sensor varies over different temperature ranges. This is due to the curing process of the PDMS, which requires a thermal

treatment for full solidification. In these experiments, the sensors were left for curing at room temperature for several days; however, thermal curing may yield better results for full polymerizations of the PDMS cavities. We are currently monitoring the curing process of these sensors under temperature cycles as well as for a fixed temperature over extended periods of time. We thus expect to obtain good linearity and consistent sensitivity in the sensor response over extended temperature ranges.

CONCLUSIONS

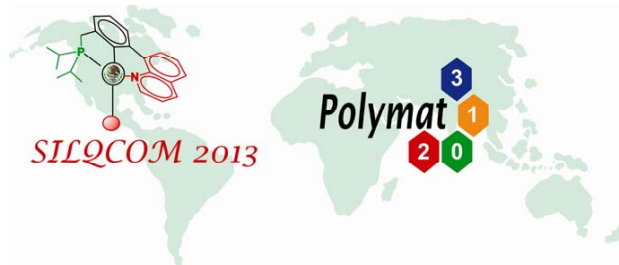
We have demonstrated a novel method for fabrication of F-P sensors based on optical fiber microheaters. The F-P cavities are formed by the endface of a single-mode optical fiber and a bubble generated by means of the microheater. Using a polymer as a host material (PDMS), the spectral response of the sensors can be adjusted upon varying the size of the bubble and the F-P cavity length. These capabilities could provide a means for adjusting the sensitivity of the sensor to temperature changes or other physical parameters affecting the bubble of the refractive index of the PDMS within the cavity.

Acknowledgments

This work was supported by DGAPA-UNAM through grant PAPIIT-IN102112.

REFERENCES

- [1] Lee, B. H., Kim, Y. H., Park, K. S., Eom, J. B., Kim, M. J., Rho, B. S., Choi, H. Y., "Interferometric Fiber Optic Sensors," *Sensors*, Vol. 12, No. 3, pp. 2467-2486 (2012).
- [2] Rao, Y., Deng, M., Duan, M., Yang, X., Zhu, T., Cheng, G., "Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser," *Optics Express*, Vol. 15, pp. 14123-14128 (2007).
- [3] Jiang, Y., Tang, C., "High-finesse micro-lens fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 5, 055013 (2008).
- [4] Wang, G., "High sensitive extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system with low cost," *Microwave and Optical Technolgy Letters*, Vol. 53, No. 7, pp. 1491-1493 (2011).
- [5] Milenko, K., Hu, D., Shum, P., Zhang, T., Lim, J., Wang, Y., Wolinski, T., Wei, H., Tong W., "Photonic crystal fiber tip interferometer for refractive index sensing," *Optics Letters*, Vol. 37, No. 8, pp. 1373-1375 (2012).
- [6] Duan, D., Rao, Y., Hou, Y., Zhu, T., "Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement," *Applied Optics*, Vol. 51, No. 8, pp. 1033-1036 (2012).
- [7] Wang, Y., Wang, D., Wang, C., Hu, T., "Compressible fiber optic micro-Fabry-Perot cavity with ultra-high pressure sensitivity," *Optics Express*, Vol. 21, pp. 14084-14089 (2013).
- [8] Pimentel-Domínguez, R., Hernández-Cordero, J., Zenit, R., "Microbubble generation using fiber optic tips coated with nanoparticles," *Optics Express*, Vol. 20, No. 8, pp. 8732-8740 (2012).
- [9] Argumedo, B., Márquez, V., Hernández-Cordero, J., "Polymer Microbubble Fabry-Perot Temperature Sensor," in *Latin America Optics and Photonics Conference, OSA Technical Digest* (online), paper LS3B.5 (2012).
- [10] Pimentel-Domínguez, R., Sánchez-Arévalo, F. M., Hautefeuille, M., Hernández-Cordero, J., "Laser induced deformation in polydimethylsiloxane membranes with embedded carbon nanopowder," *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 3, 037001 (2013).
- [11] Marquez-Cruz, V., Hernandez-Cordero, J., "Fiber Optic Multimirror Fabry-Perot Sensor for Liquids Analysis," in *Latin America Optics and Photonics Conference, OSA Technical Digest* (online), paper LS3B.2 (2012).



POLYMAT-SILQCOM 2013

Mexico City, September 2nd 2013

MILDRED SOCORRO CANO VELÁZQUEZ
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES UNAM

Dear Mildred Socorro Cano Velázquez:

It is my pleasure to inform you that your work entitled "**Fabrication for polymer Fabry-Perot optical fiber filters**" co-authored by **Mildred S. Cano-Velázquez and Juan Hernández-Cordero** has been accepted as **POSTER** presentation in **Session 6.- Poster Session** of the International Conference on Polymers and Advanced Materials POLYMAT-SILQCOM-2013. This congress will be held in Huatulco, Mexico in October 13-17 2013.

Thanks for your valuable participation and I am looking forward to seeing you in Huatulco.

Sincerely yours

Prof. Ernesto Rivera
President of the Organizing Committee

Prof. Ernesto Rivera
Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM
Telephone: (5255) 56 22 47 33 FAX: (5255) 56 16 12 01
e-mail: riverage@unam.mx

Se otorga la presente

CONSTANCIA a:

*Mildred S. Cano-Velázquez and Juan
Hernández-Cordero*



Por su participación con el trabajo titulado:

**“Fabrication for polymer Fabry-Perot optical fiber
filters.”**

SILQCOM 2013 dentro del



International Conference on Polymers and Advanced Materials, “POLYMAT”/

Simposio Latinoamericano de Química de Coordinación y Organometálica

“SILQCOM” 2013

Del 13 al 17 de octubre de 2013.

Atentamente.


Prof. **Ernesto Rivera Garcia**
Presidente

Figura E.6: Constancia de participación del SILQOM-POLYMAT 2013.

Referencias bibliográficas.

- [1] S. Y. Set K. Kashiwagi, S. Yamashita. Optically manipulated deposition of carbon nanotubes onto optical fiber end. *J. Appl. Phys*, 2007.
- [2] Reinher Rolando Pimentel Domínguez. *Interacción de luz láser con micro y nano estructuras*. Tesis de licenciatura, 2012.
- [3] R. Zenit R. R. Pimentel Domínguez, J. Hernández-Cordero. Microbubble generation using fiber optic tips coated with nanoparticles. *Optics Express*, Vol. 20, Núm. 8, 2012.
- [4] V. A. Márquez-Cruz B. Argumedo-Uribe and J. Hernández-Cordero. Polymer microbubble fabry perot temperature sensor. *Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP)*, 2012.
- [5] J. P. Laude. *Wavelength Division Multiplexing*. Prentice Hall., 1999.
- [6] B. Saleh and M. Teich. *Fundamental of photonics*. Wiley Interscience, 1991.
- [7] J. M. Senior. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 1993.
- [8] A. Govind. *Fiber optic communication system*. Jhon Willey., 2002.
- [9] Herbert Venghaus. *Wavelength Filters in Fibre Optics*. Springer, 2006.
- [10] E. Hecht. *Optics*. Pearson Education, 2008.
- [11] B.A. Fernández. *El Láser: la luz de nuestro tiempo*. Globalia, 2010.
- [12] G. Hernández. *Fabry-Perot Interferometers*. Cambridge Studies in Modern Optics. Cambridge University Press, 1988.
- [13] K.B. Howell. *Principles of Fourier Analysis*. Studies in Advanced Mathematics. Taylor & Francis, 2010.

- [14] A. Santiago-Alvarado and S. Vázquez Montiel. Propiedades físico-químicas de membranas de pdms empleadas en lentes líquidas. *Superficies y Vacío. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales.*, 2009.
- [15] Jan Draheim Florian Schneider and Robert Kamberger. Process and material properties of polydimethylsiloxane (pdms) for optical mems. *Sensors and Actuators. ELSEVIER.*, 2009.
- [16] V. A. Márquez-Cruz and J. Hernández-Cordero. Surface tension measurements with a fiber optic fabry-perot interferometer. *Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications*, 2013.
- [17] Autor desconocido. *Fiber Fabry-Perot Tunable Filter (FFP-TF2). Micron Optics.*, 2013.
- [18] UIT-T. Rec. g.694.2 : Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por longitud de onda. Technical report, Sector de normalización de las telecomunicaciones., 2003.
- [19] Sie-Wook Jeon and Tae-Young Kim. All-optical clock extraction from 10-gbit/s nrz-dpsk data using modal interference in a two-mode fiber. *Optics Communications ELSEVIER*, 2009.
- [20] Yousra Ben M'Salem. Optical packet switching via fwm processing of time-stacked weight-2 codes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008.