



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**ELÉCTRICA- INSTRUMENTACIÓN**

DETECCIÓN DE RADIACIÓN TERAHERTZ DE COMPUESTOS POLIMÉRICOS CON  
CARBONO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
REIDEL PIÑEIRO ALONSO

TUTOR PRINCIPAL  
DR. NASER QURESHI, ICAT-UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: (Dr. García Valenzuela Augusto)

Secretario: (Dr. Hernández Cordero Juan A.)

1er. Vocal: (Dr. Qureshi Naser)

2do. Vocal: (Dr. Sandoval Romero Gabriel Eduardo)

3er. Vocal: (Dra. Sánchez Pérez Celia Angelina)

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Investigaciones en Materiales, IIM (UNAM).

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, ICAT (UNAM).

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Qureshi Naser

-----  
**FIRMA**

*” El éxito es aprender a ir de fracaso en fracaso sin desesperar.”*  
*Winston Churchill*

# Agradecimientos

A mi familia por su apoyo y amor durante estos años de mi vida.

A mis padres José Reidel e Iliana por haberme enseñado a dar pasos en la vida y ayudarme siempre en lo que hiciera falta.

A mi esposa Claudia María Ojeda López, quien ha sido mi compañera durante esta etapa de superación profesional y ha estado a mi lado en los momentos de alegría y estrés.

Al Posgrado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme aceptado entre sus filas, lo cual estoy muy orgulloso, y brindarme la oportunidad de cursar mis estudios de maestría en tan prestigiosa universidad para alcanzar un sueño de superación profesional.

Al Dr. Naser Qureshi por ser mi tutor y mi guía en esta etapa de superación profesional. Por aceptarme como su estudiante, por su ayuda y su apoyo incondicional para la realización de este proyecto. Por su paciencia, sus consejos, su experiencia, me sirvieron de mucho para aprender cada día más.

Al Dr. Juan A. Hernández Cordero por su apoyo y ayuda para la realización de este trabajo. Por permitirme trabajar en el laboratorio de Fibras Ópticas y Dispositivos Fotónicos, lo cual fue determinante para mi proyecto. Por sus consejos y experiencia que me ayudaron a crecer profesionalmente.

Al Dr. Amado Velázquez por permitirme trabajar en su laboratorio y apoyarme en los momentos que lo necesitaba.

A los compañeros de maestría por brindarme su ayuda si tenía alguna duda y contribuyeron en mi desarrollo profesional.

A los profesores que me impartieron clases, aprendí mucho con ellos.

A mis amigos Darío, Ricardo, Jocelyn, Larissa y Alexa, con ellos aprendí mucho y

pasaba el tiempo más ameno. Por estar presentes en los momentos buenos y malos de la maestría.

A mis compañeros de laboratorio Reinher, Sandra, Mildred, Oscar, Yesi, Dahí, de todos aprendí algo y me ayudaron en lo que necesitaba.

A los sinodales Gabriel Eduardo Sandoval Romero, Celia Angelina Sánchez Pérez y Augusto García Valenzuela.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo económico a través de la beca otorgada durante mis estudios, lo cual hizo posible la realización de este trabajo.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM) por el financiamiento al proyecto PAPIIT con número IN116019, con el tema: Fabricación de micro-estructuras de material gráfitico basado en tecnología Carbon-MEMS.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM) por el financiamiento al proyecto PAPIIT con número IG100519.

Al CONACyT por el financiamiento del proyecto número 253754.

# Resumen

La detección de frecuencias terahertz desempeña un papel importante en la industria, la biología y la ciencia de los materiales. De las técnicas existentes para detectar dichas frecuencias se requiere una óptica voluminosa o necesita refrigeración criogénica. En este trabajo se presenta la construcción de un sistema de detección terahertz, utilizando nanopulvos de carbono incorporados a compuestos poliméricos. En la primera parte de la tesis se presenta una introducción a la radiación en frecuencias terahertz. También se mencionan las maneras de irradiar y detectar la radiación terahertz, así como sus aplicaciones. Luego se describe el proceso de fabricación de la primera parte del sistema de detección, que consiste en una membrana compuesta por polidimetilsiloxano (PDMS) y nanopulvos de carbono. Los nanopulvos de carbono pueden convertir la radiación de terahertz absorbida en energía térmica a través de su capacidad de absorción de terahertz. Por su parte, el PDMS tiene un alto coeficiente térmico de expansión de volumen que es importante en la generación de un desplazamiento pequeño. En consecuencia, ambos contribuyen a la generación de desplazamiento de la membrana producto de la radiación terahertz. Posteriormente se describe la segunda parte del sistema de detección, que consiste en una fibra óptica monomodal, que en conjunto con la membrana polimérica con carbono, forman una cavidad Fabry-Perot. La señal de interferencia producida en la cavidad debido al desplazamiento de la membrana es posible detectarla gracias a un sistema formado por un acoplador de fibra óptica, un detector óptico, una tarjeta de adquisición de datos y un instrumento virtual para analizar los resultados obtenidos. El sistema de detección que se obtiene posee buena sensibilidad y responsividad ante cambios en la señal de incidencia, la cual está dada por luz del espectro visible y el infrarrojo cercano, de manera independiente.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
§1.1 Objetivos . . . . .	2
§1.2 Introducción a las bandas de frecuencias terahertz . . . . .	2
§1.3 Fuentes y detectores terahertz . . . . .	4
§1.3.1 Generación de terahertz . . . . .	4
§1.4 Detección de radiación terahertz . . . . .	5
§1.4.1 Detección coherente . . . . .	5
§1.4.2 Detección incoherente . . . . .	6
§1.5 Aplicaciones . . . . .	8
§1.6 Detección de radiación terahertz utilizando compuesto polimérico con carbono	10
<b>2 Fabricación de membranas poliméricas con carbono</b>	<b>12</b>
§2.1 Materiales para la fabricación . . . . .	12
§2.1.1 Polidimetilsiloxano (PDMS) . . . . .	12
§2.1.2 Nanopolvos de carbono . . . . .	13
§2.2 Metodología de fabricación de las membranas . . . . .	14
§2.2.1 Recubrimiento por rotación . . . . .	16
§2.3 Caracterización de las membranas PDMS/CNP . . . . .	17
§2.3.1 Caracterización de las membranas con concentración de 3 % de nanopolvos de carbono . . . . .	21
§2.3.2 Absorción de las membranas PDMS/CNP . . . . .	23

<b>3 Interferómetro Fabry-Perot en fibra óptica</b>	<b>26</b>
§3.1 Sensores interferométricos de fibra óptica . . . . .	26
§3.1.1 Aplicaciones . . . . .	27
§3.2 Sensores interferométricos Fabry-Perot en fibra óptica . . . . .	28
§3.3 Materiales para la fabricación . . . . .	30
§3.4 Primer arreglo experimental . . . . .	30
§3.5 Segundo arreglo experimental . . . . .	39
§3.5.1 Responsividad y sensibilidad del interferómetro Fabry-Perot . . . . .	47
§3.5.2 Variación del tamaño del área de detección. . . . .	54
§3.5.3 Comparación de los resultados para diferentes áreas de detección de las membranas de PDMS + CNP. . . . .	61
§3.5.4 El sistema de detección implementado y los detectores comerciales.	62
§3.6 Radiación terahertz para el sistema diseñado . . . . .	65
<b>A Especificaciones de los materiales utilizados</b>	<b>68</b>
§A.1 PDMS Sylgard 184 . . . . .	68
§A.2 Nanopolvos de carbono . . . . .	68
§A.3 Fibra óptica SMF28e de la marca Corning. . . . .	68
<b>B Equipos y elementos utilizados</b>	<b>72</b>
§B.1 Sistema motorizado MTS50-Z8 de Thorlabs . . . . .	72
§B.2 Interrogador óptico SM125 . . . . .	74
§B.3 Instrumento virtual utilizado . . . . .	75
<b>C Equipos y elementos utilizados</b>	<b>76</b>
§C.1 Diodo láser FPL1009S - 1550 nm . . . . .	76
§C.2 Controlador de diodo láser LDC-3724B . . . . .	78
§C.3 Microscopio Digital Usb 2.0 Plugable . . . . .	83
§C.4 Fotodetector de fibra óptica InGaAs D400FC de Thorlabs . . . . .	84
§C.5 Tarjeta de adquisición de datos de National Instruments USB-6000 . . . . .	86
§C.6 Instrumento virtual utilizado . . . . .	87

# Índice de figuras

1.1	Diagrama básico del espectro electromagnético. . . . .	3
1.2	Detección armas ocultas con escáner en un aeropuerto. Tomada de [18]. . .	8
1.3	Imágenes moleculares de tumores en un ratón. Tomada de [23]. . . . .	9
1.4	Análisis de una pintura usando radiación THz. Tomada de [24]. . . . .	9
1.5	Arreglo experimental para la detección de radiación terahertz. . . . .	10
2.1	Polidimetilsiloxano (PDMS) Sylgard 184: base polimérica y agente curante.	13
2.2	Metodología de fabricación de las membranas PDMS/CNP. (a) Pesaje del PDMS dentro de un vaso de precipitados de vidrio, (b) Adición de los CNP y (CHCl <sub>3</sub> ), (c) Mezclando el PDMS con los CNP y evaporación del (CHCl <sub>3</sub> )(líneas rojas), (d) Adición del agente curante, (e) Degasificación de la mezcla, (f) La mezcla es colocada sobre una caja de Petri y girada por centrifugación, (g) Proceso de curado por calor (líneas rojas) a 70 °C para su solidificación, (h) Desmontando la membrana de PDMS/CNP . . . . .	15
2.3	Curva de velocidad realizada en el recubrimiento por rotación . . . . .	17
2.4	Esquema representativo de la medición de los espesores de las membranas usando el microscopio. . . . .	18
2.5	a) Imagen real de una membrana de PDMS vista por el microscopio b) Imagen real de una membrana de PDMS+CNP vista por el microscopio. . .	18
2.6	Esquema de muestras tomadas para análisis de homogeneidad . . . . .	19
2.7	Homogeneidad en los espesores de las membranas de PDMS . . . . .	20
2.8	Promedio y desviaciones de las membranas de PDMS puro. . . . .	21
2.9	Homogeneidad en los espesores de las membranas de PDMS+ CNP-3 % . .	22
2.10	Promedio y desviaciones de las membranas de de PDMS + CNP-3 % . . .	22

2.11 Arreglo experimental de análisis de absorción de las membranas de PDMS/CNP 24

2.12 Absorbancia de las membranas de PDMS/CNP en diferentes concentraciones 25

3.1 Tipos de interferómetros Fabry-Perot de fibra debido a su fabricación. (a) IFPI, (b) EFPI. La diferencia de longitud del camino óptico entre haces proporciona información para las aplicaciones de detección.  $R_1$  y  $R_2$  son las superficies reflectantes que limitan la cavidad del interferómetro, OP es la diferencia de trayectoria óptica entre los haces  $I_T$  e  $I_R$ . . . . . 29

3.2 a) Diagrama de bloques del arreglo experimental, b) Fotografía del arreglo experimental. . . . . 31

3.3 a) Vista superior b) Vista lateral c) Vista inferior . . . . . 33

3.4 a) Patrón de interferencia obtenido haciendo contacto la fibra óptica con la membrana b) Patrón de interferencia obtenido con una cavidad de  $70 \mu\text{m}$ . 34

3.5 a) Patrón de interferencia obtenido haciendo contacto la fibra óptica con la membrana b) Patrón de interferencia obtenido con una cavidad de  $70 \mu\text{m}$ . 35

3.6 a) Patrón de interferencia obtenido haciendo contacto la fibra óptica con la membrana b) Patrón de interferencia obtenido con una cavidad de  $70 \mu\text{m}$ . 37

3.7 a) Patrón de interferencia obtenido para tres diferentes concentraciones de CNP. . . . . 38

3.8 a) Diagrama de bloques del arreglo experimental, b) Fotografía del arreglo experimental. . . . . 40

3.9 a) Diagrama de bloques del arreglo experimental, b) Fotografía del arreglo experimental. . . . . 41

3.10 Calibración del diodo láser FPL1009S de Thorlabs. . . . . 43

3.11 a) Señal de interferencia original (negra) y filtrado de la misma (roja), b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot. . . . . 44

3.12 Imagen ampliada de la figura 3.11. . . . . 45

3.13 a) Señal de interferencia original (negra) y filtrado de la misma (roja), b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot. . . . . 46

3.14 Imagen ampliada de la figura 3.13. . . . . 47

3.15 a) Prueba de encendido y apagado del diodo láser de $\lambda= 532\text{nm}$ , b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot para este experimento. . . . .	48
3.16 Imagen ampliada de la figura 3.15. . . . .	49
3.17 Imagen ampliada de la figura 3.15 (a) para cálculo de sensibilidad. . . . .	50
3.18 Arreglo experimental utilizando un diodo láser de $\lambda= 780\text{nm}$ . . . . .	51
3.19 a) Prueba de encendido y apagado del diodo láser de $\lambda= 780\text{nm}$ , b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot para este experimento. . . . .	52
3.20 Imagen ampliada de la figura 3.19. . . . .	53
3.21 Imagen ampliada de la figura 3.19 (a) para cálculo de sensibilidad. . . . .	54
3.22 a) Prueba de encendido y apagado del diodo láser de $\lambda= 532\text{nm}$ , b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot para este experimento. . . . .	55
3.23 Imagen ampliada de la figura 3.22. . . . .	56
3.24 Imagen ampliada de la figura 3.22 para cálculo de sensibilidad. . . . .	57
3.25 a) Prueba de encendido y apagado del diodo láser de $\lambda= 780\text{nm}$ , b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot para este experimento. . . . .	58
3.26 Imagen ampliada de la figura 3.25. . . . .	59
3.27 Imagen ampliada de la figura 3.25 para cálculo de sensibilidad. . . . .	60
3.28 Detector piroeléctrico para radiación terahertz QS5-THZ-BL. Tomada de <a href="https://www.gentec-eo.com/products/qs5-thz-bl">https://www.gentec-eo.com/products/qs5-thz-bl</a> . . . . .	62
3.29 Comparación de varios fotodetectores de diferentes esctructuras (1). Tomada de [42]. . . . .	63
3.30 Comparación de varios fotodetectores de diferentes esctructuras (2). Tomada de [42]. . . . .	64
A.1 Hoja de especificaciones del PDMS Sylgard 184. . . . .	69
A.2 Hoja de especificaciones de la fibra óptica SMF28e. . . . .	70
A.3 Hoja de especificaciones de la fibra óptica SMF28e. . . . .	71
B.1 Configuración de la plataforma MTS50-Z8 en los ejes XYZ. . . . .	72
B.2 Hoja de especificaciones de la plataforma MTS50-Z8. . . . .	73
B.3 Interrogador SM125 Micron-Optics. . . . .	74

B.4	Patron.vi : Panel frontal. . . . .	75
C.1	Diodo láser FPL1009S-1550 nm de Thorlabs. . . . .	76
C.2	Especificaciones del diodo láser FPL1009S-1550 nm de Thorlabs. . . . .	77
C.3	Controlador de diodo láser LDC-3724B. . . . .	78
C.4	Especificaciones del controlador de diodo láser LDC-3724B (1). . . . .	79
C.5	Especificaciones del controlador de diodo láser LDC-3724B (2). . . . .	80
C.6	Especificaciones del controlador de diodo láser LDC-3724B de Newport (3). . . . .	81
C.7	Especificaciones del controlador de diodo láser LDC-3724B de Newport (4). . . . .	82
C.8	Microscopio Digital Usb 2.0 Plugable. . . . .	83
C.9	Fotodetector de fibra óptica InGaAs D400FC de Thorlabs. . . . .	84
C.10	Especificaciones del fotodetector de fibra óptica InGaAs D400FC de Thorlabs. . . . .	85
C.11	USB-6000 de National Instruments. . . . .	86
C.12	Instrumento virtual utilizado para la detección de radiación. . . . .	87

# Capítulo 1

## Introducción

En los últimos años, ha habido un interés significativo en la tecnología en los Terahertz (THz), principalmente por sus aplicaciones potenciales en la detección de objetos ocultos, así como en la imagen médica para diagnósticos no invasivos. Esta región del espectro no se ha utilizado completamente debido a la falta de fuentes y detectores de THz compactos y eficientes. En consecuencia, los dispositivos activos y pasivos para la radiación de terahertz han sido objeto de intensas investigaciones [1, 2]. El desarrollo de componentes de terahertz pequeños y fáciles de operar, que incluyen fuentes, guías de onda y detectores, beneficiaría tanto la investigación como las aplicaciones fundamentales. De hecho, es necesario un mejor control y medición de la radiación de terahertz para abrir una gama de usos potenciales [3, 4].

De particular interés son las técnicas de detección de radiación de terahertz. Todos los sistemas de detección de radiación en el rango espectral de terahertz pertenecen a uno de dos grupos: sistemas de detección coherente o incoherente (también llamada detección directa). La mayoría de las técnicas existentes para la detección de terahertz requieren ópticas voluminosas o necesitan enfriamiento criogénico, y los detectores térmicos no enfriados generalmente necesitan largos tiempos de integración [5]. Recientemente, los nanomateriales a base de carbono han surgido como sistemas extraordinarios de baja dimensión con una variedad de excelentes propiedades electrónicas y fotónicas, incluidas para los dispositivos en THz [6].

Teniendo en cuenta lo anterior, la motivación de este trabajo se basa en construir un

sistema de detección directa de terahertz usando técnicas interferométricas de luz infrarroja. Haciendo uso de materiales como el PDMS, que posee un alto coeficiente térmico de expansión de volumen y el carbono, que convierte la radiación de terahertz absorbida en energía térmica, se puede hacer una mezcla que puede detectar eficientemente la radiación terahertz. Con la ayuda de la interferometría, es posible detectar el desplazamiento de la membrana compuesta por PDMS y nanopulvos de carbono.

## 1.1. Objetivos

Objetivo general: Desarrollar un sistema de detección de radiación terahertz basado en técnicas interferométricas ópticas utilizando compuestos poliméricos con carbono que presente una sensibilidad y responsividad aceptable.

Objetivos específicos:

1. Desarrollar una membrana de un espesor adecuado para detectar radiación terahertz.
2. Realizar la caracterización de las membranas compuestas por PDMS y nanopulvos de carbono.
3. Implementar un arreglo experimental para detectar el desplazamiento de la membrana generado por la radiación terahertz mediante interferometría óptica.
4. Desarrollar un instrumento virtual para leer y visualizar los resultados obtenidos.
5. Incidir radiación terahertz sobre el sistema de detección.

## 1.2. Introducción a las bandas de frecuencias terahertz

La radiación terahertz (THz) se encuentra entre sus contrapartes mejor estudiadas: microondas y radiación infrarroja en el espectro electromagnético ( $10^{11} - 10^{13}$ ) Hz, ver figura 1.1. Al ser ondas electromagnéticas, las propiedades y el comportamiento de las ondas THz se rigen por las ecuaciones de Maxwell, al igual que las otras ondas. Sin embargo,

esta parte del espectro electromagnético sigue siendo la región menos explorada, principalmente debido a las dificultades técnicas que implica la creación de fuentes y detectores de THz eficientes y compactos [7]. Para frecuencias por debajo de 100 GHz (correspondiente a una longitud de onda en el espacio libre de  $\lambda = 3$  mm), es posible encontrar componentes electrónicos, pero para las frecuencias de THz se encuentra limitada por la velocidad de saturación del electrón. Esta limitante se ve reflejada por el tamaño del dispositivo y por el tiempo que le toma a un electrón viajar a través de él [8]. Por encima de 10 THz ( $\lambda = 30\mu\text{m}$ ), las fuentes térmicas (cuerpo negro) y las cámaras térmicas pueden adquirirse con facilidad [9]. Para frecuencias menores a esta, estos dispositivos no pueden ser utilizados debido a que la energía de los fotones correspondientes a frecuencias menores a 10 THz es muy cercana al ruido térmico. Por lo tanto, en este rango de frecuencias, el transporte electrónico y los fenómenos ópticos se fusionan entre sí.

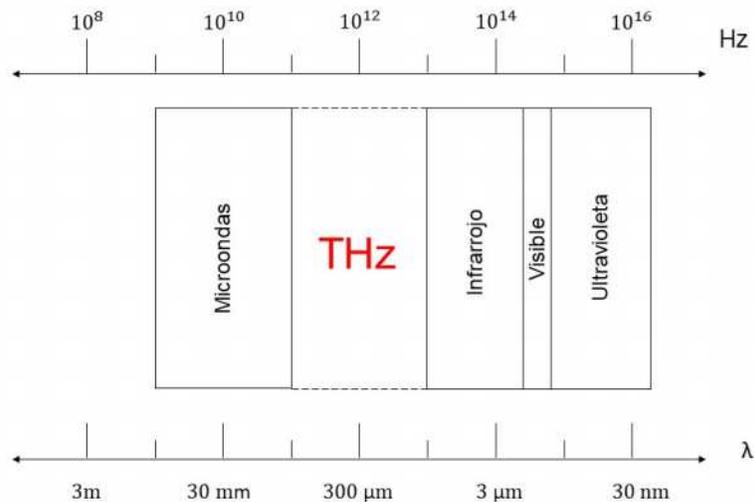


Figura 1.1: Diagrama básico del espectro electromagnético.

Con el inicio del desarrollo de los láseres de pulsos ultracortos se accedió a esta región con mayor facilidad. La radiación de THz de banda ancha fue generada por un emisor fotoconductor que fue activado por pulsos de ultra cortos del infrarrojos lejano, conocido como el interruptor Auston, en Bell Laboratories [10]. Con el transcurso de los años, las mediciones de generación y detección de radiación terahertz se realizaron con un material

dieléctrico no lineal y el cambio en el dominio del tiempo fue la primera medición con espectroscopía en el dominio del tiempo THz [11, 12].

### 1.3. Fuentes y detectores terahertz

Los avances tecnológicos en óptica y electrónica han dado como resultado muchos tipos diferentes de fuentes y detectores de THz. En esta sección, se realizarán breves descripciones de los sistemas utilizados para la generación y detección de THz, agrupados por conceptos operativos.

#### 1.3.1. Generación de terahertz

Las primeras fuentes de radiación THz que se construyeron tenían una base térmica que usaba radiación de THz emitida por objetos calentados. Dichas fuentes de base térmica tienen la desventaja de que son incoherentes. Para obtener fuentes coherentes de THz, se emplearon dos técnicas: las fuentes ópticas se modificaron hacia la región THz mediante métodos ópticos y los dispositivos de microondas se modificaron mediante técnicas electrónicas.

Existen dos maneras de generar radiación THz coherente mediante métodos ópticos. La primera es hacer incidir ondas electromagnéticas sobre un medio no lineal, con lo cual se experimenta una conversión de frecuencia no lineal. Ejemplo de ello son la rectificación óptica y la generación de frecuencia por diferencia, los cuales son procesos ópticos no lineales de segundo orden en los que se crea un fotón THz por interacción de dos fotones ópticos con un cristal no lineal. La segunda es a través de fuentes THz de estado sólido basadas en la conversión de microondas en ondas armónicas.

Se puede generar radiación THz coherente mediante dos métodos electrónicos: a través de una fotocorriente en un semiconductor o mediante electrones libre en el vacío. En el primer método la radiación THz puede generarse a partir de una antena fotoconductora polarizada excitada por rayos láser. En el segundo método un pulso láser de femtosegundos activa una fuente de electrones que se aceleran a cierta velocidad, lo cual genera radiación THz coherente.

Los primeros láseres THz que se construyeron se basaron en transiciones entre estados en gases moleculares o transiciones entre estados de impurezas en semiconductores. Los láseres de gas molecular [13] pueden alcanzar niveles de transición elevados, pero presentan la desventaja de que su frecuencia no se puede sintonizar de manera continua. Los láseres semiconductores THz, por otro lado, necesitan enfriamiento criogénico, que es costoso y complejo.

También es posible obtener radiación continua THz mediante aceleración periódica de electrones. Los osciladores de onda regresiva, de tamaño pequeño y los láseres de electrones libres, de tamaño grande, se utilizan para generar radiación THz. En ambos casos, un haz de electrones está ondulado por una estructura periódica.

## 1.4. Detección de radiación terahertz

La detección de radiación THz se clasifica de manera general como coherente o incoherente. Las técnicas de detección coherente están estrechamente asociadas con técnicas de generación en el sentido de que comparten mecanismos subyacentes y componentes comunes. A continuación se mencionan las técnicas de detección utilizadas en la detección de terahertz.

### 1.4.1. Detección coherente

Las técnicas de detección coherente están estrechamente asociadas con las técnicas de generación y posee cuatro técnicas fundamentales.

- Muestreo electro-óptico: Se caracteriza por un campo eléctrico THz que induce birrefringencia en un cristal óptico no lineal, el cual es proporcional a la amplitud del campo. Luego se utiliza un muestreo electro-óptico de espacio libre, el cual mide el campo eléctrico de los pulsos THz en el dominio del tiempo utilizando el efecto Pockels, que está estrechamente relacionado con la rectificación óptica.
- Conmutación fotoconductor: Se utiliza un campo eléctrico THz que induce una corriente en un espacio fotoconductor mientras que a su vez un pulso de una sonda

óptica inyecta fotoportadores. La corriente fotoinducida es proporcional a la amplitud del campo THz. Una antena fotoconductiva se encarga de medir los pulsos THz en el dominio del tiempo.

- Fotomezclado: Utiliza una antena fotoconductiva al igual que la conmutación fotoconductora pero para medir radiación continua THz. En este caso, la fotocorriente muestra una dependencia sinusoidal de la fase, relativa a la radiación THz.
- Detección heterodina: La detección heterodina utiliza un dispositivo no lineal llamado "mezclador". Los diodos Schottky se usan comúnmente como mezcladores. El proceso se lleva a cabo mezclando una señal THz con radiación de referencia a una frecuencia fija. El mezclador produce una señal de salida llamada "frecuencia intermedia", con lo cual la amplitud de la señal de salida es proporcional a la amplitud THz [14].

### 1.4.2. Detección incoherente

Los detectores incoherentes de uso común son sensores térmicos como bolómetros, celdas Golay y dispositivos piroeléctricos [15]. En un detector térmico, la radiación incidente se absorbe para cambiar la temperatura del material, y el cambio resultante en alguna propiedad física se usa para generar una salida eléctrica. La señal de salida no depende de la naturaleza fotónica de la radiación incidente. Por lo tanto, los efectos térmicos son generalmente independientes de la longitud de onda; la señal depende de la potencia radiante pero no de su contenido espectral. Cada tipo de detector térmico se distingue por su esquema específico utilizado para medir el aumento de temperatura. A continuación, se detalla un pequeño resumen de ellos.

- Bolómetro: El bolómetro es un elemento resistivo construido a partir de un material con una capacidad térmica muy pequeña y un gran coeficiente de temperatura para que la radiación absorbida produzca un gran cambio en la resistencia. La impedancia de los bolómetros depende mucho de la temperatura y generalmente funcionan a temperatura criogénica. Los más utilizados son los bolómetros de metal, termistor, semiconductor y el superconductor. Inicialmente, la mayoría de los bolómetros eran

del tipo termistor hechos de óxidos de manganeso, cobalto o níquel. Algunos bolómetros de semiconductores y superconductores de baja temperatura extremadamente sensibles se utilizan en la región THz.

- **Detector piroeléctrico:** El detector piroeléctrico puede considerarse como un pequeño condensador con dos electrodos montados perpendicularmente en la dirección de polarización espontánea. Al incidir la radiación, aparece un cambio en la polarización que se manifiesta como una carga en el condensador y se genera una corriente, cuya magnitud depende del aumento de temperatura y el coeficiente piroeléctrico del material. La sensibilidad del detector está limitada en cierta medida por el ruido del amplificador. Sin embargo, la velocidad de respuesta se puede diseñar haciendo que los detectores piroeléctricos sean útiles para la detección rápida de un pulso láser, trayendo consigo pérdida de la sensibilidad.
- **Termopila:** La termopila suele ser una lámina conectada térmicamente a la unión de dos metales o semiconductores distintos. El calor absorbido por la lámina provoca un aumento de la temperatura de la unión y, por lo tanto, se desarrolla una fuerza electromotriz termoeléctrica que se puede medir. Aunque las termopilas no son tan sensibles como los bolómetros y los detectores piroeléctricos, se utilizan en muchas aplicaciones debido a sus características confiables y su buena relación costo/rendimiento. Las termopilas son ampliamente utilizadas en espectroscopía.
- **Celda de Golay:** La celda de Golay consiste en un contenedor lleno de gas y diseñado de tal manera que la expansión del gas bajo calentamiento por una señal fotónica, distorsione una membrana flexible en la que se monta un espejo. Al moverse el espejo se desvía un haz que incide sobre una fotocelda y, por lo tanto, se produce un cambio en la salida (corriente) en la fotocelda. En las celdas de Golay modernas, la fotocelda se reemplaza por un fotodiodo de estado sólido y se utiliza un diodo emisor de luz para iluminar. Estos detectores presentan un tiempo de respuesta de aproximadamente de unos 15 ms.

## 1.5. Aplicaciones

La radiación terahertz se ha utilizado en muchas aplicaciones debido a las interesantes propiedades de las ondas. Las moléculas orgánicas presentan una fuerte absorción en el rango de frecuencias terahertz, lo cual da como resultado que varios materiales exhiban un sello único. También se han utilizado en las industrias biológicas [16] y farmacéutica [17] para analizar moléculas complejas.

Además del análisis de materiales, las imágenes son una de las aplicaciones prometedoras en el dominio de los terahertz. Se puede aplicar en varios campos, como el control de calidad, las pruebas de seguridad [18] y los escáneres corporales (ver figura 1.2), donde las propiedades no ionizantes de los terahertz son más seguras en comparación con los rayos X [19, 20].



Figura 1.2: Detección armas ocultas con escáner en un aeropuerto. Tomada de [18].

Otra aplicación emergente de los THz es la comunicación [21]. Las tasas de velocidad de comunicación pueden beneficiarse enormemente de la portadora de alta frecuencia. En el rango de las frecuencias terahertz, se puede lograr una alta velocidad con técnicas de modulación simples [22]. Sin embargo, la atenuación atmosférica es un factor limitante para la comunicación inalámbrica de larga distancia. Por lo tanto, se pueden utilizar en enlaces de comunicación de corta distancia para transferencias de datos de gran volumen.

Además, las imágenes de terahertz se pueden aplicar con fines médicos, como la detección de tumores (ver figura 1.3) y de cáncer de piel, donde la radiación de terahertz se absorbe de manera diferente en células sanas o cancerosas [23].

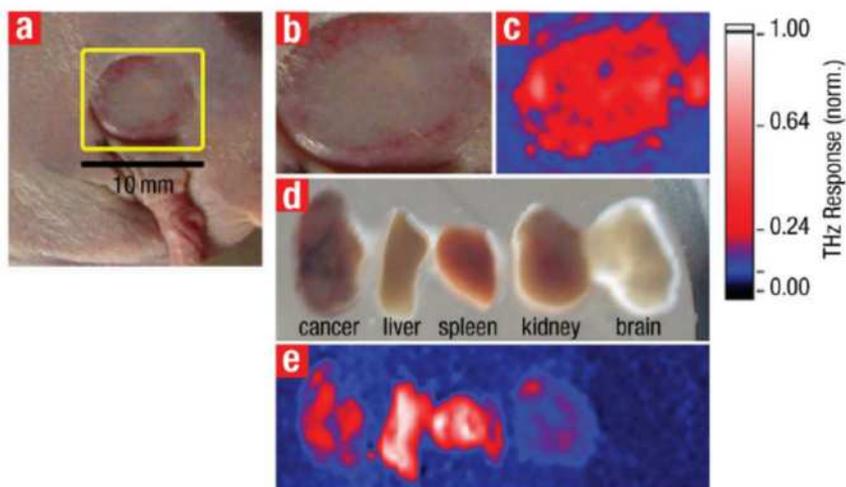


Figura 1.3: Imágenes moleculares de tumores en un ratón. Tomada de [23].

Otra aplicación muy interesante en la que se ha utilizado la radiación terahertz es en la conservación de obras de arte (ver figura 1.4). Al incidir radiación THz sobre obras de arte podemos observar las imágenes de su estructura interna, lo cual se presenta como un método no destructivo. Esta técnica se ha utilizado para encontrar la composición de capas que componen una obra de arte [24].

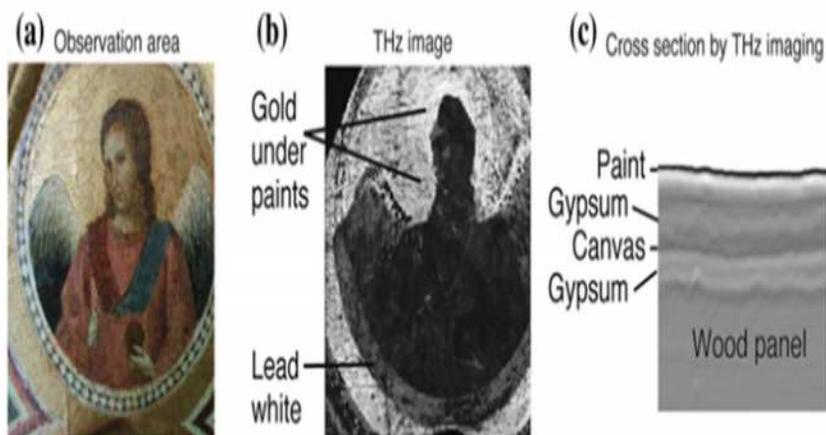


Figura 1.4: Análisis de una pintura usando radiación THz. Tomada de [24].

Con el fin de construir analizadores de materiales, sistemas de imágenes y comunicación compactos y portátiles, las tecnologías presentadas anteriormente no son factibles para una alta integración y grandes volúmenes. Los principales factores limitantes de los sistemas de terahertz existentes son su tamaño y costos de mantenimiento. De hecho, a menudo requieren ser operados a temperatura criogénica o al vacío, lo que limita su capacidad de integración y aplicación comercial.

## 1.6. Detección de radiación terahertz utilizando compuesto polimérico con carbono

En el trabajo realizado por Chen y colaboradores [25] utilizaron un compuesto de polidimetilsiloxano (PDMS) y nanotubos de carbono (*Carbon Nanotube*, CNT, por sus siglas en inglés) para detectar terahertz. En este caso al aumentar la temperatura del material compuesto debido a la absorción de radiación terahertz se produce efecto fotoacústico, el cual es la generación de ondas sonoras de alta frecuencia tras la absorción de un pulso de luz. Para lograr la detección de la radiación terahertz utilizaron un arreglo experimental conformado por un láser de Titanio-Zafiro de 500 Hz que produce pulsos con una longitud de onda de 800 nm, una lente, un cristal de borato de bario (BBO), dos espejos metálicos parabólicos, una oblea de silicio, un filtro paso bajo y el detector fotoacústico de radiación terahertz (PADTH) (ver figura 1.5).

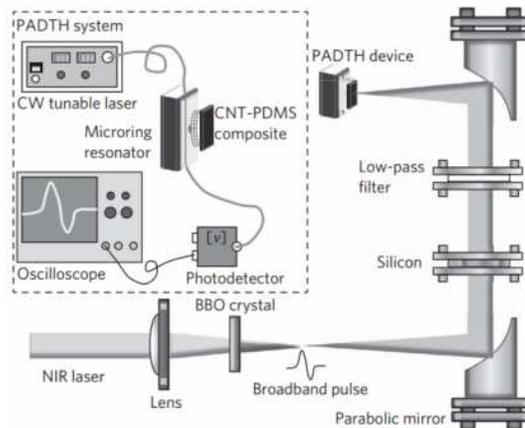


Figura 1.5: Arreglo experimental para la detección de radiación terahertz.

La radiación terahertz se genera combinando el pulso fundamental del láser y su segundo armónico, producido por el cristal BBO. El pulso de banda ancha es colimado por un espejo parabólico, y luego se utilizan una oblea de silicio y un filtro de paso bajo para seleccionar la radiación frecuencias inferiores a 6 THz, que luego son reenocadas por un segundo espejo parabólico en el dispositivo PADTH. El dispositivo consta de un compuesto (PDMS/CNT) y un resonador óptico, con gel ultrasónico en el medio para el acoplamiento del sonido. Un láser sintonizable de onda continua y un fotodetector de alta velocidad se utilizan para sondear la presión acústica en el resonador. El tiempo de respuesta del detector está esencialmente determinado por el tiempo requerido para generar una señal fotoacústica y la duración del pulso acústico detectado. Se debe recibir una forma de onda fotoacústica completa para que haya suficiente información para determinar la energía en terahertz.

En este trabajo se presenta un sistema de detección terahertz relativamente sencillo, de tamaño pequeño y de bajo costo. En la siguiente sección se explicará el diseño y construcción del material sensor a la radiación terahertz.

# Capítulo 2

## Fabricación de membranas poliméricas con carbono

En este capítulo se presenta la fabricación de las membranas poliméricas con carbono, incluyendo los materiales que se utilizaron para su realización, la metodología del proceso de fabricación y la caracterización experimental obtenida.

### 2.1. Materiales para la fabricación

#### 2.1.1. Polidimetilsiloxano (PDMS)

En los últimos años, el interés por los polímeros ha aumentado ya que pueden usarse en muchas aplicaciones diferentes. Las cualidades que lo hacen útiles son sus propiedades elastoméricas, facilidad de unión entre sí y al vidrio, facilidad de moldeo y buenas propiedades mecánicas. Un caso que cumple dichas propiedades y además adecuado para aplicaciones en la Fotónica, es el polidimetilsiloxano (PDMS). El PDMS [26] es un polímero mineral-orgánico, el cual, es conocido y utilizado en el campo de la óptica debido a sus excelentes propiedades ópticas como transparencia y bajo esparcimiento. Además de esas propiedades, es un material de bajo costo, inerte, no tóxico y no inflamable [27]. Todas esas cualidades lo hacen un material seguro para su uso en el laboratorio.

El PDMS utilizado en el experimento es el Sylgard 184, el cual está suministrado en dos

## CAPÍTULO 2. FABRICACIÓN DE MEMBRANAS POLIMÉRICAS CON CARBONO13

partes: un líquido que es PDMS base y el otro que es el agente curante, como se muestra en la figura 2.1. Para conocer más detalle ver el Apéndice A.

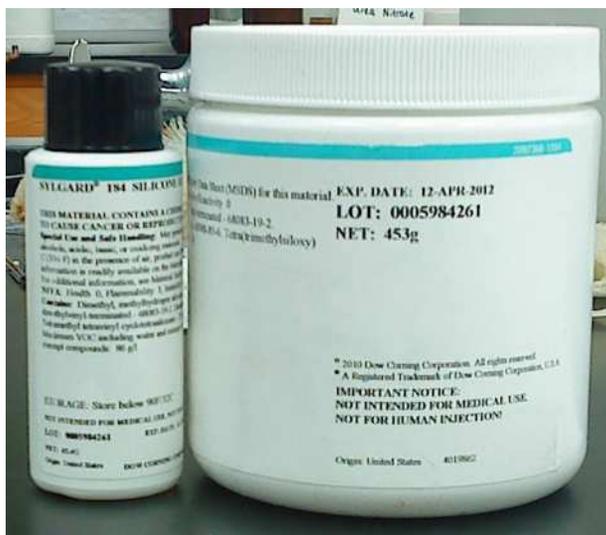


Figura 2.1: Polidimetilsiloxano (PDMS) Sylgard 184: base polimérica y agente curante.

### 2.1.2. Nanopolvos de carbono

Los nanopolvos de carbono o (*carbon nanopowder*) (CNP, por sus siglas en inglés) son un material nanoestructurado con un tamaño menor a los 100 nm, ampliamente utilizado como un nanomaterial de bajo costo en diversas aplicaciones tecnológicas. Posee buenas propiedades como una alta conductividad térmica y eléctrica hacen que los CNP sean efectivos en muchos procesos fotónicos. Este material ha sido explorado ampliamente como adsorbente [28, 29], mostrando su buen desempeño en esta función. Los nanopolvos han encontrado aplicación en diversos campos de la ciencia y la tecnología, como almacenamiento y conversión de energía, sensores, suministro de medicamentos, dispositivos de emisión de campo y componentes electrónicos a nanoescala [30]. Además han sido utilizados para la generación y detección de radiación terahertz [31, 32].

El uso de nanopolvos en lugar de partículas con geometrías definidas permite minimizar cualquier efecto óptico y/o térmico atribuible a la geometría de partículas. Además, se prefirieron materiales con alta disponibilidad comercial para obtener materiales de bajo costo para fabricar las membranas.

## 2.2. Metodología de fabricación de las membranas

Las membranas compuestas por PDMS/CNP se fabricaron utilizando PDMS Sylgard 184 de Dow Corning y nanopulvos de carbono (tamaño de partícula  $<100$  nm, Sigma Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU., CAS: 633100). Para mezclar ambos componentes se utilizó un dispositivo de dispersión (agitadora magnética). Luego se le adicionó cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ) durante el proceso de mezcla, con el objetivo de reducir la viscosidad del PDMS, con lo cual se produce una solución acuosa homogénea. Bajo esta condición, los CNP se incorporan fácilmente a la matriz polimérica.

En la realización de las membranas se utilizaron tres diferentes concentraciones de nanopulvos de carbono, 1%, 3% y 5%. Se escogieron estas concentraciones de manera empírica para ver cuál se ajustaría mejor a las necesidades del trabajo. Para conocer la cantidad exacta de CNP a depositar sobre el vaso de precipitados de vidrio, se utilizó la fórmula 2.1

$$(CNP)_g = (PDMS)_g \times \frac{c(CNP)\%}{c(PDMS)\%} \quad (2.1)$$

Donde:

- $(CNP)_g$ : Es el peso del CNP en gramos
- $(PDMS)_g$ : Es el peso del PDMS en gramos
- $c(CNP)\%$ : Es la concentración de CNP expresada en por ciento
- $c(PDMS)\%$ : Es la concentración de PDMS expresada en por ciento

El proceso de fabricación que se utilizó en esta tesis se basó en trabajo reportado previamente por Pimentel-Domínguez y colaboradores [33] con respecto a la metodología de fabricación y valores numéricos utilizados mostrando resultados satisfactorios para otro tipo de aplicaciones. El proceso se ilustra en la figura 2.2 e implica los siguientes pasos:

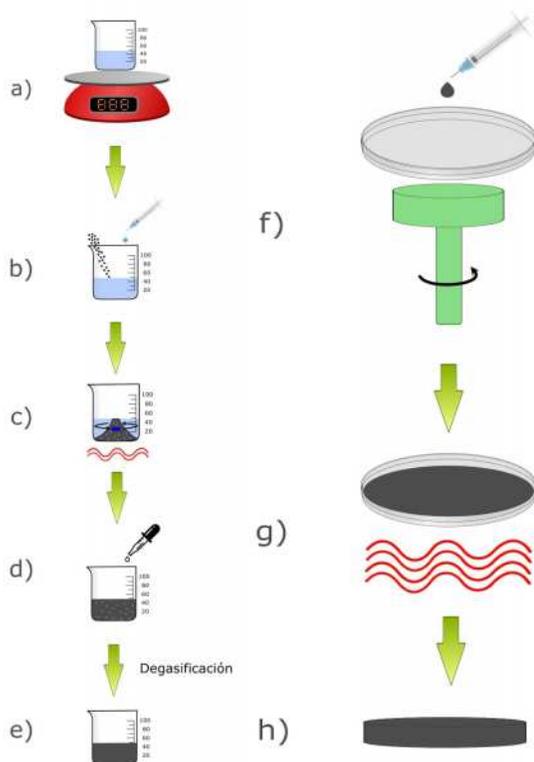


Figura 2.2: Metodología de fabricación de las membranas PDMS/CNP. (a) Pesaje del PDMS dentro de un vaso de precipitados de vidrio, (b) Adición de los CNP y  $(CHCl_3)$ , (c) Mezclando el PDMS con los CNP y evaporación del  $(CHCl_3)$  (líneas rojas), (d) Adición del agente curante, (e) Degasificación de la mezcla, (f) La mezcla es colocada sobre una caja de Petri y girada por centrifugación, (g) Proceso de curado por calor (líneas rojas) a  $70\text{ }^\circ\text{C}$  para su solidificación, (h) Desmontando la membrana de PDMS/CNP

1. El material base requerido del elastómero (PDMS) se pesa dentro de un vaso de precipitados de vidrio.
2. Los CNP se agregan (según sea el caso) en una concentración de 1%, 3% ó 5% en peso en comparación con la cantidad total de PDMS. Los nanopolvos simplemente se vierten en el vaso de precipitados; luego se agrega cloroformo en una proporción de 1 mL por gramo de PDMS [33] para obtener la mezcla final.
3. Los materiales se mezclan para distribuir uniformemente el nanopolvo de carbono en el PDMS. Se produce una solución líquida debido a la adición de cloroformo; se utiliza una barra magnética para un correcto mezclado activada por una agitadora

magnética. La misma posee una placa caliente, a la cual se le programa una temperatura de 80 °C [33] hasta la evaporación completa del ( $\text{CHCl}_3$ ) después de cuatro horas.

4. El agente curante se agrega con una relación de 1:10 en comparación con el material base y ambas partes se mezclan a mano durante cuatro minutos.
5. El aire capturado durante el proceso de mezcla se elimina mediante un proceso de desgasificación. Para ello se utiliza una bomba de vacío.
6. La mezcla de PDMS/CNP se vierte sobre una caja de Petri de poliestireno. Sólo se deposita una cantidad de volumen igual en el centro de la caja de Petri con la ayuda de una jeringa, y con esto asegurar la misma cantidad de mezcla para todas las muestras a realizar. La caja de Petri es colocada sobre un centrifugador (spin coater, en inglés) con el cual se le dará el espesor adecuado en dependencia de la velocidad centrífuga programada por el usuario.
7. La solidificación de la mezcla se logra al calentar a 70 °C durante 24 horas .
8. Después de enfriar a temperatura ambiente, la membrana resultante finalmente se retira del molde.

### 2.2.1. Recubrimiento por rotación

La técnica de recubrimiento por rotación o spin coating (en inglés) es un procedimiento utilizado para depositar películas delgadas uniformes sobre sustratos planos. Por lo general, se aplica una pequeña cantidad de material en el centro del sustrato, que se encuentra en reposo. Luego, el sustrato se gira a cierta velocidad para extender el material de recubrimiento por fuerza centrífuga. La rotación continúa hasta alcanzar el grosor deseado de la película. Cuanto mayor sea la velocidad angular de giro, más delgada será la película. El grosor de la película también depende de la viscosidad y concentración de la mezcla.

En este trabajo se utiliza esta técnica porque se desea obtener membranas de espesores delgados. Para conseguir un espesor fino se realizó una curva de velocidad de consta de

tres etapas. La primera etapa se le llamó aceleración, la segunda etapa se le llamó meseta y la última desaceleración como se observa en la figura 2.3

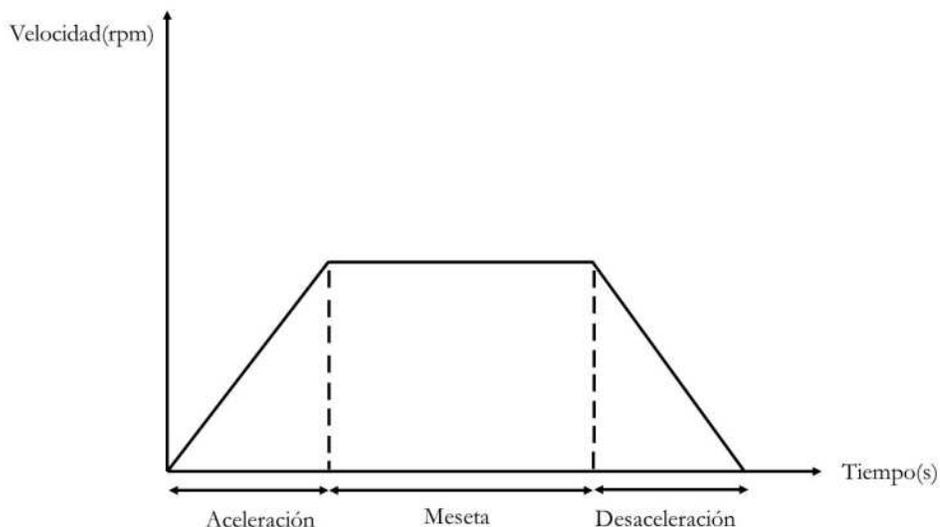


Figura 2.3: Curva de velocidad realizada en el recubrimiento por rotación

El tiempo de meseta se fijó de quince segundos para todas las velocidades y la aceleración también se mantuvo fija para todas las velocidades. Los tiempos de aceleración y desaceleración son los mismos para una misma velocidad. Para diferentes velocidades estos tiempos difieren como se puede ver en la tabla 2.2

Velocidad (rpm)	Tiempo de Aceleración/Desaceleración (s)
500	1.3
1000	2.5
1500	3.6
2000	4.9
2500	6.0
3000	7.2

Tabla 2.1: Parámetros para el proceso de recubrimiento por rotación.

### 2.3. Caracterización de las membranas PDMS/CNP

Tras el proceso de fabricación de las membranas es necesario caracterizar el resultado final. Primeramente se analiza la homogeneidad de las mismas en cuanto a su espesor

## CAPÍTULO 2. FABRICACIÓN DE MEMBRANAS POLIMÉRICAS CON CARBONO18

tras las técnica de recubrimiento por rotación. Para ello se utilizó de un microscopio para observar los espesores de la misma. Las membranas fueron apoyadas sobre una base para poder observar mejor el espesor. Además se realizó un programa en el software Matlab para medir los espesores de las membranas.



Figura 2.4: Esquema representativo de la medición de los espesores de las membranas usando el microscopio.

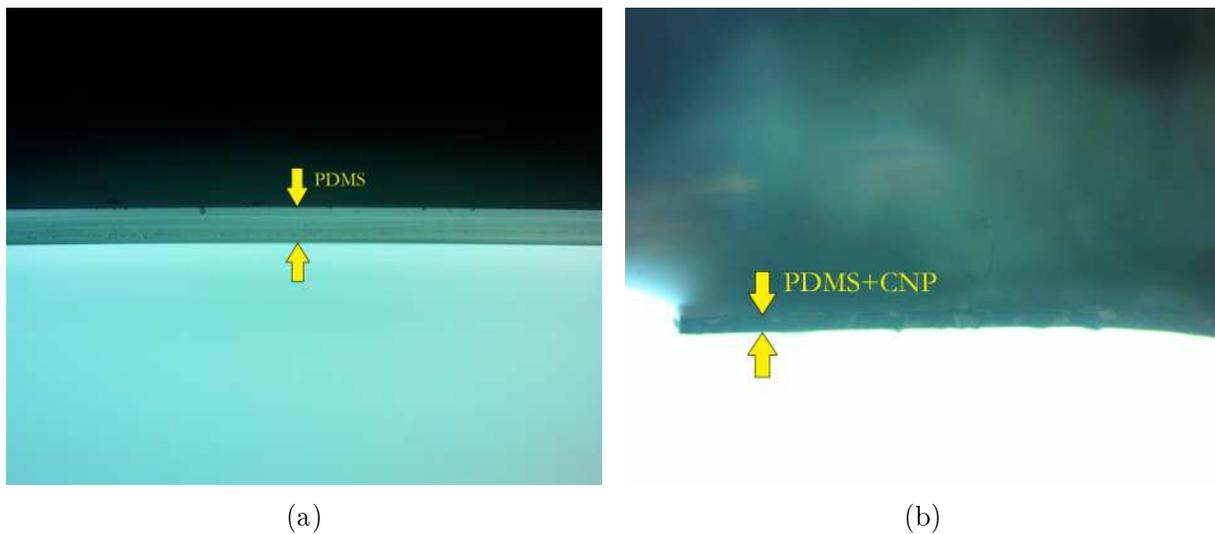


Figura 2.5: a) Imagen real de una membrana de PDMS vista por el microscopio b) Imagen real de una membrana de PDMS+CNP vista por el microscopio.

En un principio se realizaron membranas de PDMS puro siguiendo la metodología de fabricación presentada anteriormente. Sin embargo, en el proceso de fabricación no se

adicionó ni CNP ni  $\text{CHCl}_3$ . Esto se hizo con la finalidad de calibrar el recubrimiento por rotación, así como, tener una idea de características como espesor y adherencia de las membranas al sustrato. Se tomaron 3 muestras para caracterizar la membrana en cuanto a homogeneidad a lo largo de la película como se muestra en la figura 2.6.

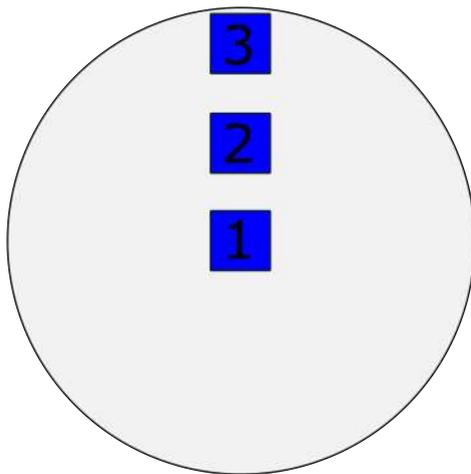


Figura 2.6: Esquema de muestras tomadas para análisis de homogeneidad

Estas muestras se tomaron de forma vertical para analizar el perfil de la membrana. Las muestras se retiraron con una navaja y se retiró suavemente del sustrato. A continuación se muestran unas gráficas de homogeneidad de las membranas de PDMS puro. Se realizaron tres membranas por cada velocidad, para obtener información estadística, unas dieciocho en total. En las gráficas se puede ver que hay pequeñas variaciones de espesor para cada velocidad. Esto quizás se deba a que el depósito de la gota de mezcla sobre el sustrato se hace de forma manual con una jeringa. Aunque se trata de que siempre salga la misma cantidad de volumen de mezcla, lo podemos considerar como un error sistemático.

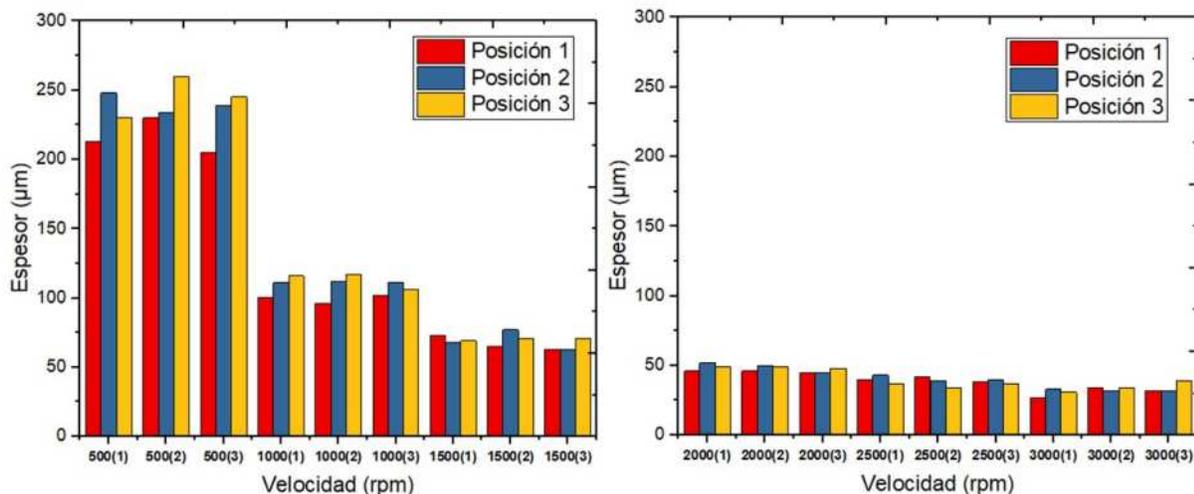


Figura 2.7: Homogeneidad en los espesores de las membranas de PDMS

Luego para cada membrana obtenida se le realizó un promedio de las tres muestras recogidas en sus diferentes posiciones y para cada velocidad el promedio de las tres membranas. Todo esto con la finalidad de trazar una curva característica de velocidad vs espesor. Con el ajuste matemático se puede aproximar el espesor para cualquier velocidad. Esto se puede ver expresado en la ecuación 2.2 que es una función exponencial decreciente.

$$E = 68871.49 \times e^{-\left(\frac{v}{68.9}\right)} + 309.64 \times e^{-\left(\frac{v}{738.7}\right)} + 27.68 \quad (2.2)$$

Donde:

- E: Es el espesor en  $\mu\text{m}$
- v: Es la velocidad en rpm

La curva característica se puede observar en la figura 2.8 con sus respectivas barras de error. Nótese que se alcanzaron a realizar membranas de alrededor de  $30\mu\text{m}$  para la mayor velocidad.

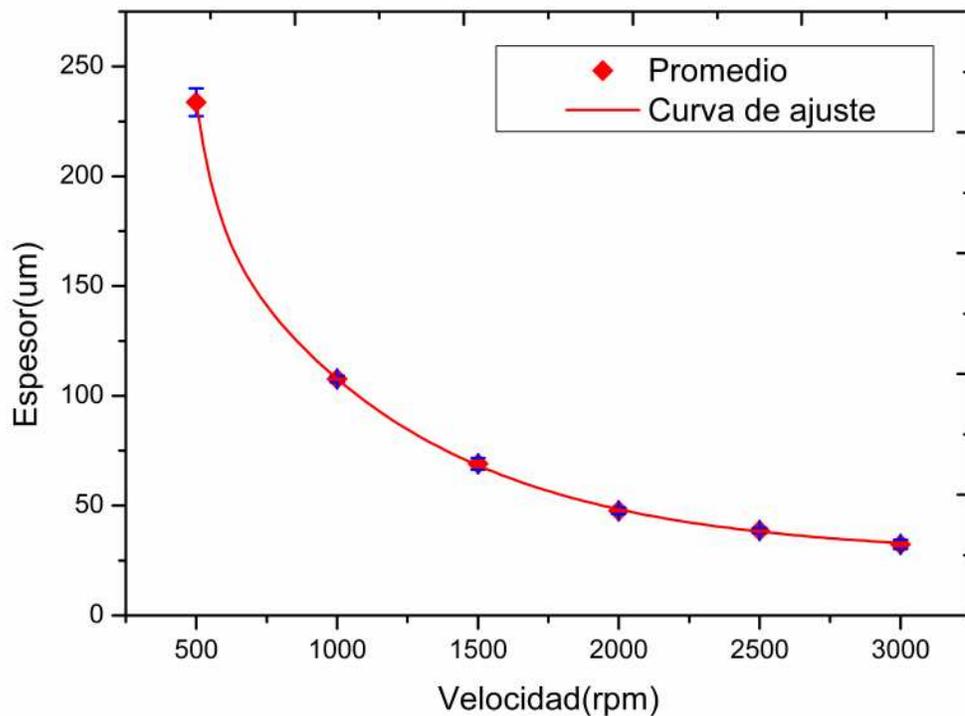


Figura 2.8: Promedio y desviaciones de las membranas de PDMS puro.

### 2.3.1. Caracterización de las membranas con concentración de 3 % de nanopulvos de carbono

Como se explicará con más detalle en las siguientes secciones, se realizó una comparación con respecto a las membranas con diferentes concentraciones de CNP utilizadas en este trabajo y la membrana de PDMS con una concentración de 3 % de CNP es la que presenta las mejores características. La misma presenta buena absorción ante incidencia de luz visible y posee una reflectancia aceptable para formar una cavidad Fabry-Perot y obtener buenos resultados de interferencia. Es por esto que se decide realizar la caracterización con respecto al espesor obtenido para esta concentración. Al igual que para el caso anterior de membranas de PDMS puro, las muestras para el análisis de homogeneidad se toman en una posición vertical (ver figura 2.6) y utilizando los mismos procedimientos descritos previamente. Se realizaron tres membranas para cada velocidad de rotación y los resultados se pueden ver en la figura 2.9.

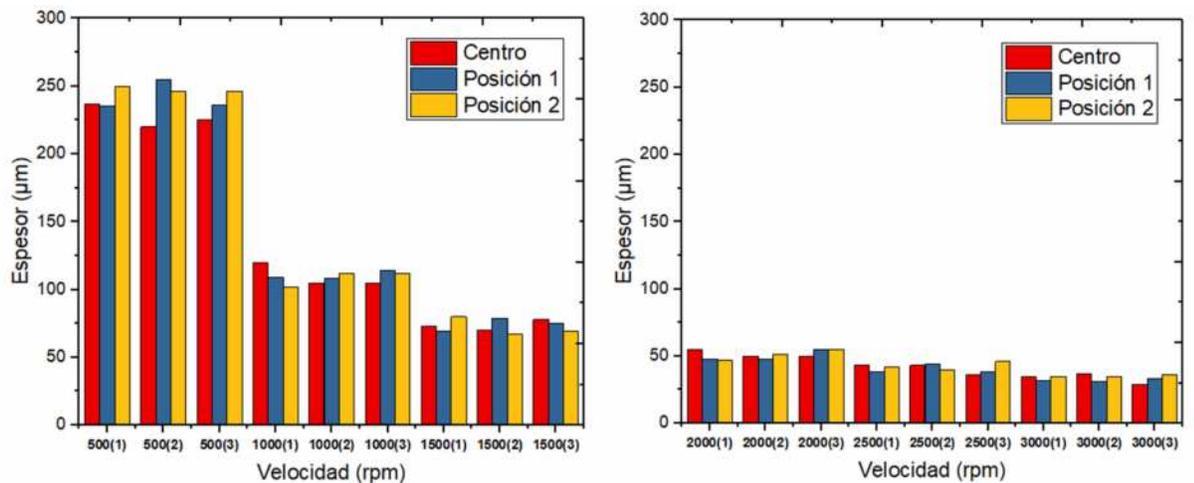


Figura 2.9: Homogeneidad en los espesores de las membranas de PDMS+ CNP-3 %

Como se puede ver en la figura 2.9 para cada velocidad hay una pequeña variación en el espesor debido a que el proceso de deposición de la gota de mezcla se realiza manualmente. Teniendo estos datos podemos trazar una curva de velocidad de rotación contra espesor, la cual se puede observar en la figura 2.10.

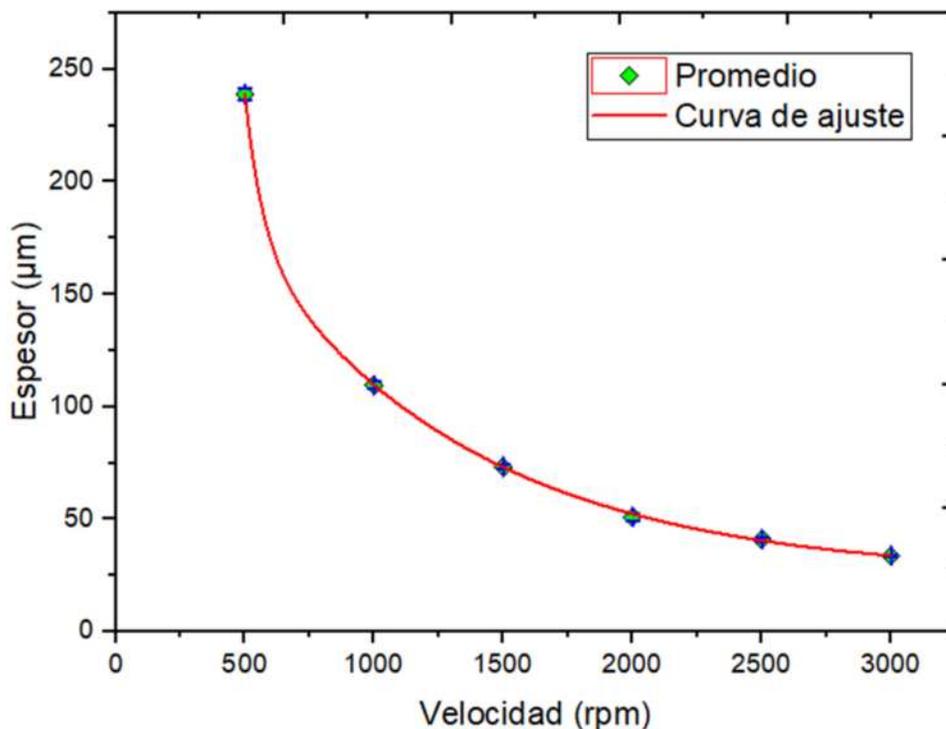


Figura 2.10: Promedio y desviaciones de las membranas de de PDMS + CNP-3 %

Como se puede observar en la figura 2.10 a medida que aumenta la velocidad disminuye el espesor de las membranas. Las variaciones de espesores de las membranas con 3 % de concentración de CNP no difieren mucho con respecto a las membranas con PDMS. En la siguiente tabla podemos ver una comparación entre ellas.

Velocidad (rpm)	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
	PDMS	PDMS+CNP-3 %
500	234	239
1000	108	110
1500	69	73
2000	48	51
2500	39	41
3000	30	34

Tabla 2.2: Comparación entre membranas con diferentes concentraciones.

### 2.3.2. Absorción de las membranas PDMS/CNP

Como se presentó anteriormente las características de las membranas producidas son producto de los parámetros de rotación y características del fluido. Se procedió a realizar varias membranas de las concentraciones de nanopulvos experimentales que son de 1 % CNP, 3 % CNP y 5 % CNP añadidas junto al PDMS. En un principio solo se fabricaron membranas de menor espesor que corresponde a la velocidad de 3000 rpm. Se obtuvieron 3 membranas para esa velocidad por cada concentración, unas nueve en total. Se realizó de esta manera para observar el comportamiento de la absorción de las membranas producidas. Para medir los espesores de las membranas se utilizó un microscopio y con la ayuda de un programa en Matlab se obtuvieron los resultados. La fuente de luz usada fue un láser de longitud de onda de 633 nm. En un inicio se escogió esta fuente de luz para ver qué tanta incidencia de luz podían absorber dichas membranas.

Se recortaron pequeñas muestras de cada concentración y se ubicaron en una pieza diseñada para tal objetivo. La pieza (a) donde fue colocada la membrana y el arreglo experimental (b) realizado lo pueden observar en la figura 2.11.

El arreglo experimental consiste en un láser de helio-neón de  $\lambda = 633\text{nm}$ , un soporte

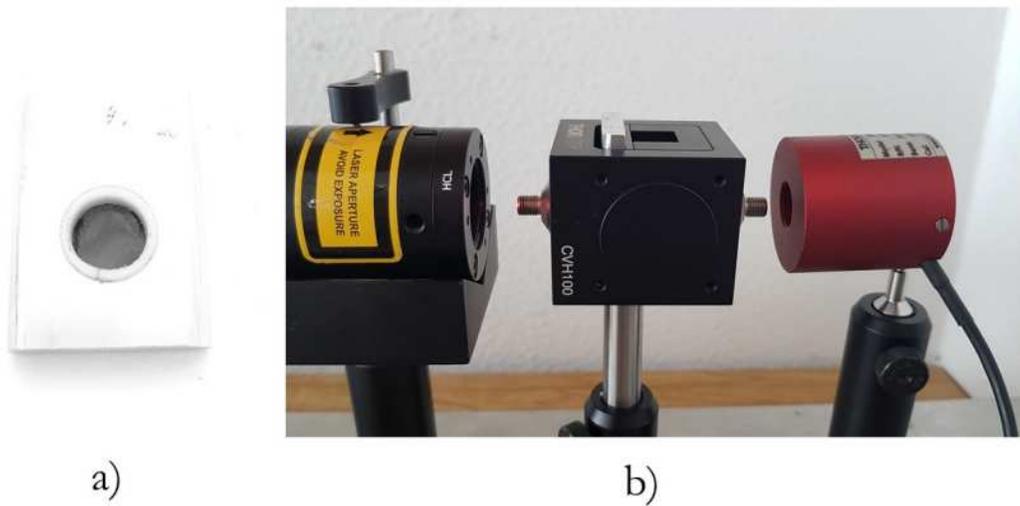


Figura 2.11: Arreglo experimental de análisis de absorción de las membranas de PDMS/CNP

para cubetas CVH100 de Thorlabs, un detector óptico S302C de Thorlabs y un medidor de potencia PM100D de Thorlabs. La membrana se coloca justo entre el láser y el detector. Una vez medida la intensidad antes y después la membrana es posible conocer su absorbancia con la ayuda de la fórmula enunciada en la ley de Beer-Lambert

$$I = I_0 e^{-A} = I_0 e^{-\alpha L} \quad (2.3)$$

Donde:

- $I$ : Es la intensidad de salida en  $\frac{W}{m^2}$
- $I_0$ : Es la intensidad de salida en  $\frac{W}{m^2}$
- $A$ : Es la absorbancia
- $\alpha$ : Es el coeficiente de absorción
- $L$ : Es la longitud atravesada por la luz en metros

Se realizó la medición de absorbancia para tres membranas de diferente concentración de nanopulvos de carbono. Para la membrana de 1% CNP y con un espesor de  $30\mu m$  se

obtuvo una absorbancia de 1.33. En el caso de la membrana de 3 % CNP y con un espesor de  $34\mu\text{m}$  se obtuvo una absorbancia de 3.32. Para la última de 5 % CNP y con un espesor de  $37\mu\text{m}$  se obtuvo una absorbancia de 3.65. Estos datos se pueden ver reflejados en la siguiente gráfica 2.12

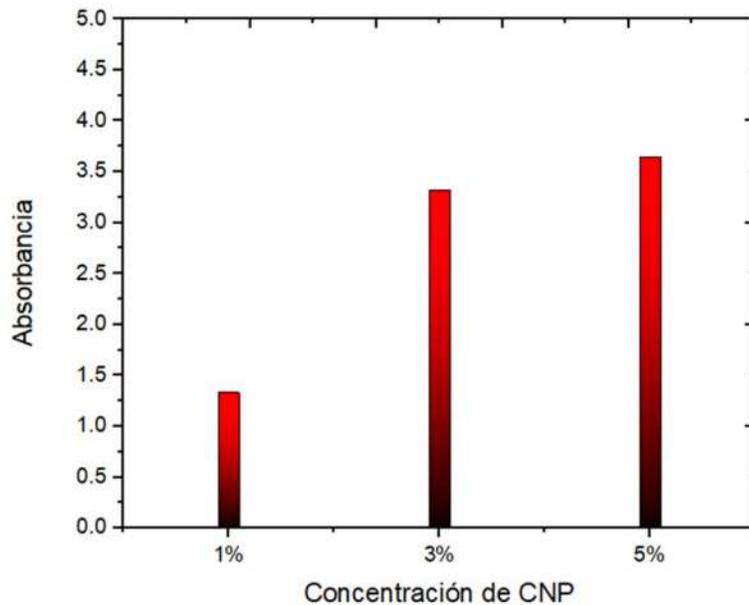


Figura 2.12: Absorbancia de las membranas de PDMS/CNP en diferentes concentraciones

Como se puede observar en la figura se puede evidenciar que a medida que aumenta la concentración de CNP en las membranas aumenta la absorbancia de las mismas. En nuestro trabajo se pretende trabajar con una membrana que presente buena absorción. Posteriormente, se explicará por qué se decidió utilizar la membrana con 3 % de concentración de CNP. Una vez realizadas las membranas poliméricas con carbono, es necesario diseñar un arreglo experimental, el cual sea capaz de brindar información de la parte sensora. En la próxima sección se describe el sistema de detección implementado para coleccionar la radiación terahertz.

# Capítulo 3

## Interferómetro Fabry-Perot en fibra óptica

En este capítulo se presenta el diseño de un interferómetro Fabry-Perot en fibra óptica, así como su principio de funcionamiento. Además se muestra el arreglo experimental que se utilizó para coleccionar la radiación terahertz y los resultados obtenidos experimentalmente.

### 3.1. Sensores interferométricos de fibra óptica

Un sensor interferométrico de fibra óptica utiliza la propia fibra como elemento sensible. La influencia de la magnitud de medida sobre la fibra óptica modula la luz que se propaga a través de ella cambiando alguno de sus parámetros: amplitud, fase o estado de polarización. Al igual que los interferómetros clásicos de gran volumen, los interferómetros de fibra óptica siguen muchos principios físicos elementales.

Para el creciente desarrollo de la tecnología de los interferómetros de fibra óptica, tres factores han sido fundamentales para el mismo. Primeramente, la invención del láser proporcionó una fuente de luz de alta intensidad con excelentes propiedades de coherencia espacial y temporal [34]. En segundo lugar, los avances en la industria de la optoelectrónica facilitaron el desarrollo de detectores ópticos para realizar sofisticadas técnicas de detección de bajo nivel de ruido [35]. Finalmente, el desarrollo de fibras monomodo (*Single Mode Fiber*) (SMF, por sus siglas en inglés) de baja pérdida hicieron posible confinar la luz en

una guía de onda de fibra óptica flexible y lograr realizar interferómetros de fibra óptica compactos, robustos y de bajo costo [36]. Una de las ventajas más importantes del uso de los interferómetros de fibra óptica son su rápida respuesta y su inmunidad a la interferencia electromagnética.

El mecanismo de transducción básico utilizado en muchos sensores de fibras ópticas, es la modulación de fase de luz coherente, que se propaga a través de una fibra óptica monomodal. Las técnicas de interferometría óptica pueden ser usadas para detectar esos corrimientos de fase en las ondas de luz. Estas técnicas permiten una sensibilidad alta que es obtenible por medio de los diversos tipos de sensores interferométricos de fibras ópticas.

### 3.1.1. Aplicaciones

Los avances en la tecnología de interferometría de fibra óptica pueden atribuirse a la utilización de este fenómeno para una amplia gama de aplicaciones comerciales e industriales, incluidos los sensores de tensión para el monitoreo estructural, imágenes médicas, medición de distancia, entre otras [37]. Los interferómetros de fibra óptica tienen múltiples aplicaciones en la ciencia y la tecnología gracias a su precisión y su alta sensibilidad. Éstos se pueden emplear para diseñar componentes ópticos para el procesamiento de señales en línea como filtros pasa banda en redes de comunicación óptica. También se pueden utilizar para detectar las propiedades lineales y no lineales en las fibras ópticas.

Los interferómetros de fibra óptica se han convertido en los dispositivos adecuados para aplicaciones novedosas como monitoreo de tuberías de petróleo y gas, medición de distribución de temperatura en la profundidad del océano y sensores de intrusión [38]. También se han utilizado para realizar mediciones de voltaje y corriente dentro de sistemas de energía eléctrica y la monitorización de presión biomédica en cuerpos vivos. Otras de las variables físicas que se han medido con estos dispositivos han sido tensión, temperatura, índice de refracción, coeficientes de expansión térmica, humedad, etc.

## 3.2. Sensores interferométricos Fabry-Perot en fibra óptica

Un interferómetro Fabry-Perot en fibra óptica (*Fabry-Perot Interferometer*)(FPI, por sus siglas en inglés) es sencillo, desde que fue demostrado a inicios del año 1980 [39], una gran variedad de estructuras diferentes y con distintos grados de complejidad se han observado. Después de esto, debido a las múltiples ventajas encontradas a los FPI, como la inmunidad a la interferencia electromagnética, la capacidad de responder a una amplia variedad de parámetros, muy alta resolución, alta precisión y tamaño pequeño [40], se convirtió en un transductor ideal para muchas aplicaciones de detección. Los FPI han demostrado ser útiles para las mediciones de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos.

La estructura FPI más simple se puede construir con solo una fibra óptica cortada separada a una distancia  $L$  de un objetivo reflector plano. Cuando se hace con la misma fibra o la fibra se ha modificado para crear una cavidad interna, se llama FPI intrínseco (IFPI). Cuando la cavidad tiene aire o un material diferente de la fibra, entonces se llama FPI extrínseco (EFPI). Independientemente de su proceso de fabricación de cavidades o composición del material, comparten el mismo principio operativo, incluso si se usan en la transmisión o reflexión. En este trabajo se trabajará con un EFPI formado por el final de una fibra óptica monomodal cortada y una superficie reflectante externa: la membrana compuesta de PDMS/CNP.

La luz ingresa al interferómetro por la fibra óptica por el lado izquierdo y en la parte cortada la luz incidente se refleja  $I_R$ . El resto de la luz entra a la cavidad y viaja a lo largo de ella hasta que se refleja en la superficie reflectora. Una parte de la luz que viaja a lo largo de la cavidad se vuelve a acoplar al núcleo de la fibra óptica  $I_T$  interfiriendo con el haz  $I_R$  anterior. La cantidad de luz reflejada en cada superficie depende de coeficiente de reflexión de las superficies ( $R_1$  y  $R_2$ ). La diferencia de longitud del camino óptico entre ambos haces se define como  $OP = 2nL$ , donde  $n$  es el índice de refracción del material en la cavidad y  $L$  longitud de la cavidad del interferómetro. La ecuación de interferencia de dos haces a continuación describe este fenómeno, descuidando el efecto de resonancia

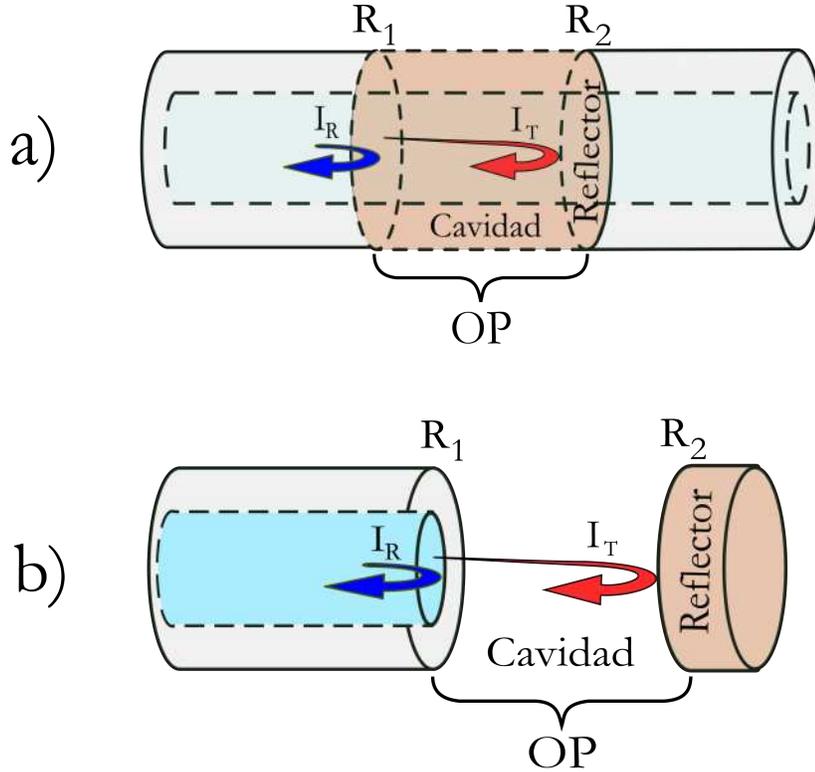


Figura 3.1: Tipos de interferómetros Fabry-Perot de fibra debido a su fabricación. (a) IFPI, (b) EFPI. La diferencia de longitud del camino óptico entre haces proporciona información para las aplicaciones de detección.  $R_1$  y  $R_2$  son las superficies reflectantes que limitan la cavidad del interferómetro,  $OP$  es la diferencia de trayectoria óptica entre los haces  $I_T$  e  $I_R$ .

debido a la baja reflectancia de las superficies  $R_1$  y  $R_2$  de la figura 3.1, [41]

$$I = I_R + I_T + 2\sqrt{(I_R I_T)} \times \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda} + \phi_0\right) \quad (3.1)$$

Donde  $I$  representa la intensidad de la interferencia entre los haces  $I_R$  e  $I_T$ .  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz y  $\phi_0$  representa la diferencia de fase inicial entre haces de luz. El espectro óptico resultante muestra una señal modulada que depende de los parámetros físicos de la cavidad del interferómetro, como el índice de refracción, la longitud, la reflectividad de los espejos y las características espectrales de la fuente de luz.

El interferómetro Fabry-Perot de fibra es confiable, compacto, estable y extremadamente sensible a las perturbaciones externas que afectan la longitud y el índice de refracción ( $n$ ) de la cavidad Fabry-Perot. Además, su interrogación es relativamente simple y tiene

una rápida respuesta. Esto permite el desarrollo de sensores de alta resolución y versátiles en tiempo real. Algunos de los parámetros que se han medido exitosamente con los FPI son temperatura, esfuerzo, índice de refracción, y algunos otras variables como humedad, etc.

### 3.3. Materiales para la fabricación

Para la realización del interferómetro Fabry-Perot presentado en este trabajo se utilizó una fibra óptica monomodal como la primera superficie reflectante ( $R_1$ ) y la membrana compuesta de PDMS/CNP como la segunda superficie reflectante ( $R_2$ ). Primeramente, se escoge una fibra óptica monomodo ya que solamente se propaga un único modo, el modo fundamental. Por lo tanto, en el interferograma solo se verá el resultado de la interferencia del modo reflejado y transmitido, evitando así un análisis más exhaustivo. Para su propósito, se utilizó la fibra óptica comercial SMF28e de la marca Corning (ver Apéndice A para más información). La membrana producida y explicada su fabricación previamente actuará como reflector. La cavidad está formada por ambos y en su interior estará el aire con un índice de refracción  $n=1$ .

### 3.4. Primer arreglo experimental

En el desarrollo de este trabajo se presentarán dos arreglos experimentales, de características similares. Para la implementación de un interferómetro Fabry-Perot de fibra óptica se requiere que el arreglo experimental sea de fácil manipulación de sus componentes. Además, debe permitir que la comunicación sea correcta entre los equipos de medición y los dispositivos ópticos, así como, una repetibilidad de los resultados obtenidos. Por estos motivos, se diseñó un primer arreglo experimental que cumplieran con dichos requisitos y que fuera un primer punto de partida para el análisis de detección de radiación terahertz. El arreglo experimental consta de los siguientes elementos, como se puede ver en la figura 3.2. En el apéndice B podemos encontrar más detalles sobre el equipo utilizado y los elementos de la figura.

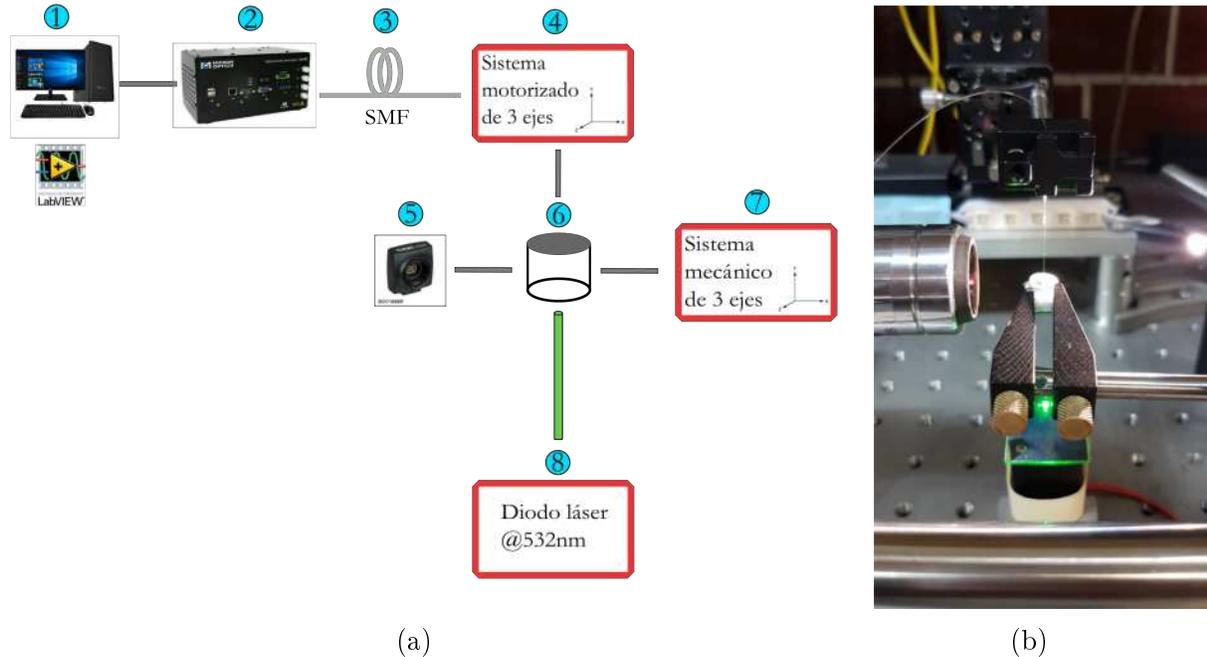


Figura 3.2: a) Diagrama de bloques del arreglo experimental, b) Fotografía del arreglo experimental.

1. Equipo de cómputo donde se desarrolló el instrumento virtual (*VI*, por sus siglas en inglés) para visualizar el interferograma obtenido.
2. Equipo de medición de señales ópticas *Interrogador SM 125*, capaz de iluminar luz de  $\lambda = 1550$  nm y coleccionar el espectro reflejado en la cavidad Fabry-Perot.
3. Fibra óptica monomodo SMF28e de Corning.
4. Sistema mecánico motorizado *MTS50-Z8* con movimientos en los tres ejes ( $x, y, z$ ) con precisión de sus movimientos del orden del tamaño del revestimiento de las fibras ópticas ( $125 \mu\text{m}$ ). Adicionalmente se utilizaron piezas adicionales para sujetar la fibra óptica y una mesa óptica para evitar que las vibraciones externas afectaran el experimento.
5. Sistema de visualización (cámara *Thorlabs DCC1545M*) para observar cuando la fibra óptica hace contacto con la membrana. Además se incorpora un sistema de iluminación para ver sobre la superficie de la membrana.

6. Pieza donde es colocada la membrana de PDMS+CNP.
7. Sistema mecánico de movimiento en los tres ejes (platina) para posicionar la pieza con la membrana justo debajo de la fibra óptica para que incida perpendicularmente. Se utilizaron piezas adicionales para agarrar la pieza.
8. Sistema de perturbación, el cual tiene como objetivo irradiar la membrana simulando radiación terahertz. Se utiliza un diodo láser de luz verde a 532 nm.

La pieza donde es colocada la membrana tiene ciertas características que la identifican. Se diseñó una pieza con un diámetro exterior de 5 mm y 3mm de diámetro interior, donde se deposita la membrana y es tensada con la ayuda de un anillo. Se requiere que la membrana quede tensada de manera uniforme ya que es una de las superficies reflectantes de la cavidad. La pieza tiene de profundidad 5 mm y en el fondo se realizó un corte oblicuo para evitar las posibles reflexiones que podrían generarse, ya que sería una tercera superficie reflectante. En dicho fondo se coloca un pedazo de cobre-objetos, el cual crea un cámara cerrada donde está atrapado el aire.

Para agarrar la pieza se deja un pequeño mango de 10 mm que se encuentra unido a la parte circular (ver figura 3.3). Cuando el haz de luz láser incide sobre la parte inferior de la pieza, se transmite por el cobre-objetos, calienta el aire atrapado y se produce absorción en la membrana. La membrana manifiesta expansión térmica debido a la energía absorbida y el calor atrapado en la cámara, con lo cual ocurre un desplazamiento de la misma. Este pequeño desplazamiento puede ser observado debido a la cavidad Fabry-Perot que forma la parte final de la fibra óptica y la membrana. El patrón de interferencia provocado, puede ser analizado con la ayuda de un interrogador óptico y observado a través de un programa realizado en Labview.

Para realizar las lecturas del patrón de interferencia primeramente se mantuvo el láser apagado por un minuto y luego se encendió por un minuto y luego se dejaron de tomar mediciones. Este ejercicio nos permite observar el corrimiento espectral en frecuencia al incidir el haz de luz láser sobre la membrana. Sobre la pieza se colocaron diferentes membranas de las concentraciones realizadas. Primeramente, se colocó la membrana con concentración al

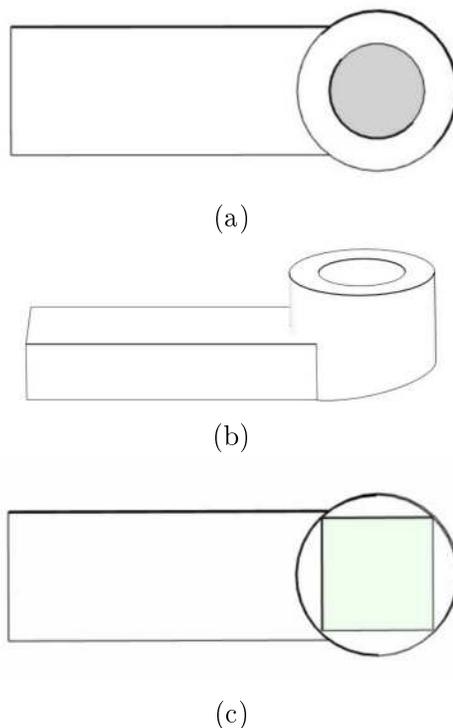


Figura 3.3: a) Vista superior b) Vista lateral c) Vista inferior

1% de nanopulvos de carbono y de  $30\mu\text{m}$  de grosor a la cual se le realizó el procedimiento descrito y se leyeron los siguientes espectros como se puede ver en la figura 3.4.

En el inciso a) de la figura 3.4 se puede observar el patrón de interferencia al hacer contacto el final de la fibra óptica con la membrana. Para este caso la cavidad Fabry-Perot solo tendría una cavidad, la membrana polimérica con carbono. El rango espectral libre (*Free Spectral Range*)(FSR, por sus siglas en inglés) según la gráfica, es de 3.1 THz. La señal azul indica el espectro sin perturbación, o sea, sin encender el diodo láser. Una vez que se enciende el diodo láser se ve como el espectro realiza un corrimiento en frecuencia (señal roja), con lo cual, se demuestra que el sistema es capaz de percibir el pequeño desplazamiento ( $dx$ ) de la membrana. En el inciso b) se puede observar un desplazamiento espectral provocado por la perturbación, y con una cavidad de aire de  $70\mu\text{m}$  entre las superficies reflectoras. Si calculamos el FSR teórico y el obtenido en el patrón de interferencia, notamos que hay resultados similares. Estos resultados nos muestran que corresponde a una cavidad de  $70\mu\text{m}$ , como se esperaba.

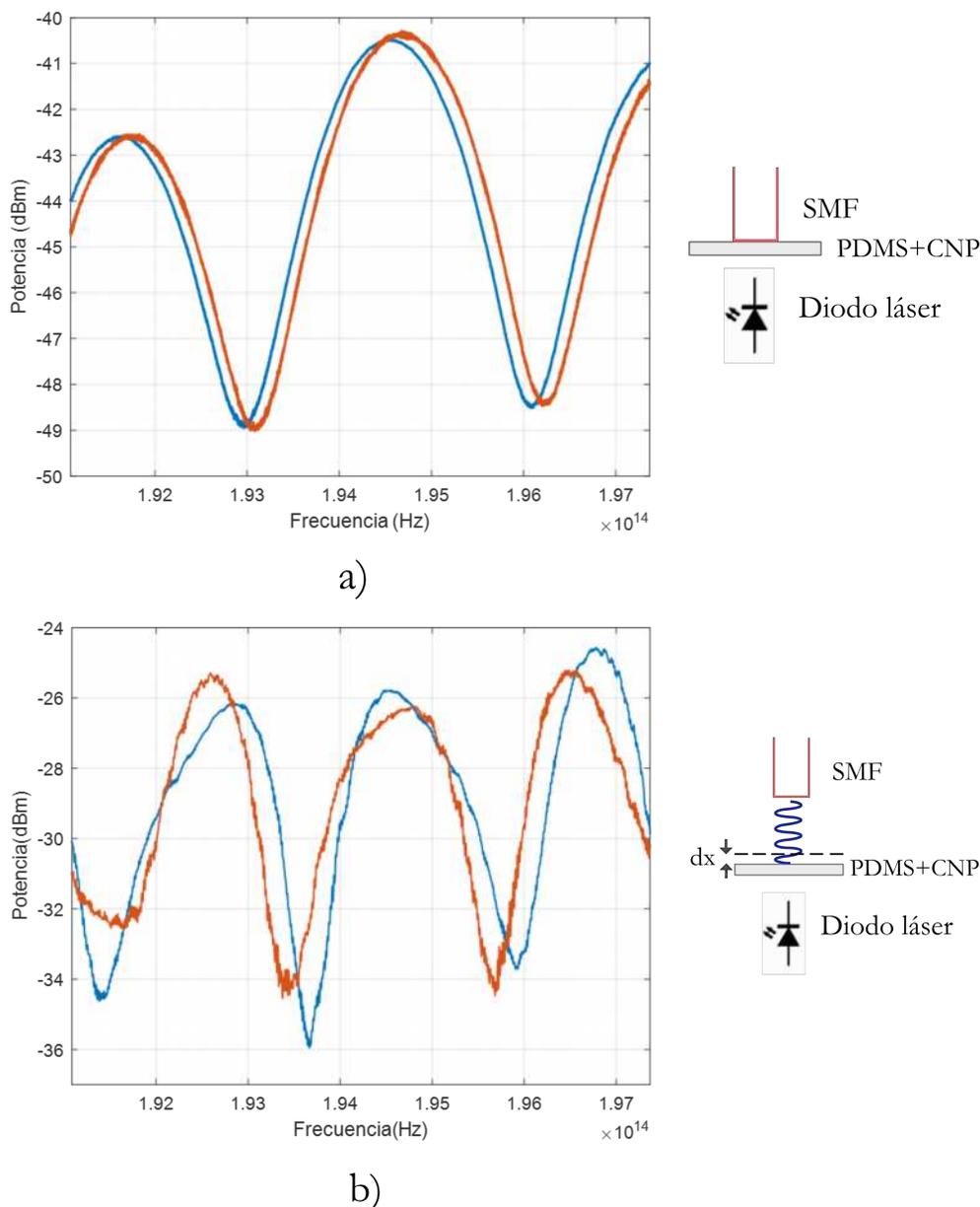
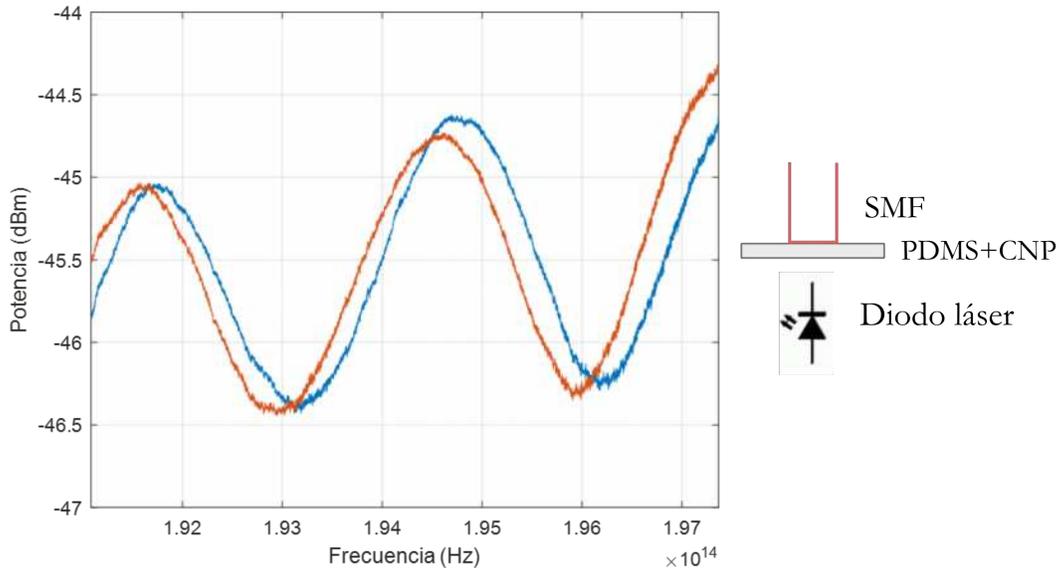


Figura 3.4: a) Patrón de interferencia obtenido haciendo contacto la fibra óptica con la membrana b) Patrón de interferencia obtenido con una cavidad de  $70 \mu\text{m}$ .

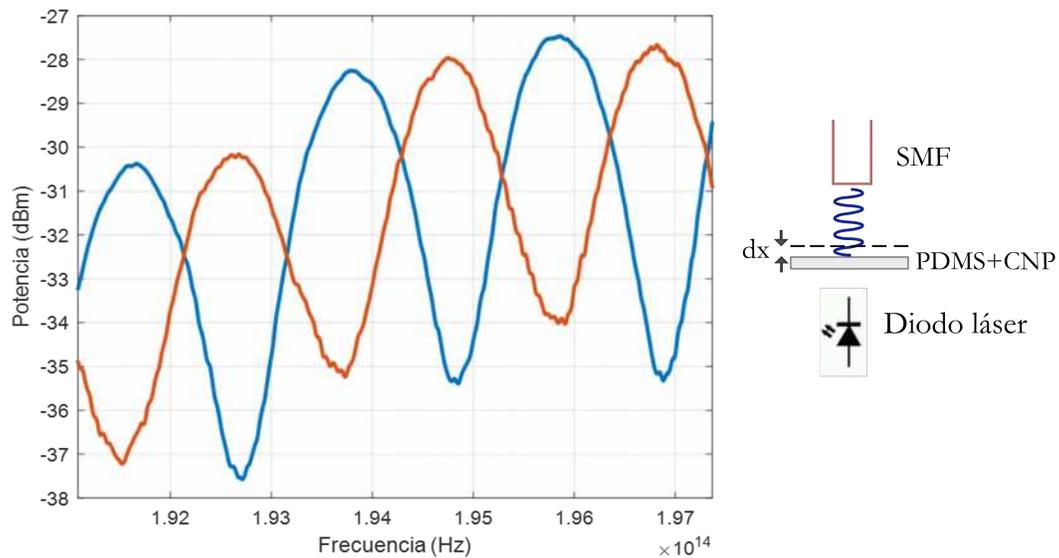
$$\begin{aligned}
 (FSR)_{teórico} &= \frac{c}{2nL} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 1 \times 70 \times 10^{-6} \text{ m}} = 2.14 \text{ THz} \\
 (FSR)_{obtenido} &= 2.2 \text{ THz}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Luego utilizando el mismo arreglo experimental, se procedió a colocar en la pieza una

membrana con una concentración de 3% de nanopolvos de carbono y de  $34\mu\text{m}$  de espesor. A dicha membrana, se procedió a hacerle el mismo experimento de encendido y apagado del diodo láser como perturbación, y se leyeron los espectros. Los patrones de interferencia obtenidos se pueden observar en la figura 3.5



a)



b)

Figura 3.5: a) Patrón de interferencia obtenido haciendo contacto la fibra óptica con la membrana b) Patrón de interferencia obtenido con una cavidad de  $70\mu\text{m}$ .

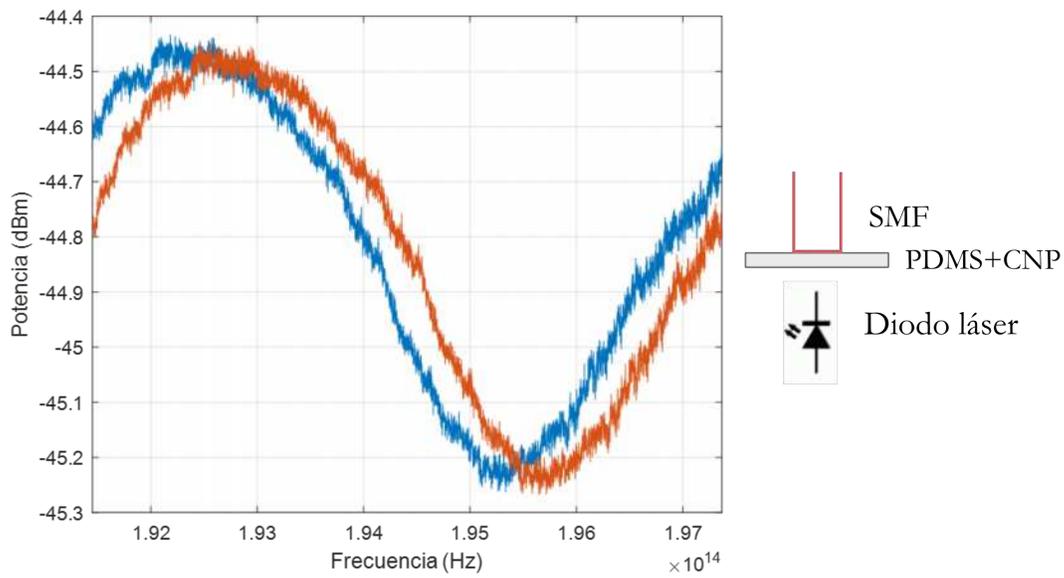
Como se puede observar en el inciso a) de la figura 3.5 cuando la punta de la fibra óptica hace contacto con la membrana se produce un patrón de interferencia. En este caso la cavidad Fabry-Perot solo tendría una cavidad, la membrana polimérica con carbono. El FSR según la gráfica sería de 3 THz. Si encendemos el láser el patrón se desplaza en frecuencia (señal roja), lo que nos muestra la respuesta al cambio ante una incidencia de luz. En el inciso b) se muestra el patrón de interferencia producido para una cavidad de  $70 \mu\text{m}$ . La señal azul representa al patrón original y la línea roja el patrón perturbado por el láser. Si checamos el FSR teórico y el obtenido por el patrón nos arroja resultados similares, indicando la correcta distancia entre la membrana y el final de la fibra óptica.

$$(FSR)_{teórico} = \frac{c}{2nL} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 1 \times 70 \times 10^{-6} \text{ m}} = 2.14 \text{ THz} \quad (3.3)$$

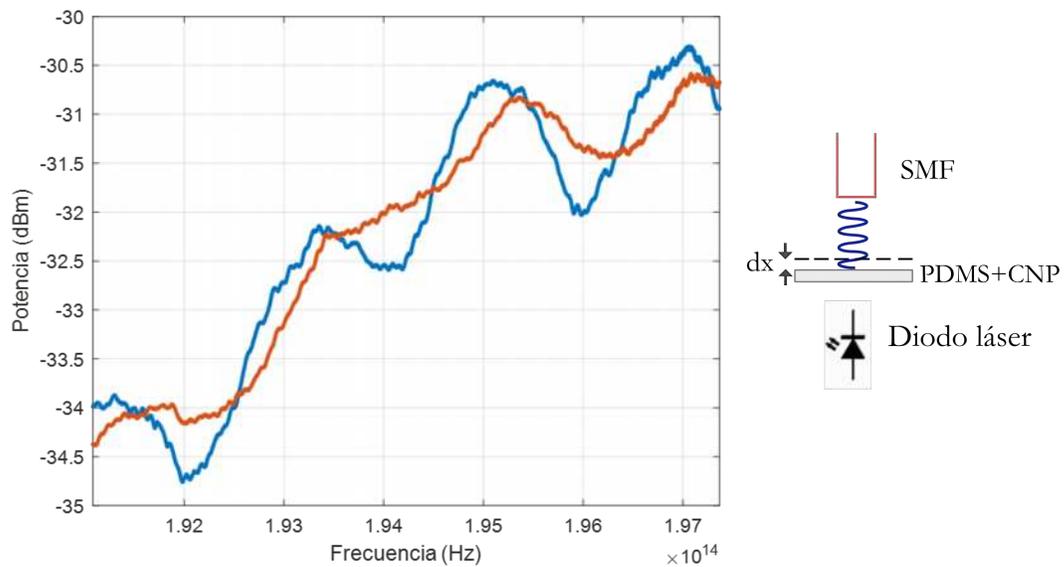
$$(FSR)_{obtenido} = 2.1 \text{ THz}$$

Para el último caso que se compone de una membrana de PDMS con 5% de nanopulvos de carbono y de  $37 \mu\text{m}$  de grosor, se realizaron los mismos procedimientos y el mismo arreglo experimental. Al tener una alta concentración de CNP la superficie de la membrana es poco reflejante. La reflexión es un parámetro importante en una cavidad Fabry-Perot ya que influye directamente en el patrón de interferencia formado. Para dicha membrana se pueden observar los resultados en la figura 3.6.

Como se puede ver en el inciso a) el patrón de interferencia se forma con muy baja intensidad, debido a la baja reflectancia de la superficie y alta concentración de nanopulvos de carbono. Se procede a encender el láser (señal roja) y se nota el desplazamiento en frecuencia de la señal original. Para el caso de una distancia de  $70 \mu\text{m}$  entre la superficie de la membrana y el final de la fibra óptica, que se muestra en el inciso b) podemos notar, que debido a la mala superficie reflectante, el patrón de interferencia no logra tener un buen comportamiento. Si encendemos el láser el patrón se desplaza (señal roja) tratando de seguir a la señal original. Para esta concentración de nanopulvos podemos concluir que no es la ideal para los objetivos del trabajo, ya que, aunque presenta la mejor absorción de todas las membranas, presenta resultados con poca intensidad y patrones de interferencia



a)



b)

Figura 3.6: a) Patrón de interferencia obtenido haciendo contacto la fibra óptica con la membrana b) Patrón de interferencia obtenido con una cavidad de  $70 \mu\text{m}$ .

no bien definidos debido a la poca reflectancia de la membrana. Con respecto al FSR solo en el primer período coincide el FSR obtenido con el FSR teórico, equivalente a 2.2 THz.

Si realizamos una comparación para las tres concentraciones de CNP con las que se trabajaron, podemos notar la amplitud que toma cada una de las señales cuando hacen contacto con la membrana. Como se puede observar en la figura 3.7 la señal azul pertenece a una membrana con concentración de 1% de nanopulvos de carbono, la señal roja pertenece a una membrana con concentración de 3% de nanopulvos de carbono y la señal amarilla a una membrana con concentración de 5% de nanopulvos de carbono. Como se puede observar en la figura, mientras mayor sea la concentración de CNP en las membranas menor será la amplitud del patrón de interferencia, debido a que la luz recorre esta superficie y al regresar, al encontrar más partículas de CNP, pierde la intensidad. La señal azul presenta la mayor amplitud pero es la de menor absorbancia y la señal amarilla viceversa. La señal roja perteneciente a 3% de CNP y con un grosor de  $34 \mu\text{m}$  es la de mejores características ya que presenta buena absorción, analizada anteriormente, y buena amplitud, por lo cual, la membrana con esta concentración será la que se utilizará para incidirle la radiación terahertz.

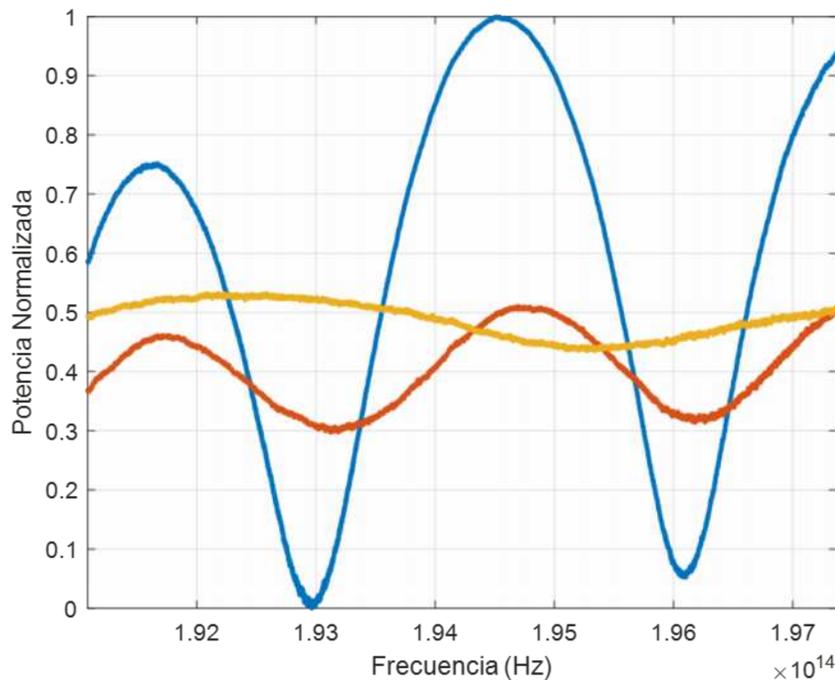
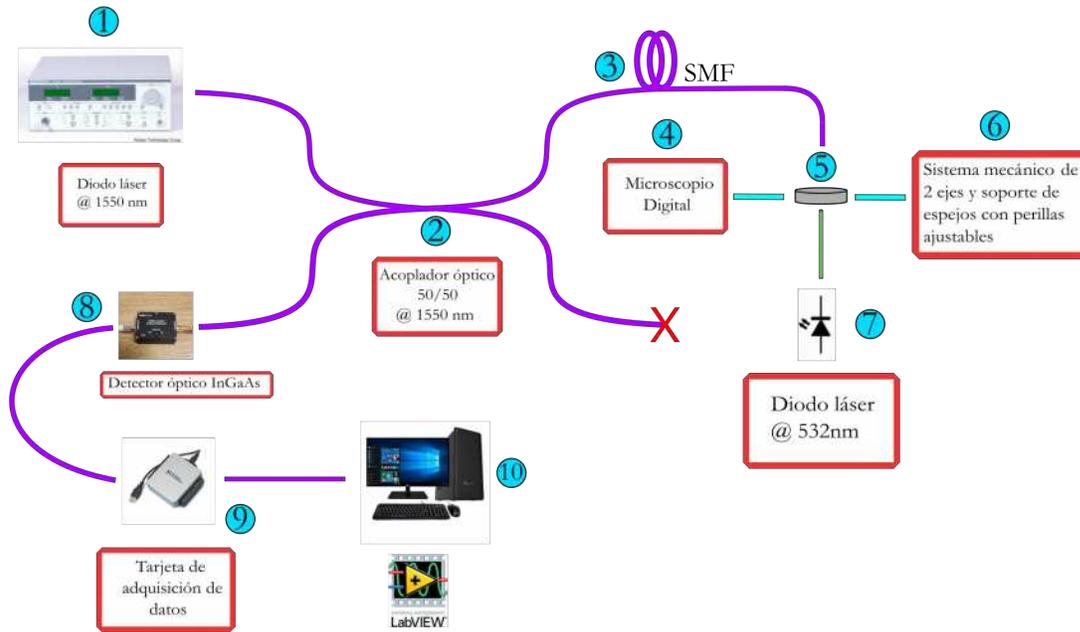


Figura 3.7: a) Patrón de interferencia obtenido para tres diferentes concentraciones de CNP.

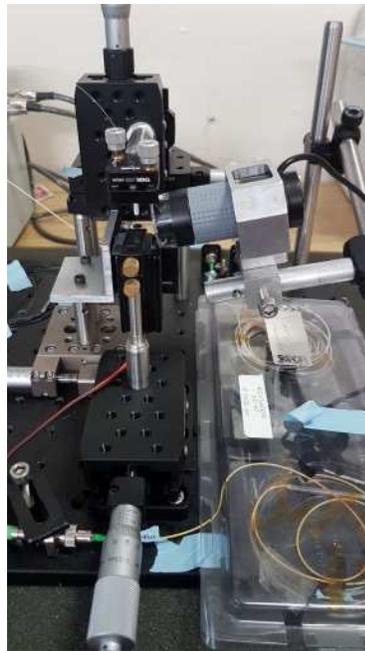
### 3.5. Segundo arreglo experimental

Con el objetivo de obtener mediciones similares donde se pudieran ver las franjas de interferencia, se procedió a realizar otro arreglo experimental. Con este arreglo se pretende calcular la sensibilidad y la responsividad del sistema que en el arreglo anterior no se podía determinar. Para este caso las lecturas se tomaron en tiempo vs voltaje donde se pueden obtener datos importantes para la caracterización del interferómetro Fabry-Perot. El arreglo experimental diseñado consta de los siguientes elementos como se muestra en la figura 3.8 y que a continuación se enuncian. En el apéndice C podemos encontrar más detalles sobre las características de los elementos del arreglo.

1. Diodo láser FPL1009S de Thorlabs de 1550 nm y su controlador LDC3724B de ILX Lightwave. Se utiliza para iluminar el sistema.
2. Acoplador óptico de fibra óptica 50/50 de 3dB a 1550 nm. Una de sus salidas está cubierta con gel y cortada diagonalmente para evitar reflexiones.
3. Fibra óptica monomodo SMF28e de Corning.
4. Microscopio digital USB de la marca Plugable. Se utiliza para la visualización del contacto del final de la fibra óptica con la membrana de PDMS+CNP.
5. Membrana compuesta de PDMS y 3% de concentración de CNP con un grosor de 34  $\mu\text{m}$ . Se encuentra colocada sobre la pieza explicada previamente.
6. Sistema mecánico de movimiento en dos ejes (platina) que a su vez tiene consigo incorporado un soporte de espejos con perillas ajustables para poder posicionar la fibra óptica de tal modo que incida perpendicularmente sobre la membrana. Se utilizaron piezas adicionales para agarrar la pieza.
7. Sistema de perturbación, el cual tiene como objetivo irradiar la membrana simulando radiación terahertz. Se utiliza un diodo láser de luz verde a 532 nm.
8. Fotodetector de fibra óptica InGaAs modelo D400FC de Thorlabs.



(a)



(b)

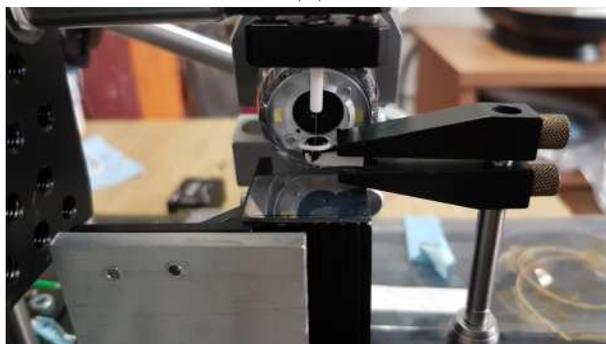
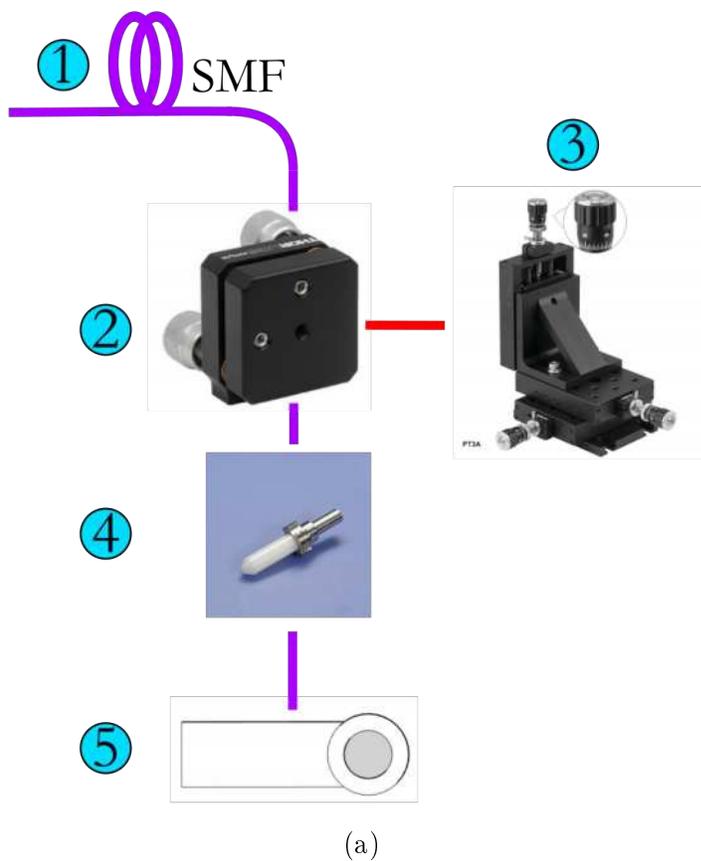
Figura 3.8: a) Diagrama de bloques del arreglo experimental, b) Fotografía del arreglo experimental.

9. Tarjeta de adquisición de datos USB-6000 de National Instruments. Se utiliza para leer la señal obtenida del detector y procesar los datos para su visualización.

10. Equipo de cómputo donde se desarrolló el instrumento virtual (VI, por sus siglas en

inglés) para visualizar el interferograma producido en el sistema.

Debemos destacar para su mejor comprensión el sistema donde se encuentra colocada la membrana de PDMS+CNP en este arreglo experimental. En la figura 3.9 podemos notar los elementos que conforman el parámetro 6 del arreglo experimental de la figura 3.8 inciso a), los cuales serán enunciados a continuación.



(b)

Figura 3.9: a) Diagrama de bloques del arreglo experimental, b) Fotografía del arreglo experimental.

1. Fibra óptica monomodo SMF28e de Corning.
2. Soporte de espejos KMS/M de Thorlabs con perillas ajustables. Su función es sujetar la fibra óptica que pasa a través de su orificio central. Con las perillas ajustables podemos cambiar la posición de la fibra óptica para que forme una cavidad Fabry-Perot con la membrana de PDMS+CNP.
3. Platina de traslación PT3A de Thorlabs. Para nuestro arreglo solo se utilizaron 2 ejes de traslación. El soporte de espejos se encuentra anclado a la platina que realiza el movimiento vertical en el eje Z.
4. Férula de fibra óptica. Su función es agarrar la fibra óptica sin recubrimiento y a su vez es sujeta a presión en el orificio del soporte de espejos. Además, la férula proporciona rigidez a la fibra óptica.
5. Pieza donde es colocada la membrana de PDMS+CNP.

Como primer paso para el desarrollo del experimento se realizó una calibración del diodo láser FPL1009S para asegurarnos de su buen funcionamiento y conocer el rango de operación del mismo. Según los resultados obtenidos se puede ver que el diodo láser presenta un comportamiento lineal. El diodo láser emite una potencia de 1mW a 46.32mA de corriente. Presenta un R-cuadrado ajustado de 0.998 lo cual nos deja claro que es un buen comportamiento del diodo láser, debido a que es un valor muy próximo a la unidad. El R-cuadrado ajustado nos explica el grado en que sus variables de entrada explican la variación de su variable de salida.

El diodo láser se encuentra en la etapa de emisión estimulada a partir de aplicarle 46.32mA de corriente. El máximo de corriente permitida para no dañar el diodo láser sería 400mA. La ecuación lineal arrojada por el ajuste se puede ver en la figura 3.10. Una vez realizada la calibración se procede a realizar el experimento el cual será explicado a continuación. Se enciende el controlador de diodo láser y se le aplica una corriente de 50mA, luego de que el sistema se encuentre estable en temperatura. La luz viaja a través del acoplador óptico 50/50 y en una de sus salidas se encuentra la cavidad Fabry-Perot formada por el final de la fibra óptica y la membrana de PDMS+CNP. Al producirse

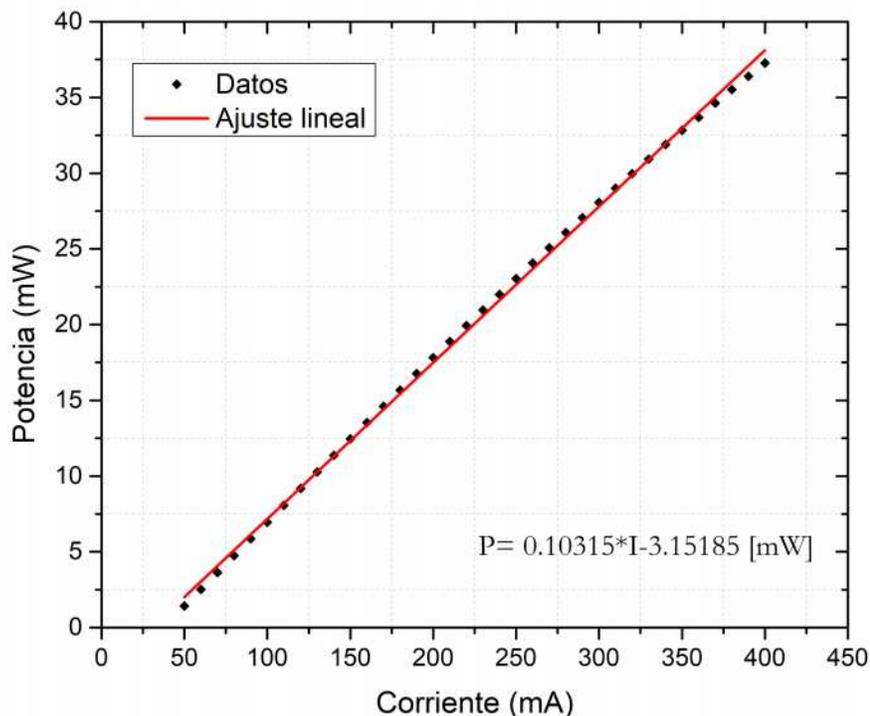


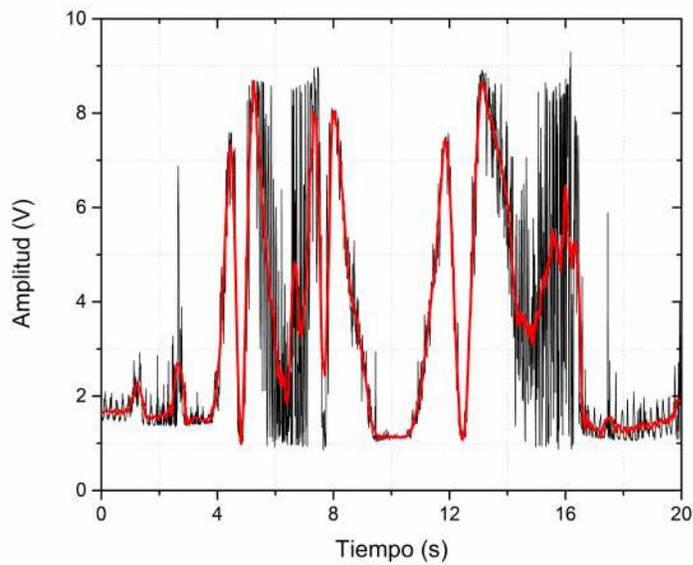
Figura 3.10: Calibración del diodo láser FPL1009S de Thorlabs.

cambios en distancia en la cavidad se produce una interferencia en la señal y se regresa por la fibra óptica monomodal y es captada por un fotodetector óptico en la otra salida del acoplador. La luz recibida en el fotodetector es transformada en una pequeña corriente eléctrica, la cual es amplificada y a la salida del detector es posible obtener un voltaje entre sus terminales. Dicho voltaje es leído por los terminales de entrada analógica de una tarjeta de adquisición de datos y con la ayuda del software Labview es interpretado y se visualizan los resultados.

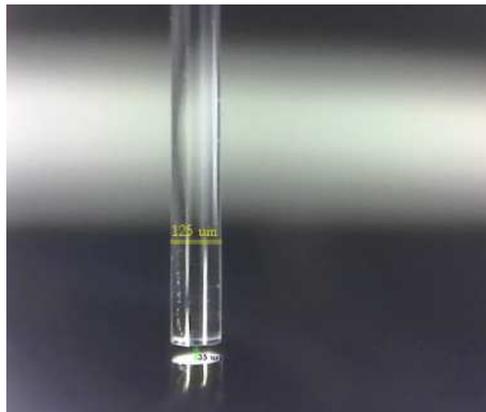
Para lograr mejor precisión en la interferometría, vale destacar la parte mecánica del soporte de espejos para ajustar la inclinación de la fibra óptica para una correcta cavidad de superficies paralelas. La férula por donde pasa la fibra óptica sin recubrimiento juega también un papel importante ya que se encarga de darle rigidez mecánica. Del final de la férula hasta el final de la fibra óptica hay una distancia de aproximadamente 5 mm. Todas los elementos mecánicos juegan un papel importante para obtener buenas mediciones en el

experimento. Todos estos elementos fueron montados sobre una base metálica con orificios para ajustes de tornillos y por debajo de la base se colocó una esponja para minimizar las vibraciones producidas en el ambiente.

Se realizaron dos mediciones para observar el comportamiento de las franjas de interferencia producidas en la cavidad Fabry-Perot. Los resultados que se muestran son producto de mover manualmente la membrana, lo cual produce un desplazamiento. El desplazamiento está en función del tiempo y este se puede ver en la figura 3.11.



(a)



(b)

Figura 3.11: a) Señal de interferencia original (negra) y filtrado de la misma (roja), b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot.

Como se puede ver en el inciso (a) de la figura 3.11 se muestra la señal original producida por la variación de la distancia en la cavidad (señal negra) y el filtrado de la misma (señal roja). Dado los niveles máximos y mínimos reflejados, se puede inferir que se trata de franjas de interferencia. Los resultados mostrados corresponden a una cavidad de  $35 \mu\text{m}$ , que fueron medidos con la ayuda del software ImageJ. Si ampliamos la imagen en un tiempo específico de la gráfica podemos observar las franjas de interferencias formadas en la cavidad. Nótese el buen contraste que presentan las franjas, las cuales van desde 1.5V hasta 8V, dando como resultado una amplitud de 6.5V. Estos resultados pueden ser observados en la figura 3.12.

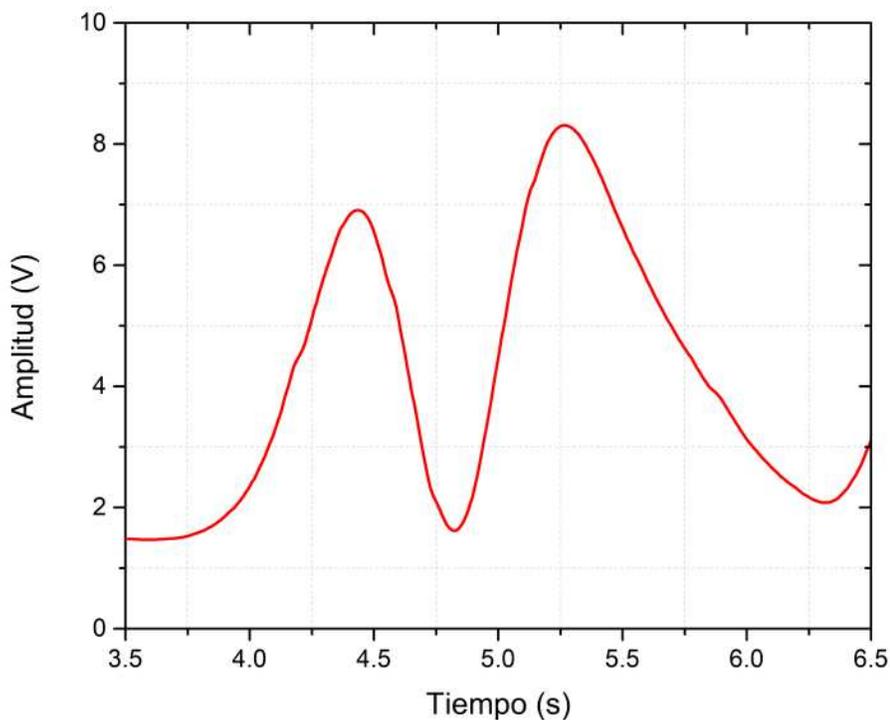
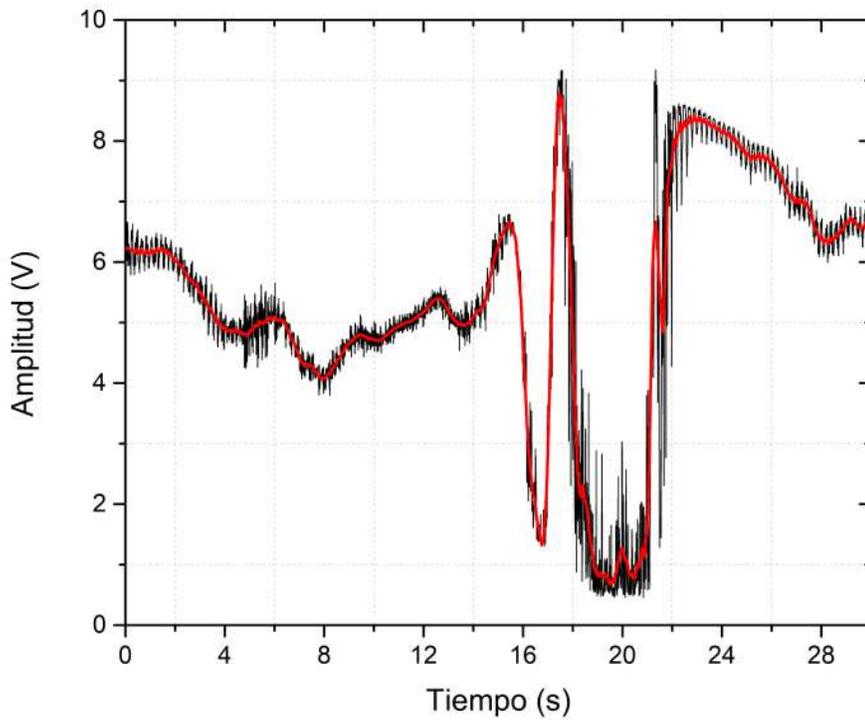


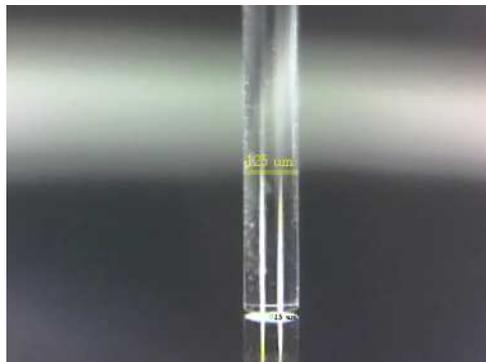
Figura 3.12: Imagen ampliada de la figura 3.11.

La segunda medición efectuada fue llevada a cabo con una cavidad de  $15 \mu\text{m}$  de longitud. Al igual que la primera el objetivo es comprobar la formación de franjas de interferencia con el sistema propuesto. Se mantuvieron las mismas condiciones y se obtuvieron los resultados como se muestra en la figura 3.13. Como se puede observar hay una señal

original de color negro y la señal filtrada es de color rojo. Al igual que la primera medición la señal roja muestra franjas de interferencia correspondiente a la cavidad Fabry-Perot.



(a)



(b)

Figura 3.13: a) Señal de interferencia original (negra) y filtrado de la misma (roja), b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot.

Si ampliamos la imagen filtrada mostrada en la figura 3.13 podemos notar claramente las franjas obtenidas. La amplitud de las mismas va desde 1.5V hasta 8.5V, mostrando un

buen contraste de 6V. Esto nos da una idea del buen desempeño del interferómetro. Estos datos se ven reflejados en la figura 3.14.

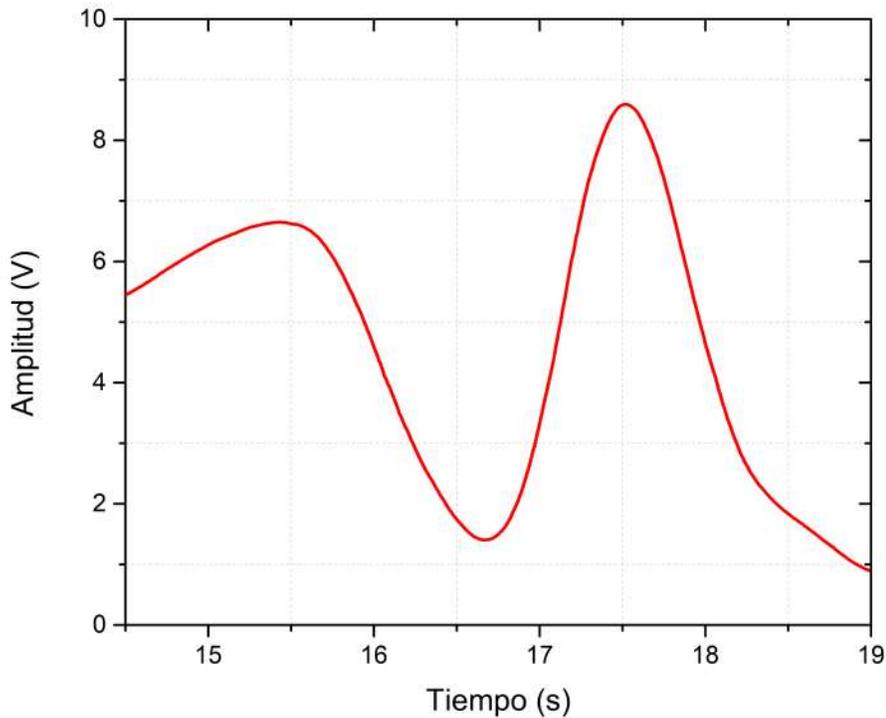
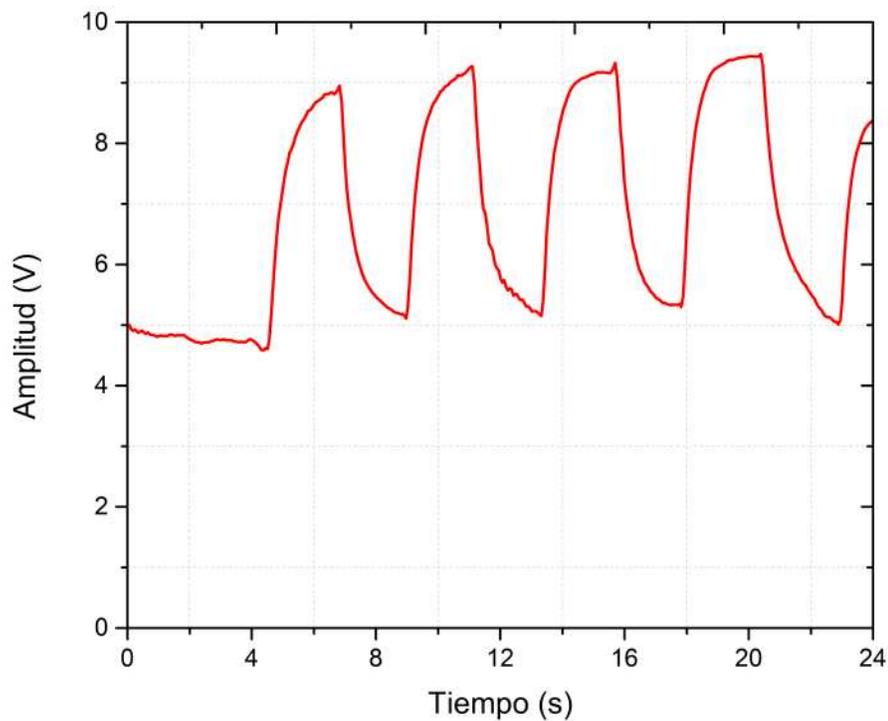


Figura 3.14: Imagen ampliada de la figura 3.13.

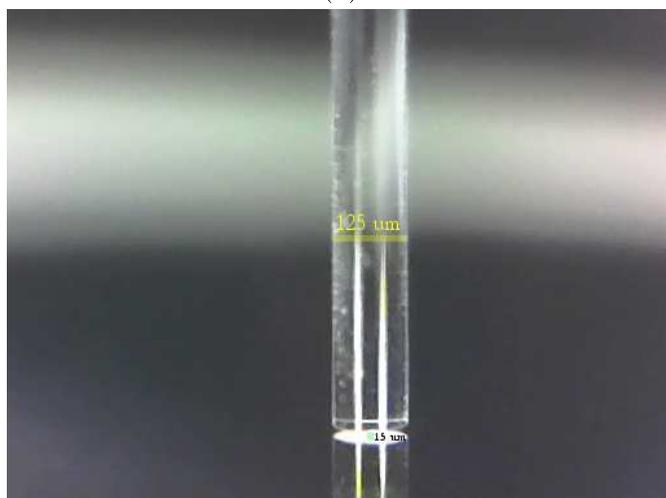
### 3.5.1. Responsividad y sensibilidad del interferómetro Fabry-Perot

Uno de los parámetros importantes a medir en un detector es la responsividad. La responsividad es un valor de señal eléctrica a la salida en relación con la potencia óptica de entrada. Generalmente se expresa en Amperes/Watts, en nuestro caso, se expresará en Volts/Watts. Para calcular la responsividad de nuestro sistema se procedió a realizar un experimento de encendido y apagado del diodo láser verde, que actúa como agente perturbador. Manteniendo las mismas condiciones del diseño implementado se realizaron las siguientes mediciones arrojando buenos resultados como se puede observar en la figura 3.15. El sistema en conjunto es un poco inestable debido a la parte sensible del diseño no se encuentra encapsulada y es propensa a sufrir perturbaciones. En la figura 3.15 se observa

el comportamiento de la membrana polimérica con carbono antes la perturbación del láser verde.



(a)



(b)

Figura 3.15: a) Prueba de encendido y apagado del diodo láser de  $\lambda = 532\text{nm}$ , b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot para este experimento.

Si ampliamos la figura 3.15 en un área específica podemos notar los tiempos de encendido y apagado. El tiempo al cual alcanza el valor final  $t_s$  es de aproximadamente 2.5 segundos al igual que para el caso del descenso  $t_b$ . El tiempo de subida  $t_r$  se define como el tiempo durante el cual la respuesta aumenta del 10 % al 90 % de su valor final de salida, cuando la entrada es una señal de tipo escalón. Para este caso sería como se puede ver en la ecuación 3.4. Los tiempos de respuestas son lentos debido a ser un proceso térmico. Dada la gráfica 3.16 podemos calcular la responsividad del sistema.

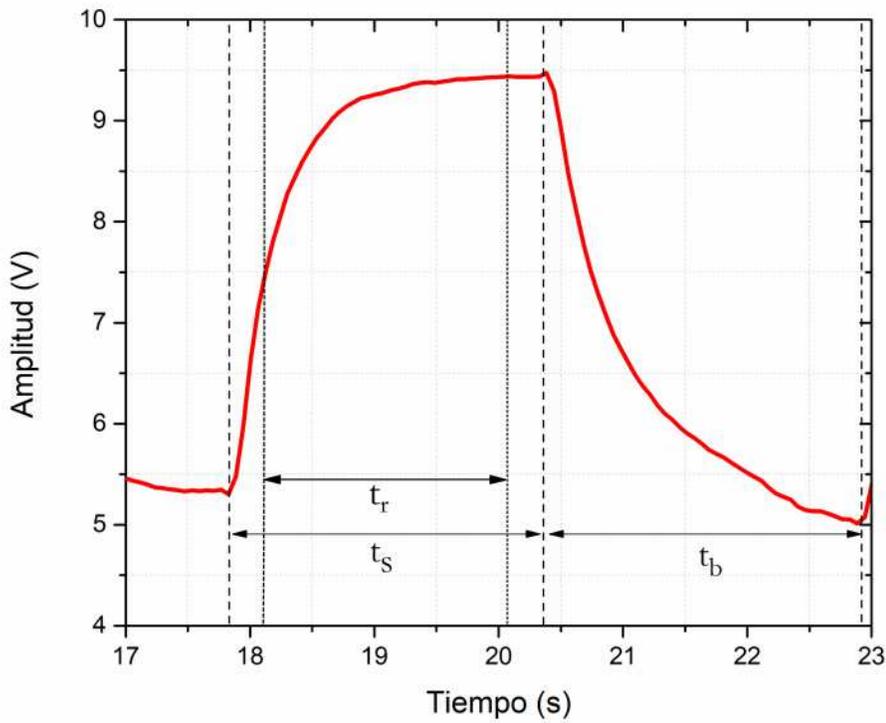


Figura 3.16: Imagen ampliada de la figura 3.15.

$$\text{Tiempo de subida } (t_r) = \frac{90}{100} \times 2.5[s] - \frac{10}{100} \times 2.5[s] = 2 [s] \quad (3.4)$$

$$\text{Responsividad } (R) = \frac{9.4V - 5.4V}{1mW} = \frac{4V}{1mW} = 4 \times 10^3 \frac{V}{W}$$

La sensibilidad de un detector es otro parámetro muy importante. Si ampliamos el área donde se comienza a medir en la figura 3.15 inciso (a), podemos observar la variación de la señal, y de ahí estimar su incertidumbre. Según la gráfica 3.17 podemos decir que la incertidumbre es la mitad de la máxima escala, o sea, unos 0.04V aproximadamente. Si calculamos la variación de potencia teniendo la variación de voltaje  $\Delta V = 0.04 \text{ V}$  y la responsividad de  $4 \times 10^3 \frac{\text{V}}{\text{W}}$ , entonces podremos obtener la sensibilidad.

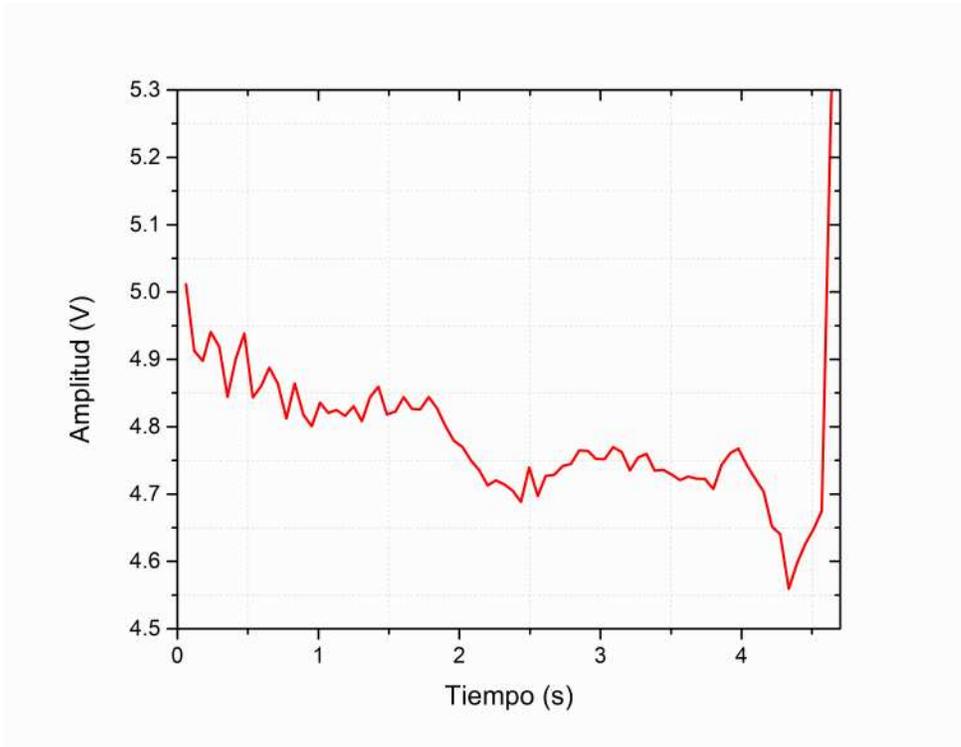


Figura 3.17: Imagen ampliada de la figura 3.15 (a) para cálculo de sensibilidad.

$$\Delta P = \frac{\Delta V}{\text{Responsividad}} = \frac{0.04}{4 \times 10^3} = 10 \mu\text{W} \quad (3.5)$$

$$\text{Sensibilidad}(S) = \frac{\Delta \text{Salida}}{\Delta \text{Entrada}} = \frac{0.04 \text{ V}}{10 \mu\text{W}} = 4 \times 10^3 \frac{\text{V}}{\text{W}}$$

Utilizando los mismos equipos y componentes se realizó una pequeña modificación en la etapa de traslación. En el arreglo experimental mostrado en la figura 3.9 (b) se muestra como la fibra óptica se desplaza de arriba hacia abajo, en el eje Z, hasta hacer contacto

con la membrana. Con la idea de que la radiación terahertz incida sobre la membrana de una mejor manera, ya que se dificulta que la radiación pueda incidir desde abajo, se procede a hacer una corrección del sistema, para mayor facilidad. Se procede a realizar el montaje de tal forma que la fibra óptica tenga un desplazamiento lateral, en el eje X, en la cual hace contacto perpendicularmente con la membrana y a continuación un láser como perturbación, como se muestra en la figura 3.18.

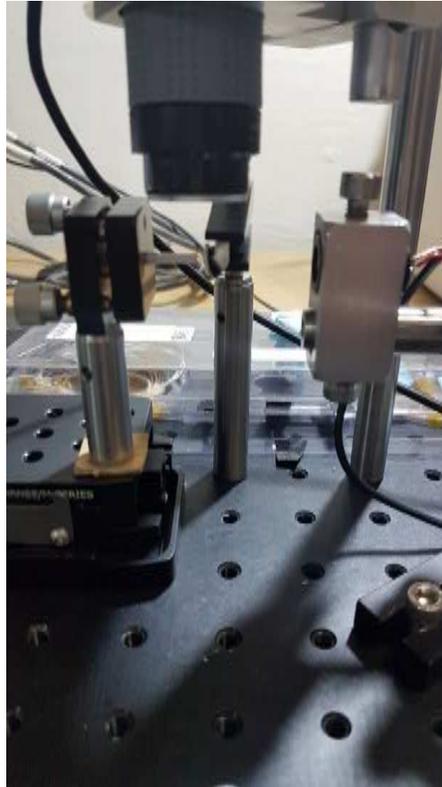
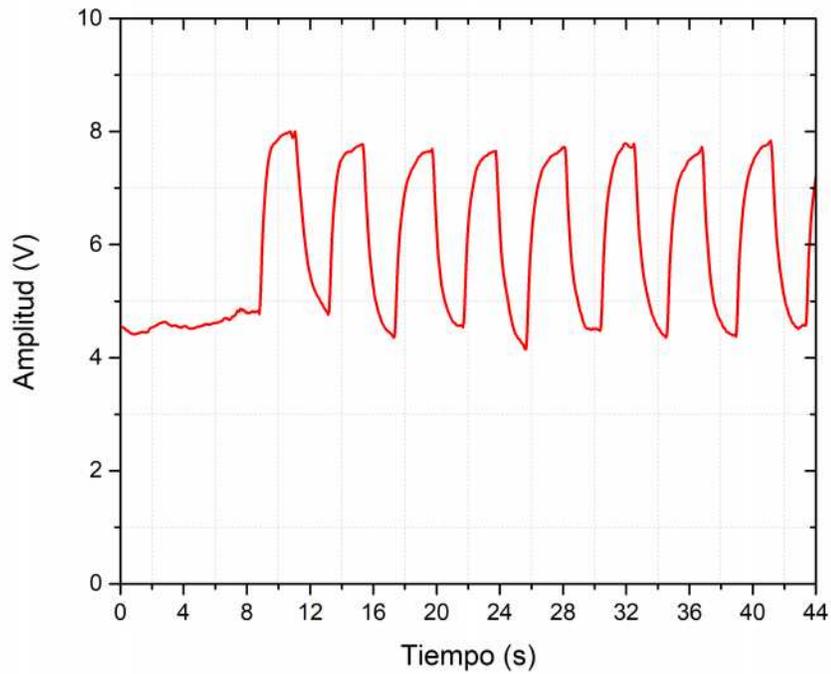


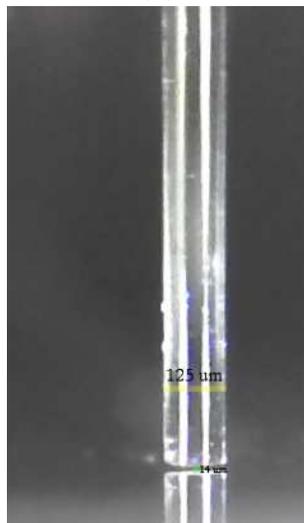
Figura 3.18: Arreglo experimental utilizando un diodo láser de  $\lambda= 780\text{nm}$ .

De esta manera se procede a irradiar con un diodo láser rojo de  $\lambda= 780\text{nm}$  para observar el comportamiento del interferómetro ante una incidencia de luz con diferente longitud de onda. Al igual que en el caso del láser verde, la potencia de salida del láser rojo es de  $1\text{mW}$ . Se realiza la prueba de encendido y apagado del diodo láser para una cavidad de  $14\mu\text{m}$  y se obtienen los siguientes resultados, como se observa en la figura 3.19.

Como se puede notar en la figura 3.19 el comportamiento ante el encendido y apagado del diodo láser es bastante bueno. Si lo comparamos con el diodo láser verde podemos decir que el contraste es un poco menor y su responsividad también.



(a)



(b)

Figura 3.19: a) Prueba de encendido y apagado del diodo láser de  $\lambda = 780\text{nm}$ , b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot para este experimento.

Haciendo un agrandamiento en un zona específica de la gráfica 3.19 se muestran el tiempo al cual alcanza el valor final en ascenso  $t_s$  y en descenso  $t_b$ . Los tiempos de ascenso y descenso para este sistema es de aproximadamente 2 segundos en ambos casos (ver figura

3.20). Sus tiempos con respecto al diodo láser verde son más lentos, por lo que el sistema implementado reacciona mejor ante de una incidencia de luz con longitud de onda menor. De este diseño podemos calcular el tiempo de subida  $t_r$  y la responsividad como se observa en la ecuación 3.6.

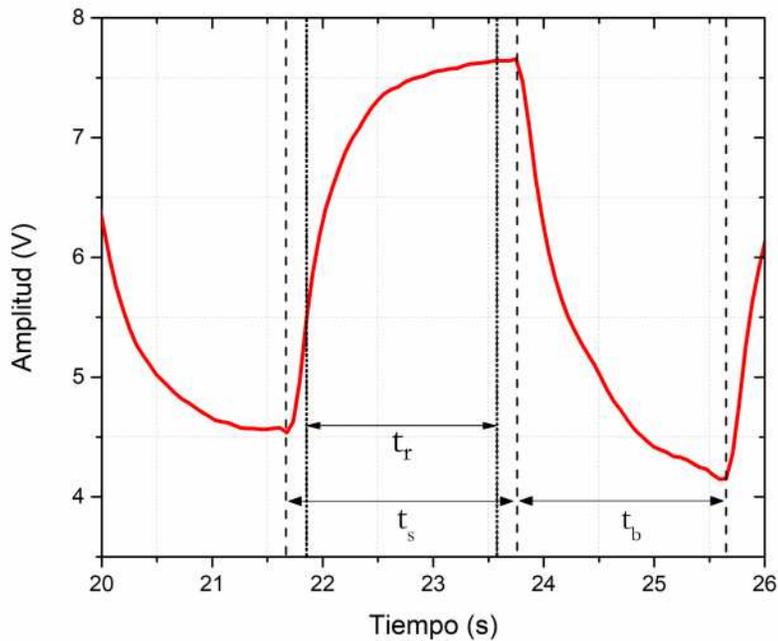


Figura 3.20: Imagen ampliada de la figura 3.19.

$$\text{Tiempo de subida } (t_r) = \frac{90}{100} \times 2[s] - \frac{10}{100} \times 2[s] = 1.6 [s] \quad (3.6)$$

$$\text{Responsividad}(R) = \frac{7.7V - 4.2V}{1mW} = \frac{3.5V}{1mW} = 3.5 \times 10^3 \frac{V}{W}$$

Si realizamos una ampliación del área donde se comienza a tomar las mediciones en la figura 3.19 inciso (a) podemos observar la incertidumbre del sistema. Para este caso se nota que la incertidumbre es aproximadamente 0.1V, por lo cual teniendo este valor podemos calcular la sensibilidad (ver figura 3.21). La variación de potencia es posible calcularla teniendo el valor de  $\Delta V = 0.1 V$ .

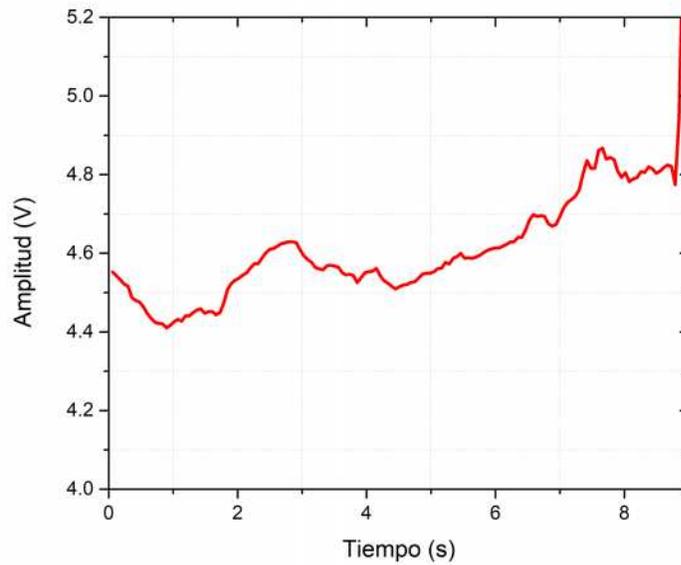


Figura 3.21: Imagen ampliada de la figura 3.19 (a) para cálculo de sensibilidad.

$$\Delta P = \frac{\Delta V}{\text{Responsividad}} = \frac{0.1}{3.5 \times 10^3} = 28.6 \mu W \quad (3.7)$$

$$\text{Sensibilidad}(S) = \frac{\Delta \text{Salida}}{\Delta \text{Entrada}} = \frac{0.1 V}{28.6 \mu W} = 3.5 \times 10^3 \frac{V}{W}$$

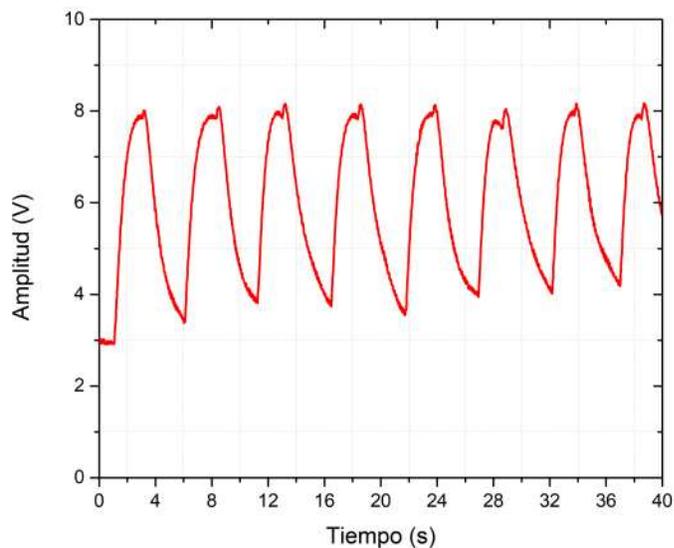
Si comparamos la sensibilidad y responsividad para este sistema podemos decir que es ligeramente inferior con respecto al sistema con el diodo láser verde. Según los resultados obtenidos a mayor longitud de onda de la luz de incidencia, se obtienen valores ligeramente inferiores.

### 3.5.2. Variación del tamaño del área de detección.

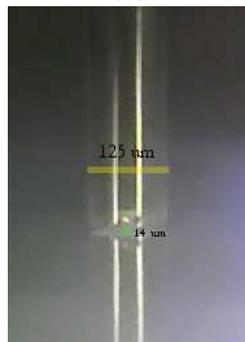
Se procedió a realizarle una pequeña modificación en el tamaño del área de detección con la finalidad de observar el comportamiento del detector ante una superficie mayor. Se redimensionó la pieza diseñada para sujetar la membrana vista en la figura 3.3 a un tamaño mayor. La pieza anteriormente contaba con unas dimensiones de un diámetro interior de

3mm, diámetro exterior 5mm y altura 5mm, y el nuevo diseño cuenta con un diámetro interior de 9mm, diámetro exterior 11mm y altura 5mm. Sobre la nueva pieza es colocada la membrana y utilizando el mismo arreglo experimental, se realizaron las mediciones de encendido y apagado de los diodos láseres para obtener la responsividad y sensibilidad.

La primera medición se realizó con el diodo láser verde como perturbación de incidencia de luz, y se tomaron los siguientes resultados. Su comportamiento ante el encendido y apagado del diodo láser es bastante bueno, similar al caso de la pieza con superficie mas pequeña (ver figura 3.22) .



(a)



(b)

Figura 3.22: a) Prueba de encendido y apagado del diodo láser de  $\lambda = 532\text{nm}$ , b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot para este experimento.

Realizando un acercamiento de la figura 3.22 a) podemos notar una mayor inestabilidad del sistema con esta pieza que con la anterior. Los tiempos de ascenso  $t_s$  y de descenso  $t_b$  se mantienen parecidos al del otro sistema con un  $t_s$  de 2 segundos aproximadamente y un  $t_b$  de 2.7 segundos aproximadamente. Se puede calcular el tiempo de subida  $t_r$  como se puede ver en la ecuación 3.8. También podemos calcular la responsividad para este caso el cual nos da un resultado de  $5 \times 10^3 \frac{V}{W}$ , que si la comparamos con el sistema anterior es ligeramente mayor para este caso (ver figura 3.23). Las mediciones fueron realizadas para una cavidad de  $14\mu\text{m}$ .

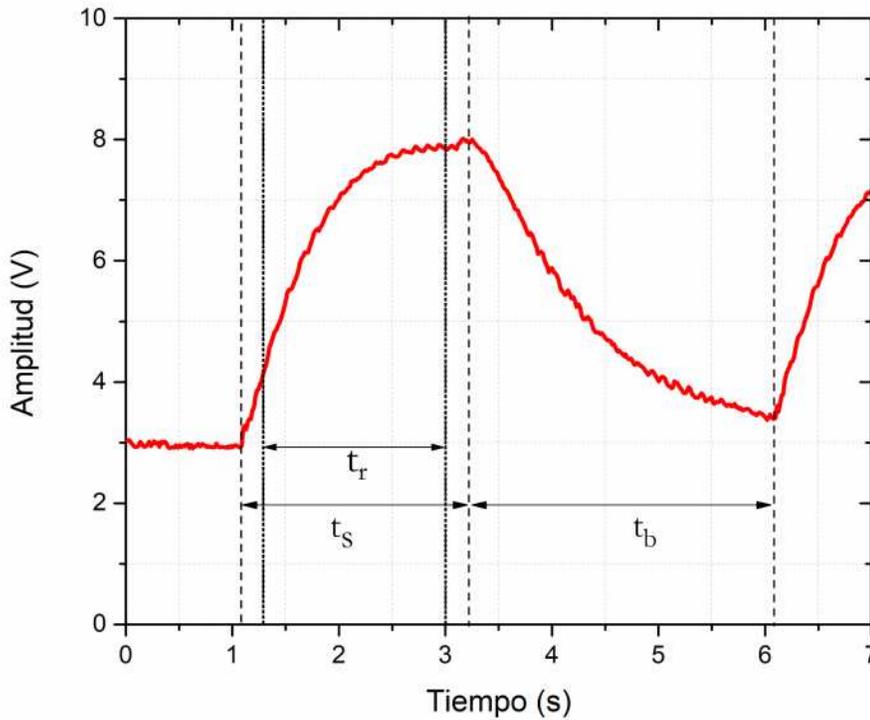


Figura 3.23: Imagen ampliada de la figura 3.22.

$$\text{Tiempo de subida } (t_r) = \frac{90}{100} \times 2[s] - \frac{10}{100} \times 2[s] = 1.6 [s]$$

(3.8)

$$\text{Responsividad}(R) = \frac{8V - 3V}{1mW} = \frac{5V}{1mW} = 5 \times 10^3 \frac{V}{W}$$

La incertidumbre de este sistema se puede notar en la figura 3.24. De ahí podemos ver como la variación de voltaje  $\Delta V$  es de aproximadamente 0.1V y su incertidumbre  $\Delta V = 0.05V$ . Teniendo estos datos podemos calcular la sensibilidad.

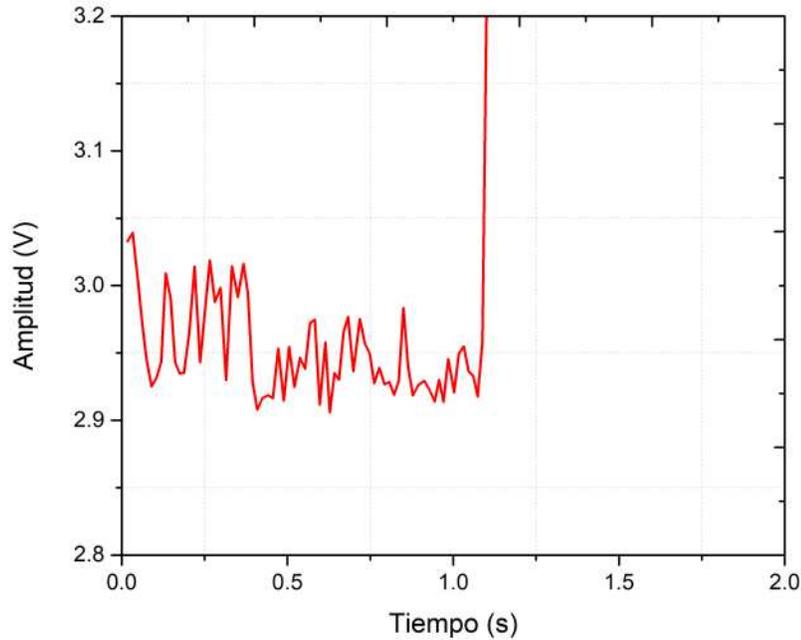


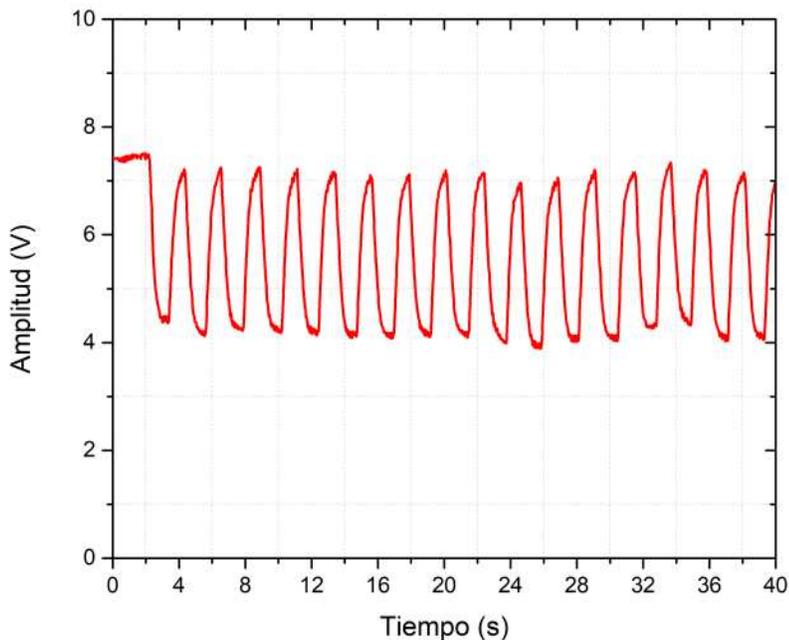
Figura 3.24: Imagen ampliada de la figura 3.22 para cálculo de sensibilidad.

$$\Delta P = \frac{\Delta V}{\text{Responsividad}} = \frac{0.05}{5 \times 10^3} = 10 \mu W \quad (3.9)$$

$$\text{Sensibilidad}(S) = \frac{\Delta \text{Salida}}{\Delta \text{Entrada}} = \frac{0.05V}{10 \mu W} = 5 \times 10^3 \frac{V}{W}$$

Manteniendo el mismo arreglo experimental se procedió a cambiar el diodo láser verde por el diodo láser rojo de  $\lambda = 780\text{nm}$ . Para este caso se irradia con esta luz sobre la membrana colocada en la pieza rediseñada. Se realiza el mismo procedimiento de encendido y apagado del diodo láser para observar su comportamiento ante la perturbación. Los resultados para este experimento se observan en la figura 3.25 para una cavidad de  $15\mu\text{m}$ .

Al igual que en el caso anterior con perturbación del láser verde se nota una pequeña



(a)



(b)

Figura 3.25: a) Prueba de encendido y apagado del diodo láser de  $\lambda = 780\text{nm}$ , b) Fotografía real de la cavidad Fabry-Perot para este experimento.

inestabilidad debido al aumento de la superficie de la membrana. El comportamiento para este caso se muestra también muy bueno al igual que en el caso anterior. Si acercamos la imagen podemos notar mejor los tiempos de ascenso y descenso para este sistema (ver figura 3.26). Para este caso el  $t_s$  es de aproximadamente un segundo y el  $t_b$  de 1.6 segundos aproximadamente. Se puede calcular el tiempo de subida  $t_r$  (ver ecuación 3.10).

Con respecto al diodo láser verde para este caso los tiempos de respuestas son menores, lo cual nos da la idea que a mayor longitud de onda disminuye el tiempo de respuesta. También se puede observar la inestabilidad que presenta este ejemplo. Podemos calcular la responsividad para este sistema que se puede ver a continuación.

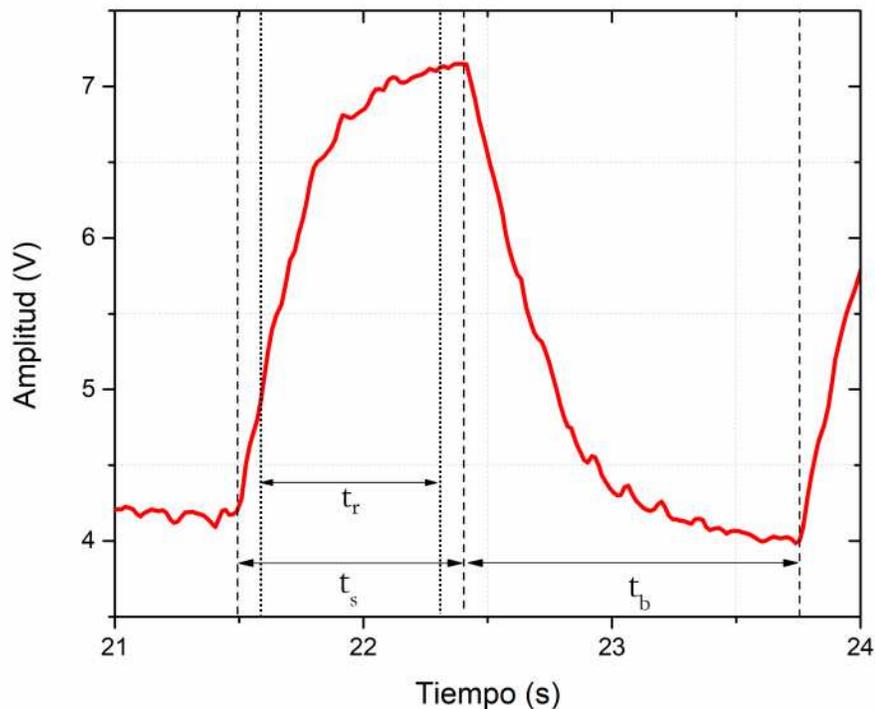


Figura 3.26: Imagen ampliada de la figura 3.25.

$$\text{Tiempo de subida } (t_r) = \frac{90}{100} \times 1[s] - \frac{10}{100} \times 1[s] = 0.8 [s] \quad (3.10)$$

$$\text{Responsividad}(R) = \frac{7V - 4V}{1mW} = \frac{3V}{1mW} = 3 \times 10^3 \frac{V}{W}$$

Para el cálculo de la sensibilidad podemos agrandar el área donde se comienzan a medir las mediciones para notar la incertidumbre dando como resultado de  $\Delta V = 0.01V$  (ver figura 3.27).

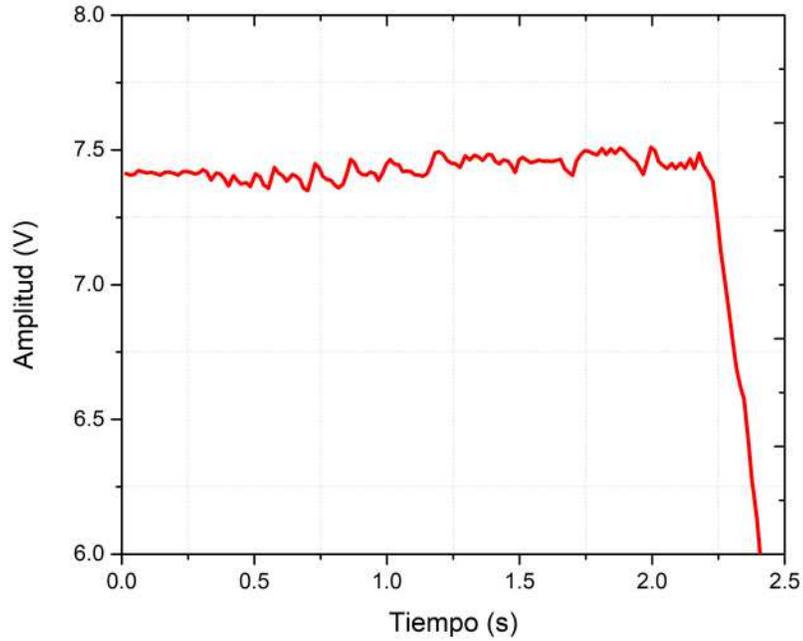


Figura 3.27: Imagen ampliada de la figura 3.25 para cálculo de sensibilidad.

$$\Delta P = \frac{\Delta V}{\text{Responsividad}} = \frac{0.01}{3 \times 10^3} = 3.3 \mu W \quad (3.11)$$

$$\text{Sensibilidad}(S) = \frac{\Delta \text{Salida}}{\Delta \text{Entrada}} = \frac{0.01 V}{3.3 \mu W} = 3 \times 10^3 \frac{V}{W}$$

Según los resultados mostrados podemos decir que para incidencia de luz láser verde obtenemos mayor responsividad pero los tiempos de respuesta son mayores con respecto al sistema con diodo láser rojo. Para el sistema con el láser rojo la responsividad es menor pero responde más rápido a los cambios producidos.

### 3.5.3. Comparación de los resultados para diferentes áreas de detección de las membranas de PDMS + CNP.

Una vez realizados los experimentos podemos resumir en un tabla todos los parámetros que se obtuvieron para diferentes áreas de detección de las membranas poliméricas con carbono. Primero se muestran los resultados obtenidos para un área de detección de  $7.07 \text{ mm}^2$ , que fue el área de la membrana colocada en la primera pieza con un radio interior de 3mm. A continuación se muestran los parámetros logrados del sistema de detección (ver tabla 3.1).

Parámetros \ Longitud de onda	532 nm	780 nm
Responsividad $[\frac{V}{W}]$	$4 \times 10^3$	$3.5 \times 10^3$
$\Delta P$ [W]	$10 \times 10^{-6}$	$28.6 \times 10^{-6}$
$\Delta V$ [V]	0.04	0.1
Tiempo de subida [s]	2	1.6
Sensibilidad $[\frac{V}{W}]$	$4 \times 10^3$	$3.5 \times 10^3$

Tabla 3.1: Parámetros para un área de detección de  $7.07 \text{ mm}^2$  de la membrana de PDMS + CNP.

Luego se realizaron experimentos para una superficie de detección mayor. Para este caso se utilizó una pieza de 9 mm de radio interior lo cual nos arroja un área de  $63.62 \text{ mm}^2$ . Se muestran los parámetros obetenidos como se puede ver en 3.2.

Parámetros \ Longitud de onda	532 nm	780 nm
Responsividad $[\frac{V}{W}]$	$5 \times 10^3$	$3 \times 10^3$
$\Delta P$ [W]	$10 \times 10^{-6}$	$3.3 \times 10^{-6}$
$\Delta V$ [V]	0.05	0.01
Tiempo de subida [s]	1.6	0.8
Sensibilidad $[\frac{V}{W}]$	$5 \times 10^3$	$3 \times 10^3$

Tabla 3.2: Parámetros para un área de detección de  $63.62 \text{ mm}^2$  de la membrana de PDMS + CNP.

Se puede notar que hay ligeras diferencias en los parámetros para las diferentes áreas de detección. La principal diferencia radica en los tiempos de subida que para el caso de la mayor superficie resultaron ser menores con respecto a la menor superficie para ambas longitudes de onda. Las otras características del sistema de detección se mantienen similares para los dos casos.

#### 3.5.4. El sistema de detección implementado y los detectores comerciales.

Según los resultados mostrados previamente se puede realizar una comparación del detector implementado con los detectores comerciales. Se nota que el sistema de detección desarrollado en este trabajo posee valores de responsividad similares e incluso superiores a los detectores establecidos. El sistema de detección implementado tiene unidades de responsividad de  $\frac{V}{W}$  mientras los detectores comerciales se expresan en  $\frac{A}{W}$ . Suponiendo que la corriente pasa a través de una resistencia de  $1k\Omega$  (un valor común), la mayoría de los detectores comerciales son del orden de los  $\frac{kV}{W}$  al igual que el sistema de detección implementado (ver figura 3.29 y 3.30).

Si comparamos el detector implementado con un detector piroeléctrico comercial para los THz como el QS5-THZ-BL, el cual tiene una responsividad de  $\frac{70kV}{W}$ , se nota que se encuentra en el rango de los  $\frac{kV}{W}$ , lo cual nos indica que el sistema de detección diseñado está dentro de los valores comerciales.



Figura 3.28: Detector piroeléctrico para radiación terahertz QS5-THZ-BL. Tomada de <https://www.gentec-eo.com/products/qs5-thz-bl>.

Table 1: Performance comparison for photodetectors based on various material systems.

Material	Responsivity (A/W)	Bandwidth (GHz)	Dark current ( $\mu$ A)	Photodetector structure	Year	Reference
InGaAs	1.1 @ 1550 nm	-	$10^{-6}$ @ 0.5 V	<i>p-i-n</i>	2010	[34]
InGaAs	0.17 @ 1550 nm	9	2.5 @ -1 V	<i>p-i-n</i>	2012	[38]
InGaAs	0.96 @ 1300 nm	4	0.015 @ 5 V	MSM	1992	[47]
InGaAs	> 0.4 @ 1520–1630 nm	-	0.27 @ 1 V	MSM	2014	[50]
InGaAs	-	120	0.34 @ 5 V	APD	2013	[56]
InGaAs	0.69 @ 1310 nm	270	-	APD	2014	[60]
Ge	1.08 @ 1550 nm	7.2	0.06 @ 0.1 V	<i>p-i-n</i>	2007	[79]
Ge	0.56 @ 1640 nm	-	1.08 @ 1 V	<i>p-i-n</i>	2013	[83]
Ge	0.53 @ 1550 nm	-	0.0115 @ 1 V	MSM	2008	[88]
Ge	1.76 @ 1550 nm	1.1	412 @ 5 V	MSM	2013	[92]
Ge	5.88 @ 1310 nm	340	10 @ 25 V	APD	2009	[19]
Ge	0.75 @ 1550 nm	30	0.184 @ 1 V	APD	2013	[98]
Si	0.5–10 @ 1100–1700 nm	35	< 0.5 @ 60 V	MBA	2009	[109]
Si	4.7 @ 1550 nm	2	-	MBA	2013	[110]
Si	0.036 @ 1575 nm	-	-	SSA	2008	[116]
Si	0.00025 @ 1550 nm	-	0.0025 @ -15 V	SSA	2009	[117]
Si	0.15 @ 1550 nm	1.46	12E-6 @ 5 V	IPE	2008	[125]
Si	0.00008 @ 1550 nm	> 170	0.1 @ 5 V	IPE	2010	[124]
HgCdTe	-	7	1.325 @ 63.7 V	APD	1997	[144]
HgCdTe	13.1 @ 1550 nm	> 100	0.066 @ 77.7 V	APD	2002	[141]
Graphene	0.0005 @ 1550 nm	> 100	1.2 @ 4 V	MSM	2009	[174]
Graphene	$10^7$ @ 1450 nm	1	-	Hybrid graphene-QD	2012	[159]
Graphene	0.4–1 @ < 1000 nm	500	< 0.1 @ 5 V	Vertical p-n junction	2014	[176]
CNT	0.9–1.8 @ 500–1800 nm	-	-	Bolometer p-n diode	2011	[194]
CNT	0.02–0.64 @ 400–1500 nm	0.031	-	CNT/C60 heterojunction	2009	[196]
QD	2700 @ visible–1300 nm	$2 \times 10^{-8}$	0.7 mA/cm <sup>2</sup> @ 100 V	photoconductor	2006	[221]
QD	0.2 @ visible–1600 nm	$10^{-3}$	< 0.1 nA/cm <sup>2</sup> short circuit	photodiode	2009	[218]
Plasmons	1.081 @ 1550 nm	15.6	0.5 @ 1 V	Plasmonic electrode	2010	[20]
Plasmons	0.0133 @ 1310 nm	-	0.013 @ 0.1 V	Plasmonic electrode	2011	[21]
Plasmons	0.049 @ 1550 nm	270	< 0.1 @ 1 V	Plasmonic antenna	2012	[232]
Plasmons	0.1 @ 700 nm	-	-	MIM	2011	[234]

Figura 3.29: Comparación de varios fotodetectores de diferentes estructuras (1). Tomada de [42].

Table 2: Performance comparison for photodetectors based on various photodetector structures.

Photodetector structure	Responsivity (A/W)	Bandwidth (GHz)	Dark current ( $\mu$ A)	Material	Year	Reference
<i>p-i-n</i>	1.1 @ 1550 nm	-	$10^{-6}$ @ 0.5 V	InGaAs	2010	[34]
<i>p-i-n</i>	0.17 @ 1550 nm	9	2.5 @ -1 V	InGaAs	2012	[38]
<i>p-i-n</i>	1.08 @ 1550 nm	7.2	0.06 @ 0.1 V	Ge	2007	[79]
<i>p-i-n</i>	0.56 @ 1640 nm	-	1.08 @ 1 V	Ge	2013	[83]
<i>p-i-n</i> /MBA	0.5–10 @ 1100–1700 nm	35	< 0.5 @ 60 V	Si	2009	[109]
<i>p-i-n</i> /MBA	4.7 @ 1550 nm	2	-	Si	2013	[110]
<i>p-i-n</i> /SSA	0.036 @ 1575 nm	-	-	Si	2008	[116]
<i>p-i-n</i> /SSA	0.00025 @ 1550 nm	-	0.0025 @ -15 V	Si	2009	[117]
Vertical p-n junction	0.4–1 @ < 1000 nm	500	< 0.1 @ 5 V	Graphene	2014	[176]
Bolometer p-n diode	0.9–1.8 @ 500–1800 nm	-	-	CNT	2011	[194]
Hetero- p-n junction	0.02–0.64 @ 400–1500 nm	0.031	-	CNT	2009	[196]
Photoconductor	2700 @ visible–1300 nm	$2 \times 10^{-8}$	0.7 mA/cm <sup>2</sup> @ 100 V	PbS QD	2006	[221]
Photodiode	0.2 @ visible–1600 nm	$10^{-3}$	< 0.1 nA/cm <sup>2</sup> short circuit	PbS QD	2009	[218]
MSM	0.96 @ 1300 nm	4	0.015 @ 5 V	InGaAs	1992	[47]
MSM	> 0.4 @ 1520–1630 nm	-	0.27 @ 1 V	InGaAs	2014	[50]
MSM	0.53 @ 1550 nm	-	0.0115 @ 1 V	Ge	2008	[88]
MSM	1.76 @ 1550 nm	1.1	412 @ 5 V	Ge	2013	[92]
MSM/IPE	0.15 @ 1550 nm	1.46	12E–6 @ 5 V	Si	2008	[125]
MSM/IPE	0.00008 @ 1550 nm	> 170	0.1 @ 5 V	Si	2010	[124]
MSM	0.0005 @ 1550 nm	> 100	1.2 @ 4 V	Graphene	2009	[174]
MIM	0.1 @ 700 nm	-	-	Plasmons	2011	[234]
APD	-	120	0.34 @ 5 V	InGaAs	2013	[56]
APD	0.69 @ 1310 nm	270	-	InGaAs	2014	[60]
APD	5.88 @ 1310 nm	340	10 @ 25 V	Ge	2009	[19]
APD	0.75 @ 1550 nm	30	0.184 @ 1 V	Ge	2013	[98]
APD	-	7	1.325 @ 63.7 V	HgCdTe	1997	[144]
APD	13.1 @ 1550 nm	> 100	0.066 @ 77.7 V	HgCdTe	2002	[141]
Hybrid graphene-QD	$10^7$ @ 1450 nm	1	-	Graphene	2012	[159]
Plasmonic electrode	1.081 @ 1550 nm	15.6	0.5 @ 1 V	Plasmons	2010	[20]
Plasmonic electrode	0.0133 @ 1310 nm	-	0.013 @ 0.1 V	Plasmons	2011	[21]
Plasmonic antenna	0.049 @ 1550 nm	270	< 0.1 @ 1 V	Plasmons	2012	[232]

Figura 3.30: Comparación de varios fotodetectores de diferentes estructuras (2). Tomada de [42].

### 3.6. Radiación terahertz para el sistema diseñado

Una vez realizado todos los experimentos para longitudes de onda del espectro visible y el infrarrojo cercano se procedió a irradiar con radiación terahertz la membrana compuesta por PDMS y nanopulvos de carbono. Al incidir la radiación terahertz con una potencia de aproximadamente  $7 \mu\text{W}$  el sistema implementado no es capaz de reportar una salida significativa debido a que el arreglo experimental no es lo suficientemente sensible. Para lograr una mayor sensibilidad habría que obtener membranas con un espesor mucho más delgado, lo cual se convierte en un problema en el momento de retirarlas y manipularlas. Otro factor que puede influir en una mayor sensibilidad sería lograr encapsular todo el sistema de manera que las perturbaciones externas, como el viento y la luz en el ambiente, vibraciones mecánicas, no influyan sobre el mismo.

# Conclusiones

Los detectores de radiación terahertz basados en fenómenos térmicos son muy utilizados en las diferentes áreas de desarrollo tecnológico. En este proyecto se desarrolló un sistema de detección novedoso utilizando compuestos poliméricos con carbono. Los nanopulvos de carbono realizan la función de absorber la radiación incidente y convertirla en energía térmica. Mientras tanto el PDMS tiene un alto coeficiente térmico de expansión de volumen lo cual permite un desplazamiento de la membrana al captar la radiación. Como primera parte del proyecto se realizó la fabricación de las membranas compuestas por PDMS+CNP. Luego se caracterizó el espesor obtenido dependiente de la velocidad de rotación por la técnica de spin-coating. Además se caracterizó la absorción para el espectro visible como prueba inicial. Posteriormente se realizó un arreglo experimental el cual tenía como objetivo medir el pequeño desplazamiento producido por la membrana. Para ello se utilizó la interferometría Fabry-Perot como técnica formada por el final de una fibra óptica monomodal y la membrana compuesta.

El sistema de detección implementado en este trabajo presenta ventajas en comparación con dispositivos muy similares reportados previamente en otros trabajos, lo cual incita a seguir futuras investigaciones sobre el tema. Una de las ventajas presentes es que posee una buena sensibilidad y responsividad en comparación con otros dispositivos de detección. Otra ventaja que tiene es el bajo costo de fabricación de las membranas y el rápido proceso de fabricación.

El sistema de detección implementado posee buenas características para las longitudes de onda del espectro visible y el infrarrojo cercano. La fuente terahertz con la que se contaba en el laboratorio emite a una potencia baja de alrededor de  $7 \mu\text{W}$ , lo cual para las membranas producidas de alrededor de  $30 \mu\text{m}$  no es capaz de dar una señal de salida

perceptible. Teniendo los resultados previos de la buena capacidad de absorción de los nanopulvos de carbono en trabajos anteriores y los resultados presentados en este trabajo del sistema para dos longitudes de onda diferentes, la detección de radiación terahertz queda pendiente a trabajo futuro para ser demostrado. La potencia suministrada para la radiación de las membranas fue de 1mW lo cual es más de 100 veces mayor que la potencia entregada por la fuente terahertz.

Como conclusión general podemos decir que el sistema de detección presenta buenas características para longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo cercano mostrando una sensibilidad de aproximadamente de  $4000 \frac{V}{W}$ . Se recomienda reducir el espesor de las membranas compuestas para que la parte sensora del sistema sea más sensible a la radiación, así como desarrollar un sistema de empaquetamiento para evitar perturbaciones no deseadas. Por lo tanto se puede decir que la detección de radiación terahertz utilizando técnicas interferométricas y aprovechando los fenómenos térmicos constituye un camino a seguir en futuras investigaciones con el objetivo de ampliar el desarrollo en el área de conocimiento de tecnología en THz.

# Apéndice A

## Especificaciones de los materiales utilizados

A.1. PDMS Sylgard 184

A.2. Nanopolvos de carbono

A.3. Fibra óptica SMF28e de la marca Corning.



Technical Data Sheet

**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.

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)	hours	1.5
Cure Time at 25°C	hours	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

Figura A.1: Hoja de especificaciones del 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
- \* 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.

P11344 | ISSUED: JANUARY 2005 | SUPERSEDES: NOVEMBER 2004 | ISO 9001 REGISTERED

Figura A.2: Hoja de especificaciones de la fibra óptica SMF28e.

### 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. $\lambda$ (nm)	Max. $\Delta$ 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 ( $\lambda$ ) by more than the value  $\Delta$ .

##### Macrobend Loss

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

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

##### Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	$\leq 0.05$
1550	$\leq 0.05$

#### Cable Cutoff Wavelength ( $\lambda_{ccf}$ )

$\lambda_{ccf} \leq 1260$  nm

#### Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD ( $\mu$ m)
1310	$9.2 \pm 0.4$
1550	$10.4 \pm 0.5$

#### Dispersion

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

Zero Dispersion Wavelength ( $\lambda_0$ ):  $1302$  nm  $\leq \lambda_0 \leq 1322$  nm

Zero Dispersion Slope ( $S_0$ ):  $\leq 0.089$  ps/(nm $\cdot$ km)

#### Polarization Mode Dispersion (PMD)

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

\*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 PMD<sub>Q</sub>). 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/ $\sqrt$ km maximum PMD.

### Dimensional Specifications

#### Glass Geometry

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

#### Coating Geometry

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

### Environmental Specifications

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

\*Reference temperature = +23°C

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

Figura A.3: Hoja de especificaciones de la fibra óptica SMF28e.

# Apéndice B

## Equipos y elementos utilizados

### B.1. Sistema motorizado MTS50-Z8 de Thorlabs

Para el posicionamiento de la fibra óptica monomodo utilizada en el primer arreglo experimental se utilizó la plataforma de tres ejes MTS50-Z8 de la marca Thorlabs. Este conjunto incluye tres motores con sus respectivos controladores, los cuales permiten configurar la plataforma en los ejes XYZ( ver figura B.1). Para el posicionamiento de la pieza donde es colocada la membrana se utilizó una platina con movimiento manual en los tres ejes.



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

Motion Control

▼ CHAPTERS

Manual Stages

Motorized Stages

Multi-Axis Platforms

Actuators

Controllers

▼ SECTIONS

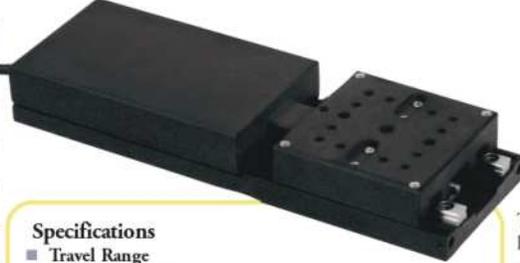
Linear Translation

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<sup>-5</sup> mm (29 nm) linear displacement of the leadscrew per encoder count.

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

512

www.thorlabs.com

**THORLABS**

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

## B.2. Interrogador óptico SM125

El interrogador SM125 de Micron Optics es un equipo de adquisición de señales ópticas (ver figura B.3). Está optimizado para la adquisición rápida de datos de varios sensores; la visualización de datos y ajustes del interrogador se ejecutan en un ordenador. Es capaz de adquirir la respuesta de los dispositivos en un rango de longitudes de onda de 1520 a 1570 nm y en tiempo real.



Figura B.3: Interrogador SM125 Micron-Optics.

Para la adquisición de datos el interrogador cuenta con un software, el cual es un instrumento virtual (VI) que tiene como objetivo principal visualizar la respuesta en frecuencia óptica de los dispositivos conectados a sus canales. Además, el VI visualiza los dos canales disponibles de forma simultánea en el mismo gráfico y almacena los datos del gráfico de un instante. Sin embargo, el VI no brinda la posibilidad de realizar el almacenamiento de datos de forma automatizada, por lo cual fue necesario crear un instrumento virtual que si lo hiciera.

### B.3. Instrumento virtual utilizado

El instrumento virtual utilizado adquiere muestras del espectro cada 0.05 nm, las cuales se almacenan en un archivo de texto *\*.txt*. El usuario puede cambiar el número de muestras a analizar y el tiempo entre ellas. En una muestra hace un barrido completo en longitud de onda de la señal reflejada, la cual es leída y almacenada. Se puede elegir donde se desea almacenar los datos.

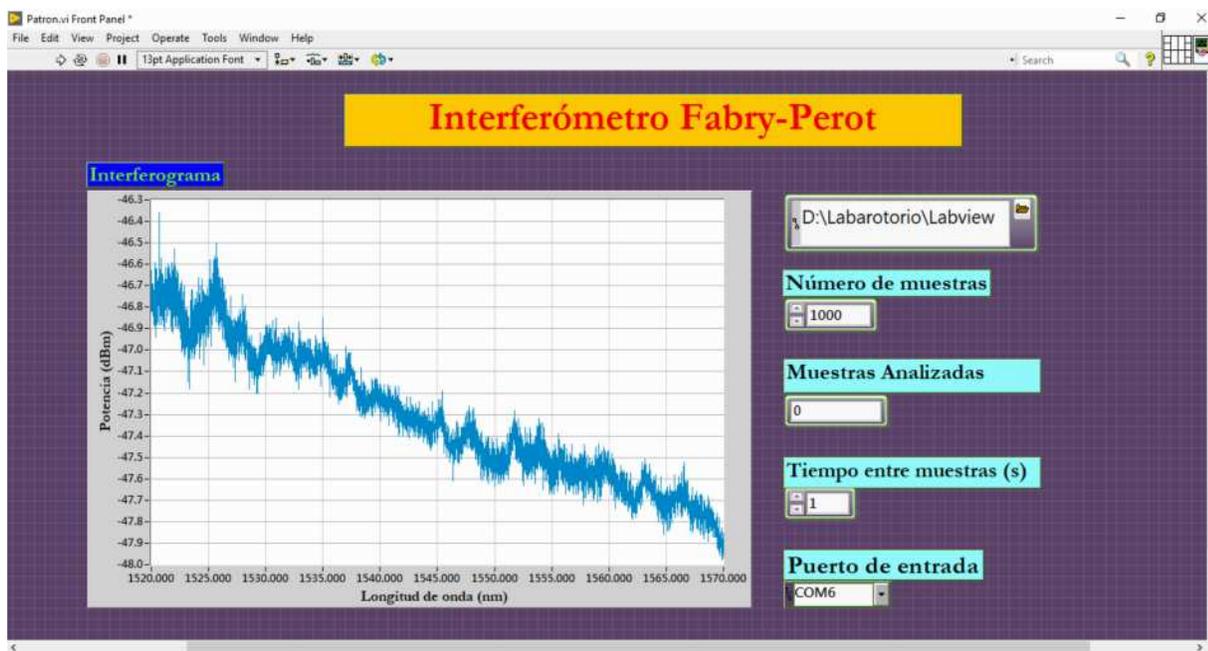


Figura B.4: Patron.vi : Panel frontal.

# Apéndice C

## Equipos y elementos utilizados

### C.1. Diodo láser FPL1009S - 1550 nm

El diodo láser Fabry-Perot FPL1009S de 1550 nm de Thorlabs está alojado en un paquete de mariposa de 14 pines de alto rendimiento y acoplado a 1.5 m de fibra monomodo con conector FC/APC. Dicho diodo se utiliza para iluminar el sistema y poder observar las franjas de interferencia producidas por el final de la fibra óptica y la membrana de PDMS + CNP. Podemos ver una imagen del diodo láser en la figura C.2.



Figura C.1: Diodo láser FPL1009S-1550 nm de Thorlabs.

## Specifications

CW;  $T_{CHIP} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{CASE} = 0 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

FPL1009S				
	Symbol	Min	Typical	Max
<b>Electrical</b>				
Operating Current	$I_{OP}$	-	400 mA	500 mA
Center Wavelength	$\lambda_C$	1530 nm	1550 nm	1570 nm
Spectral Bandwidth (RMS)	$\Delta\lambda$	-	10 nm	20 nm
Output Power over C-Band	$P_{OUT}$	80 mW	100 mW	-
Threshold Current	$I_{TH}$	-	35 mA	55 mA
Slope Efficiency	$\Delta P/\Delta I$	0.2 W/A	0.3 W/A	-
Forward Voltage	$V_F$	-	1.4 V	1.8 V
<b>TEC Operation (Typical / Max @ <math>T_{CASE} = 25\text{ }^{\circ}\text{C} / 70\text{ }^{\circ}\text{C}</math>)</b>				
TEC Current	$I_{TEC}$	-	0.18 A	1.5 A
TEC Voltage	$V_{TEC}$	-	0.5 V	3.5 V
Thermistor Resistance	$R_{TH}$	-	10 k $\Omega$	-

## Performance Plots

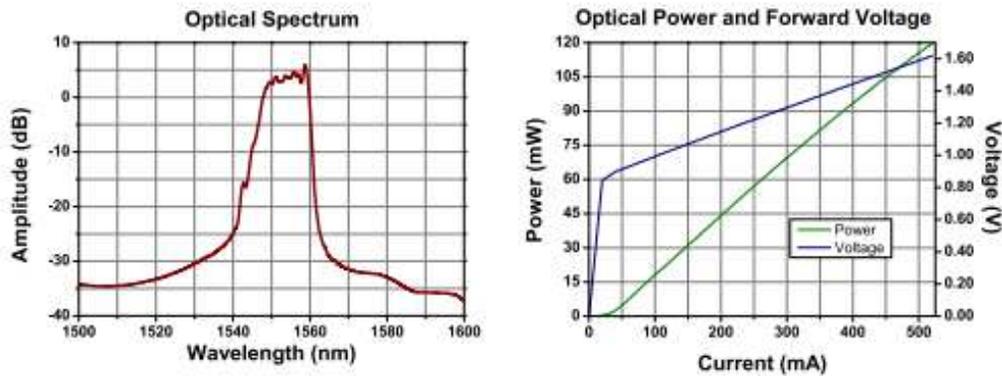


Figura C.2: Especificaciones del diodo láser FPL1009S-1550 nm de Thorlabs.

## C.2. Controlador de diodo láser LDC-3724B

Se utilizó el controlador de diodo láser LDC-3724B de ILX Lightwave que es una combinación de fuente de corriente y controlador de temperatura. La fuente de corriente proporciona una salida de alta estabilidad con un límite de corriente establecido y funciones de protección láser. El controlador de temperatura incorporado puede funcionar con la mayoría de los sensores de temperatura para brindar un control de temperatura láser preciso en una amplia gama de temperaturas. Presenta salidas de comunicación GPIB. Dicho controlador lo podemos observar en la figura C.3.



Figura C.3: Controlador de diodo láser LDC-3724B.

### Laser Current Source Specifications<sup>1</sup>

	LDC-3714C	LDC-3724C	LDC-3744C
<b>DRIVE CURRENT OUTOUT</b>			
Output Current Range	0 to 50 mA 0 to 100 mA	0 to 200 mA 0 to 500 mA	0 to 2000 mA 0 to 4000 mA
Setpoint Resolution	1 $\mu$ A 2 $\mu$ A	4 $\mu$ A 10 $\mu$ A	40 $\mu$ A 80 $\mu$ A
Setpoint Accuracy (% of FS)	$\pm 0.05\%$	$\pm 0.05\%$	$\pm 0.05\%$
Compliance Voltage	0-10V; adjustable	0-10V; adjustable	0-10V; adjustable
Temperature Coefficient	<50 ppm/ $^{\circ}$ C	<50 ppm/ $^{\circ}$ C	<100 ppm/ $^{\circ}$ C
Short-Term Stability (1 hour) <sup>2</sup>	<20 ppm	<20 ppm	<20 ppm
Long-Term Stability (24 hours) <sup>3</sup>	<40 ppm	<40 ppm	<40 ppm
Noise and Ripple ( $\mu$ A rms) <sup>4</sup>			
High Bandwidth Mode	<1.5 $\mu$ A	<4 $\mu$ A	<15 $\mu$ A (lo range) <20 $\mu$ A (hi range)
Low Bandwidth Mode	<1.5 $\mu$ A	<2 $\mu$ A	<10 $\mu$ A
Transients			
Operational <sup>5</sup>	<2 mA	<3 mA	<4 mA
1 kV EFT	<5 mA	<8 mA	<10 mA
Surge <sup>6</sup>	<8 mA	<12 mA	<8 mA
<b>COMPLIANCE VOLTAGE ADJUST</b>			
Range	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V
Resolution	50 mV	50 mV	50 mV
Accuracy	$\pm 2.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 2.5\%$
<b>DRIVE CURRENT LIMIT SETTINGS</b>			
Range	0 to 50.5 mA 0 to 101 mA	0 to 202 mA 0 to 505 mA	0 to 2020 mA 0 to 4040 mA
Resolution	0.25 mA 0.5 mA	1 mA 2.5 mA	10 mA 20 mA
Accuracy	$\pm 0.5$ mA $\pm 1$ mA	$\pm 2$ mA $\pm 5$ mA	$\pm 20$ mA $\pm 40$ mA
<b>PHOTODIODE FEEDBACK</b>			
Type	Differential	Differential	Differential
PD Reverse Bias	0 - 5 V, adjustable	0 - 5 V, adjustable	0 - 5 V, adjustable
PD Current Range	5 to 5000 $\mu$ A	5 to 5000 $\mu$ A	5 to 10000 $\mu$ A
Output Stability <sup>7</sup>	0.02%	0.02%	0.02%

Figura C.4: Especificaciones del controlador de diodo láser LDC-3724B (1).

	LDC-3714C	LDC-3724C	LDC-3744C
Accuracy, setpoint (% of FS)	±0.05%	±0.05%	±0.05%
<b>EXTERNAL ANALOG MODULATION</b>			
Input	0 - 10 V, 1 kΩ	0 - 10 V, 1 kΩ	0 - 10 V, 1 kΩ
Transfer Function	5 mA/V 10 mA/V	20 mA/V 50 mA/V	200 mA/V 400 mA/V
Bandwidth (3 dB) <sup>8</sup>			
High Bandwidth	DC to 1 MHz	DC to 1 MHz	DC to 250kHz
Low Bandwidth	DC to 15 kHz	DC to 15 kHz	DC to 10 kHz
<b>TRIGGER OUTPUT</b>			
Type	TTL	TTL	TTL
Pulse Width	13 μs	13 μs	13 μs
Delay	12 ms	12 ms	12 ms
<b>MEASUREMENT (DISPLAY)</b>			
Output Current Range	0 to 50.000 mA 0 to 100.00 mA	0 to 200.00 mA 0 to 500.00 mA	0 to 2000.0 mA 0 to 4000.0 mA
Output Current Resolution	0.001 mA	0.01 mA	0.1 mA
Output Current Accuracy	±0.05% FS	±0.05% FS	±0.1% FS
Photodiode Current Range	0 to 5000 μA	0 to 5000 μA	0 to 10000 μA
Photodiode Current Resolution	1 μA	1 μA	1 μA
Photodiode Current Accuracy	±2 μA	±2 μA	±4 μA
PD Responsivity Range (μA/mW) <sup>9</sup>	0.00 to 1000.00	0.00 to 1000.00	0.00 to 1000.00
PD Responsivity Resolution (μA/mW)	0.01 for all product ranges		
Optical Power Range (mW)	0.00 to 100.00	0.00 to 500.00	0.00 to 5000.0
Optical Power Resolution (mW)	0.01	0.01	0.1
Forward Voltage Range (V)	0.000 to 10.000	0.000 to 10.000	0.000 to 10.000
Forward Voltage Resolution	1 mV	1 mV	1 mV
Forward Voltage Accuracy <sup>10</sup>	±2 mV	±2 mV	±2 mV

**LASER CURRENT SOURCE NOTES**

1. All values after a one-hour warm-up period at room temperature, 25°C.
2. Over any 1-hour period, half-scale output.
3. Over any 24-hour period, half-scale output.
4. Measured optically, evaluating noise intensity of a laser diode into a photodetector with 150 kHz bandwidth.
5. Maximum output current transient resulting from normal operational situations (e.g., power on-off, current on-off), as well as accidental situations (e.g., power line plug removal).
6. Maximum output current transient resulting from a 1000V power-line transient spike.
7. Maximum monitor photodiode current drift over any 30 minute period. Assumes zero drift in responsivity of photodiode.
8. 50% modulation depth at mid-scale output. Higher bandwidth is possible with smaller modulation signal.
9. Responsivity value is user-defined and is used to calculate the optical power.
10. Four wire voltage measurement at the load. Voltage measurement accuracy while driving calibration load. Accuracy is dependent upon load and cable used.

Figura C.5: Especificaciones del controlador de diodo láser LDC-3724B (2).

**CHAPTER 1 INTRODUCTION AND SPECIFICATIONS**  
*Temperature Controller Specifications<sup>1</sup>*

**Temperature Controller Specifications<sup>1</sup>**

<b>TEMPERATURE CONTROL OUTPUT</b>			
Temperature Control Range <sup>2</sup>	-100.0°C to +199.9°C		
Thermistor Setpoint	Resolution	Accuracy <sup>3</sup>	
	-20°C to 20°C	0.1°C	±0.2°C
	20°C to 50°C	0.2°C	±0.2°C
AD590 & LM335 Setpoint <sup>4</sup>			
	-20°C to 50°C	0.1°C	±0.1°C
Short Term Stability (1 hr) <sup>5</sup>	<0.004°C		
Long Term Stability (24 hrs) <sup>6</sup>	<0.01°C		
Output Type	Bipolar, constant current source		
Compliance Voltage	>8 V DC		
Short Circuit Output Current	4 Amps		
Maximum Output Power	32 Watts		
Current Noise and Ripple <sup>7</sup>	<1 mA rms		
Current Limit Range	0 to 4 Amps		
Current Limit Set Accuracy	±0.05 Amps		
Control Algorithm	Smart Integrator, Hybrid PI		
<b>TEMPERATURE SENSOR</b>			
Types			
Thermistor	NTC (2-wire)		
IC Temperature Sensor	AD590/LM335		
RTD Sensor <sup>8</sup>	Pt <sub>100</sub> /Other 100-ohm RTD		
Thermistor Sensing Current	10 µA/100 µA		
Sensor Bias	AD590 = 8 V	LM335 = 1 mA	RTD = 0.8 mA <sup>8</sup>
Useable Thermistor Range	25 to 450,000 Ω, typical		
Typical Sensor Output <sup>9</sup>			
AD590 Current Output	I(25°C) = 298.2 µA, I <sub>t</sub> = 1 µA/K		
LM335 Voltage Output	V(25°C) = 2.73 V, V <sub>t</sub> = 10 mV/K		
RTD (Pt <sub>100</sub> ) Resistance	R(25°C) = 109.73 Ω		
User Calibration	Thermistor: Steinhart-Hart, 3 constants IC Sensors, RTD = Two-point		

Figura C.6: Especificaciones del controlador de diodo láser LDC-3724B de Newport (3).

TEC MEASUREMENT (DISPLAY)			
	Range <sup>10</sup>	Resolution	Accuracy
Temperature			
10 $\mu$ A Setting <sup>11</sup>	-100.0°C to 199.9°C	0.01°C	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
100 $\mu$ A Setting <sup>12</sup>	-100.0°C to 199.9°C	0.01°C	$\pm 0.05^\circ\text{C}$
Thermistor Resistance			
10 $\mu$ A Setting	0.01 to 450.00 k $\Omega$	0.01 k $\Omega$	$\pm 0.05\%$
100 $\mu$ A Setting	0.001 to 45.000 k $\Omega$	0.001 k $\Omega$	$\pm 0.05\%$
TE Current	-4.000 to 4.000 A	0.001 A	$\pm 0.04$ A
Voltage (remote only) <sup>13</sup>	-10.000 to 10.000 V	1 mV	$\pm 30$ mV

TEMPERATURE CONTROL NOTES

1. All values after a one-hour warm-up period at room temperature, 25°C.
2. Software limits of range. Actual range possible depends on the physical load, thermistor type, and TE module used.
3. Accuracy figures are quoted for a typical 10 k $\Omega$  thermistor and 100  $\mu$ A current setting. Accuracy figures are relative to the calibration standard. Both resolution and accuracy are dependent upon the user-defined configuration of the instrument.
4. Accuracy depends on the sensor model selected, the calibration standard, and the user-defined onfiguration of the instrument.
5. Over any 1-hour period, half-scale output, controlling an LDM-4412 mount @ 25°C, with 10 k $\Omega$  thermistor on 100  $\mu$ A setting.
6. Over any 24-hour period, half-scale output, controlling an LDM-4412 mount @ 25°C, with 10 k $\Omega$  thermistor on 100  $\mu$ A setting.
7. Measured at 1 Amp output over a bandwidth of 10 Hz - 10 MHz.
8. When ordered with TSC-599 RTD Sensor Converter.
9. Nominal temperature coefficients,  $I_t$  and  $V_t$ , apply over the rated IC temperature sensor range.
10. Software limits of display range.
11. Using a 100 k $\Omega$  thermistor, controlling an LDM-4412 mount over -30°C to +25°C.
12. Using a 10 k $\Omega$  thermistor, controlling an LDM-4412 mount over -30°C to +25°C.
13. Voltage measurement accuracy while driving calibration load. Accuracy is dependent upon load used.

General LDC-3700C Specifications

CONNECTORS	
Photodiode Monitor and Current Source Connector	9-pin, D-sub, female
External Modulation Connector	BNC
Temperature Controller	15-pin, D-sub, female
Trigger Output	BNC
Chassis Ground	4 mm banana jack
GPIB INTERFACE	
Meets ANSI/IEEE Std 488.1 - 1987	
Meets ANSI/IEEE Std 488.2 - 1987	
USB INTERFACE	

Figura C.7: Especificaciones del controlador de diodo láser LDC-3724B de Newport (4).

### C.3. Microscopio Digital Usb 2.0 Plugable

Para la visualización del sistema se utilizó un Microscopio Digital Usb 2.0 Plugable, el cual cuenta con 2 Megapíxeles y hasta 250 aumentos. También cuenta con luz LED con control de ajuste de brillo para mejor iluminación.



Figura C.8: Microscopio Digital Usb 2.0 Plugable.

## C.4. Fotodetector de fibra óptica InGaAs D400FC de Thorlabs

D400FC es un fotodetector de Thorlabs de alta velocidad. Posee un conector FC/PC y una batería de polarización interna de 12 V encerrada en un carcasa resistente aislada . El conector de fibra óptica tipo FC/PC proporciona un acoplamiento fácil a fuentes de luz basadas en fibra. La salida utiliza un conector estilo SMA para una respuesta de frecuencia máxima.



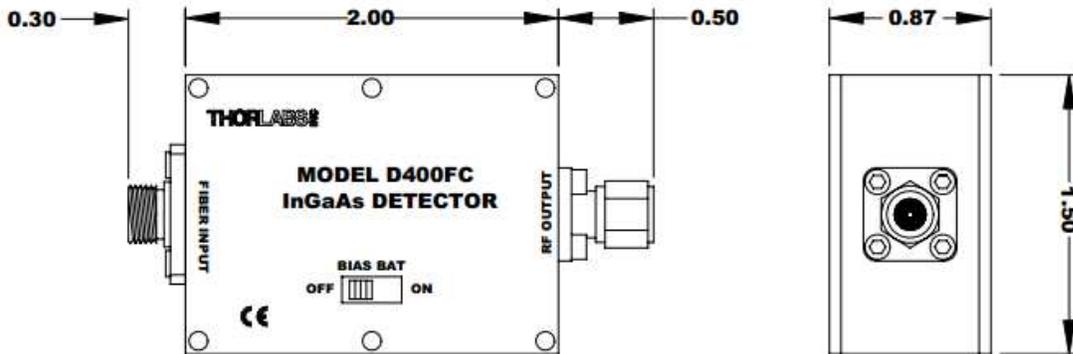
Figura C.9: Fotodetector de fibra óptica InGaAs D400FC de Thorlabs.

**SPECIFICATIONS**

**Detector:** InGaAs Pin  
**Spectral Response:** 800-1700nm  
**Peak Response:** 0.95 A/W @ 1550nm  
**Rise/Fall Time:** 0.1ns  
**Diode Capacitance:** 0.7pF (typ)  
**NEP @ 1550nm:**  $1.0 \times 10^{-15} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$   
**Dark Current:** 0.7nA (typ)  
 1.0nA (max)  
**PD Active Diameter:** 0.1 mm  
**Bandwidth:** 1GHz (min)  
**Operating Temp:** 0 to 40°C  
**Storage Temp:** 0 to 40°C  
**Damage Threshold:** 70 mW (max)

**Housing:** Black Anodized Aluminum  
**Size:** 2.8" x 1.5" x 0.9"  
**Bias:** 12V Battery (Type A23)  
**Output:** SMA Plug  
**Input:** FC/PC bulkhead fiber connector  
**Ball Lens Size:** Ø0.058" (Ø1.47 mm)  
**Reflective Index of lens:** 1.482 @ 675nm  
**Coupling Efficiency:** 92% (typ) into both single and multi-mode fibers over full spectral response of detector.  
**Field of View (FOV):** 48°

\* Note: The D400FC is not compatible with FC/APC fiber connectors.



Reference Thorlabs Drawing No. 2121-ED1 Rev B.  
 All units in inches.

Figura C.10: Especificaciones del fotodetector de fibra óptica InGaAs D400FC de Thorlabs.

## C.5. Tarjeta de adquisición de datos de National Instruments USB-6000

La tarjeta de adquisición de datos (DAQ) USB-6000 es un dispositivo multifunción de bajo costo. Ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits. El USB-6000 brinda funcionalidad básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. El dispositivo tiene una cubierta mecánica ligera y es energizado por bus para fácil portabilidad. Puede conectar fácilmente sensores y señales al USB-6000 con conectividad de terminal de tornillo. El controlador NI-DAQmx y la utilidad de configuración que están incluidos simplifican la configuración y las medidas. Posee 8 entradas analógicas con una velocidad máxima de muestreo de 10000 muestras por segundo y 4 salidas digitales. Las entradas analógicas tienen una resolución de 12 bits.



Figura C.11: USB-6000 de National Instruments.

## C.6. Instrumento virtual utilizado

Para poder visualizar la información procedente del detector D400FC fue necesario crear un instrumento virtual (VI). El VI te permite seleccionar la entrada analógica a la cual hiciste la conexión proveniente del detector. Pues cambiar el número de muestras y la razón de muestreo, aunque por cuestiones de la tarjeta de adquisición no es posible de rebasar los 10000 Hz. Cuando le presiones el botón de parar, te da la opción de escoger la carpeta donde deseas guardar tu archivo. A continuación se muestra como se ve gráficamente el VI.

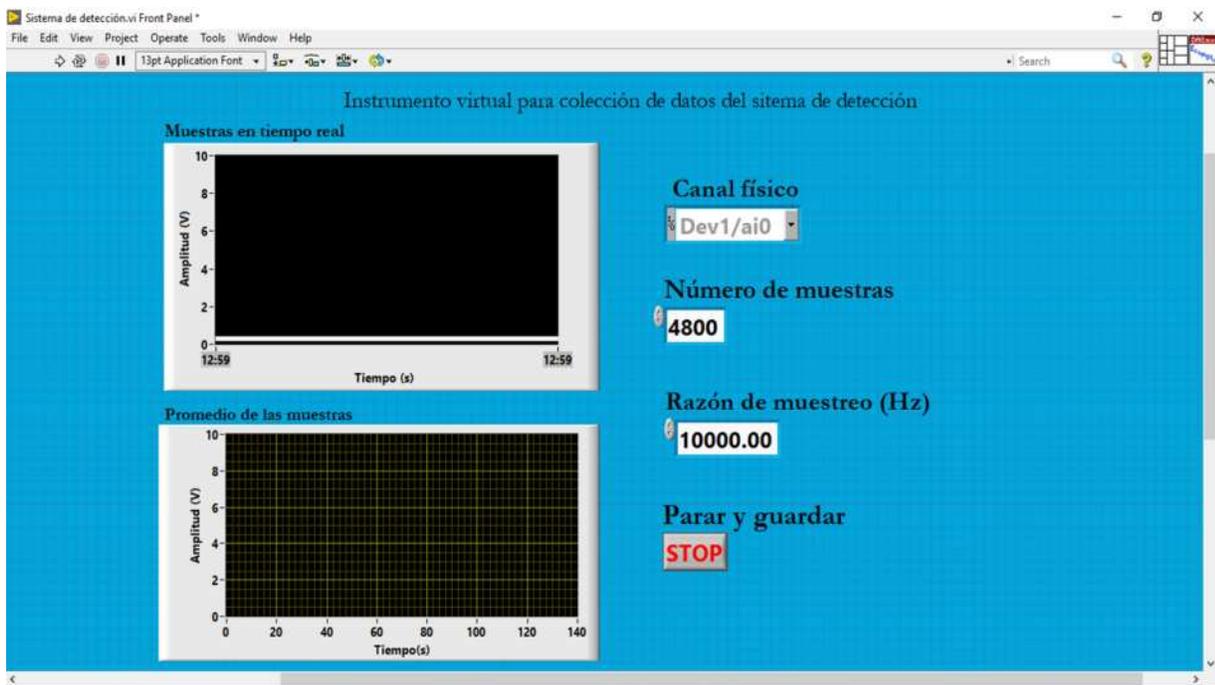


Figura C.12: Instrumento virtual utilizado para la detección de radiación.

# Bibliografía

- [1] Jen-Tang Lu, Chih-Hsien Lai, Tzu-Fang Tseng, Hua Chen, Yuan-Fu Tsai, I-Ju Chen, Yuh-Jing Hwang, Hung chun Chang, and Chi-Kuang Sun. Terahertz polarization-sensitive rectangular pipe waveguides. *Opt. Express*, 19(22):21532–21539, Oct 2011.
- [2] Hu Tao, Willie Padilla, Xin Zhang, and Richard Averitt. Recent progress in electromagnetic metamaterial devices for terahertz applications. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 17:92 – 101, 03 2011.
- [3] M. Shur. Terahertz technology: devices and applications. In *Proceedings of the 31st European Solid-State Circuits Conference, 2005. ESSCIRC 2005.*, pages 13–21, 2005.
- [4] Edmund Linfield. Terahertz applications: A source of fresh hope. *Nature Photonics*, 1:257–258, 05 2007.
- [5] Jia Du, K.W. Smart, Lequn Li, Keith Leslie, Stephen Hanham, D.H.C. Wang, Catherine Foley, F Ji, X.D. Li, and D.Z. Zeng. A cryogen-free hts josephson junction detector for terahertz imaging. *Superconductor Science and Technology*, 28:084001, 08 2015.
- [6] Mikhail E. Portnoi, Oleg V. Kibis, and Marcelo Rosenau da Costa. Terahertz emitters and detectors based on carbon nanotubes. In Akhlesh Lakhtakia and Sergey A. Maksimenko, editors, *Nanomodeling II*, volume 6328, pages 33 – 40. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006.
- [7] X.-C Zhang and Jingzhou Xu. *Introduction to THz Wave Photonics*. 01 2010.
- [8] S.M. Sze and K.K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, 2006.

- [9] Daniel Mittleman. *Sensing with Terahertz Radiation*. 01 2003.
- [10] Peter Siegel. Terahertz pioneer: David h. auston. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 1:6–8, 09 2011.
- [11] Yiwen Sun, Ming Sy, Yi-Xiáng Wáng, Anil Ahuja, Yuan-Ting Zhang, and Emma Pickwell-MacPherson. A promising diagnostic method: Terahertz pulsed imaging and spectroscopy. *World journal of radiology*, 3:55–65, 03 2011.
- [12] D. Grischkowsky, Søren Keiding, Martin van Exter, and Ch. Fattinger. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors. *J. Opt. Soc. Am. B*, 7(10):2006–2015, Oct 1990.
- [13] Molecular-gas lasers. *IEEE Spectrum*, 4(1):19–19, 1967.
- [14] Alain Maestrini, Bertrand Thomas, Hui Wang, Cecile Jung-Kubiak, Jeanne Treuttel, Yong Jin, Goutam Chattopadhyay, Imran Mehdi, and Gérard Beaudin. Schottky diode-based terahertz frequency multipliers and mixers. *Comptes Rendus Physique - C R PHYS*, 11:480–495, 08 2010.
- [15] Fedir Sizov and Antoni Rogalski. Thz detectors. *Progress in Quantum Electronics - PROG QUANTUM ELECTRON*, 34:278–347, 09 2010.
- [16] Katsuhiko Ajito and Yuko Ueno. Thz chemical imaging for biological applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1:293–300, 09 2011.
- [17] Koichiro Tanaka, Hideki Hirori, and Masaya Nagai. Thz nonlinear spectroscopy of solids. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology - TTHZ*, 1:301–312, 09 2011.
- [18] Amaia Mangado del Rincón. *Procesado de imágenes en terahercios en 3d*. 2012.
- [19] Ken Cooper, Robert Dengler, Nuria Llombart, Bertrand Thomas, Goutam Chattopadhyay, and Peter Siegel. Thz imaging radar for standoff personnel screening. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 1:169 – 182, 10 2011.

- [20] Sherif Ahmed, Andreas Genghammer, Andreas Schiessl, and Lorenz-Peter Schmidt. Fully electronic active e-band personnel imager with 2 m<sup>2</sup> aperture. pages 1–3, 06 2012.
- [21] Jae-Sung Rieh and Dong-Hyun Kim. An overview of semiconductor technologies and circuits for terahertz communication applications. pages 1 – 6, 01 2010.
- [22] Yihong Yang, Mahboubeh Mandegar, and Daniel Grischkowsky. Broadband thz pulse transmission through the atmosphere. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 1:264 – 273, 10 2011.
- [23] Seung Oh, Jihye Choi, Inhee Maeng, Jae Yeon Park, Kwangyeol Lee, Yong-Min Huh, Jin-suck Suh, Seungjoo Haam, and Joo-Hiuk Son. Molecular imaging with terahertz waves. *Optics express*, 19:4009–16, 02 2011.
- [24] Kaori Fukunaga and Picollo Marcello. Characterisation of works of art. *Terahertz Spectroscopy and Imaging, Springer Series in Optical Sciences, Volume 171. ISBN 978-3-642-29563-8. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, p. 521, 171:521–*, 01 2013.
- [25] Sung-Liang Chen, You-Chia Chang, Cheng Zhang, Jong G. Ok, Tao Ling, Momchil T. Mihnev, Theodore B. Norris, and L. Jay Guo. Efficient real-time detection of terahertz pulse radiation based on photoacoustic conversion by carbon nanotube nanocomposite. *Nature Photonics*, 8(7):537–542, July 2014.
- [26] Zhixin Wang. Polydimethylsiloxane mechanical properties measured by macroscopic compression and nanoindentation techniques. 01 2011.
- [27] Eun Sang Jung, Taek-Hyun Oh, and Sejin Kwon. Micro pdms hydrogen generator using hydrolysis of sodium borohydride over cobalt nickel-foam catalyst and immobilized cobalt-ph 3 po / pdms / sio 2 catalyst. 2011.
- [28] Céline Stoquart, Pierre Servais, Pierre Berube, and Benoit Barbeau. Hybrid membrane processes using activated carbon treatment for drinking water: A review. *Journal of Membrane Science*, 411-412:1–12, 09 2012.

- [29] Amirhossein Houshmand, Wan Daud, Min-Gyu Lee, and Mohammad Saleh Shafeeyan. Carbon dioxide capture with amine-grafted activated carbon. *Water, Air, Soil Pollution*, 223:827–835, 02 2011.
- [30] Sankararaman S. and M S Swapna. *SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF CARBON NANOPARTICLES BY COMBUSTION METHOD*. PhD thesis, 08 2018.
- [31] Andrei Nemilentsau, G Slepyan, and Sergey Maksimenko. Thermal radiation from carbon nanotubes in the terahertz range. *Physical review letters*, 99:147403, 11 2007.
- [32] Richard Hartmann, Junichiro Kono, and Mikhail Portnoi. Terahertz science and technology of carbon nanomaterials. *Nanotechnology*, 25, 11 2013.
- [33] Reinher Pimentel-Domínguez, Amado M. Velázquez-Benítez, J. Rodrigo Vélez-Cordero, Mathieu Hautefeuille, Francisco Sánchez-Arévalo, and Juan Hernández-Cordero. Photothermal effects and applications of polydimethylsiloxane membranes with carbon nanoparticles. *Polymers*, 8(4):84, Mar 2016. 30979195[pmid].
- [34] Jeff Hecht. Short history of laser development. *Applied optics*, 49:F99–122, 09 2010.
- [35] C.E. Png, Song Sun, and Bai Ping. State-of-the-art photodetectors for optoelectronic integration at telecommunication wavelength. *Nanophotonics*, 4, 06 2015.
- [36] Ming-Jun Li and D.A. Nolan. Optical transmission fiber design evolution. *Lightwave Technology, Journal of*, 26:1079–1092, 06 2008.
- [37] Banshi Dhar Gupta. *Fiber optic sensors: principles and applications*. New India Publishing, 2006.
- [38] A Reza, S Tofighi, M Bathaee, and F Farm. Optical fiber interferometers and their applications. *Interferometry—Research and Applications in Science and Technology; Padron, I., Ed*, 2012.
- [39] Douglas L. Franzen and Ernest M. Kim. Long optical-fiber fabry-perot interferometers. *Appl. Opt.*, 20(23):3991–3992, Dec 1981.

- [40] Z.L. Ran, Y.J. Rao, W.J. Liu, Xianhao Liao, and K.S. Chiang. Laser-micromachined fabry-perot optical fiber tip sensor for high resolution temperature independent measurement of refractive index. *Optics express*, 16:2252–63, 03 2008.
- [41] P. C. Beard and T. N. Mills. Extrinsic optical-fiber ultrasound sensor using a thin polymer film as a low-finesse fabry–perot interferometer. *Appl. Opt.*, 35(4):663–675, Feb 1996.
- [42] C.E. Png, Song Sun, and Bai Ping. State-of-the-art photodetectors for optoelectronic integration at telecommunication wavelength. *Nanophotonics*, 4, 06 2015.