



Universidad  
Rey Juan Carlos

ESCUELA DE INGENIERÍA DE  
FUENLABRADA

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS  
DE TELECOMUNICACIÓN

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE  
FOTORRECEPTOR ÓPTICO PARA  
INTERFEROMETRÍA

Autor: Adrián Murillo Morán

Tutor: Jesús Palací López

Curso académico 2023/24



# Agradecimientos

Después de un largo e intenso periodo de estudios universitarios en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación, termino esta etapa de mi vida con este Trabajo de Fin de Grado. Si he conseguido llegar hasta aquí no ha sido solo por mi esfuerzo, sino también por todas las personas que han estado apoyándome a lo largo de todo este tiempo.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres todo el apoyo recibido a lo largo de mi vida como estudiante. Gracias por haber estado a mi lado durante todo este tiempo y por darme la oportunidad de estudiar lo que me gustaba, nunca podré devolveros todo lo que habéis hecho por mí.

Otra persona a la que tengo mucho que agradecer es a mi hermana Nerea. Con tu forma de ser, me has sacado más de una sonrisa en los peores momentos y me has dado las fuerzas necesarias para no rendirme. Gracias por ser uno de mis mayores apoyos, sin ti no habría llegado hasta aquí.

También me gustaría dar las gracias a mis abuelos por cuidarme y preocuparse siempre por mí, y al resto de mi familia por todo lo que han hecho desde que tengo uso de razón. Mil gracias por estar siempre ahí dándome consejo y apoyo siempre, y por ayudarme en todo lo que habéis podido.

Asimismo, quisiera expresar mi gratitud a todos mis amigos por ser un pilar fundamental en mi vida. En especial, quisiera dedicar un agradecimiento a Sara por escucharme y hacerme reír en los peores momentos; y a Silvia, por ayudarme a desconectar con nuestros planes improvisados y por confiar en mí cuando incluso ni yo mismo lo hacía.

Por último, quiero dar mi más sincero agradecimiento a mi tutor Jesús por estar siempre dispuesto a ayudar y a resolver dudas, mostrando su compromiso con este proyecto.

# Resumen

La luz y la óptica han abarcado una extensa variedad de aplicaciones a lo largo de la historia, desde las primeras lentes simples empleadas para aumentar el tamaño de objetos, hasta grandes inventos como telescopios utilizados para realizar observaciones astronómicas, microscopios para la investigación científica e incluso cámaras fotográficas utilizadas para capturar imágenes, que supusieron grandes cambios para la humanidad. Durante el siglo XX se produjeron una gran cantidad de avances en este campo que cambiaron por completo nuestra forma de vida, tales como la invención de la fibra óptica para la transmisión de información, el desarrollo de sensores ópticos avanzados para una amplia variedad de aplicaciones, el uso de la interferometría para realizar medidas de alta precisión, o la creación del láser para la emisión de luz coherente. Actualmente, la tecnología óptica tiene multitud de aplicaciones en muchos campos diferentes, incluyendo las telecomunicaciones, la medicina, la industria, la investigación científica y la astronomía.

En este Trabajo de Fin de Grado se llevará a cabo el diseño y la implementación de un fotorreceptor para su uso en un interferómetro, siendo este proceso dividido en tres etapas generales. Durante la primera etapa se fabricará y calibrará un interferómetro de Michelson con el que se obtendrán medidas de desplazamiento de uno de sus espejos, empleando para ello un fotorreceptor comercial y un osciloscopio. A continuación, se procederá a una segunda etapa en la que se llevará a cabo el diseño del fotorreceptor y su posterior soldadura. Durante la etapa final este fotorreceptor se incorporará al interferómetro sustituyendo al empleado previamente, para probar su correcto funcionamiento en la obtención de medidas de desplazamiento de forma análoga a la primera etapa.

# Abstract

Light and optics have covered a wide variety of applications throughout history, from the first simple lenses used to magnify objects' size, to great inventions such as telescopes used for astronomical observations, microscopes for scientific research and even cameras used to take pictures, which meant great changes for humanity. During the 20th century, many advances occurred in this field that completely changed our way of life, such as the invention of optical fiber for information transmission, advanced optical sensors development for a wide variety of applications, the use of interferometry to make high-precision measurements, or laser creation for coherent light emission. Currently, optical technology has numerous applications in many different fields, including telecommunications, medicine, industry, scientific research and astronomy.

In this bachelor's Thesis, photoreceptor's design and implementation will be carried out for its use in an interferometer, a process which can be divided into three general stages. During the first stage, a Michelson interferometer will be made and calibrated in order to obtain displacement measurements of one of its mirrors, using a commercial photoreceptor and an oscilloscope. Next, a second stage will proceed in which the design of the photoreceptor and its subsequent welding will be performed. During the final stage, this photoreceptor will be incorporated into the interferometer, replacing the one that was used previously, to test its correct operation when obtaining displacement measurements similarly to the first stage.

# Contenidos

Capítulo 1	Introducción.....	1
1.1	Contexto y motivación.....	1
1.2	Objetivos generales y específicos .....	3
1.3	Metodología .....	3
1.4	Estructura de la memoria .....	4
Capítulo 2	Estado del arte .....	6
2.1	Propagación de la luz y fibra óptica.....	6
2.2	Fundamentos de semiconductores .....	12
2.3	Láseres semiconductores .....	13
2.3.1	Propiedades del láser .....	14
2.3.2	Física láser .....	14
2.3.3	Tipos de láseres semiconductores .....	17
2.4	Fotodetectores .....	19
2.4.1	Propiedades de un fotodetector .....	19
2.4.2	Tipos de fotodiodo.....	20
2.5	Sensores ópticos.....	23
2.5.1	Sensores en fibra óptica.....	23
2.5.2	Sensores en espacio libre .....	28
2.6	Interferometría .....	31
2.6.1	Interferómetros de dos haces .....	32
2.6.2	Interferometría con múltiples haces .....	33
2.6.3	Aplicaciones de la interferometría.....	35

2.7	Controladores láser y receptores ópticos .....	39
2.7.1	Controladores láser y modos de operación.....	39
2.7.2	Receptores ópticos y diseño de front end .....	41
Capítulo 3	Interferómetro óptico .....	44
3.1	Longitud de coherencia.....	44
3.2	Implementación del interferómetro.....	45
3.2.1	Fuente láser.....	47
3.2.2	Medidor de potencia .....	48
3.2.3	Fotorreceptor comercial.....	49
3.2.4	Osciloscopio .....	50
3.2.5	Tarjeta de detección.....	50
3.2.6	Optomecánica .....	51
3.3	Balance de potencia .....	52
3.4	Interferograma .....	55
Capítulo 4	Diseño del fotorreceptor .....	63
4.1	Captura de especificaciones.....	63
4.2	Selección de componentes .....	64
4.2.1	Fotodiodo.....	64
4.2.2	Amplificador operacional .....	65
4.2.3	Placa PCB .....	65
4.2.4	Impresora 3D .....	66
4.3	Diseño y simulación del fotorreceptor .....	66
4.3.1	Diseño del amplificador de transimpedancia.....	68
4.3.2	Diseño de la segunda etapa amplificadora .....	73
4.4	Integración del fotorreceptor en la placa .....	76
4.5	Diseño del encapsulado del fotorreceptor.....	76
4.6	Prueba de campo .....	77

Capítulo 5	Conclusiones.....	82
5.1	Consecución de objetivos .....	82
5.2	Aplicación de lo aprendido en el grado .....	83
5.3	Lecciones aprendidas en el proyecto .....	83
5.4	Trabajo futuro .....	84
Bibliografía	.....	86

# Índice de figuras

Figura 1.1: Evolución de los ingresos en el mercado de la fotónica .....	2
Figura 2.1: Fenómenos de refracción y reflexión.....	7
Figura 2.2: Diferentes tipos de lentes .....	8
Figura 2.3: Tipos de espejos curvos .....	9
Figura 2.4: Estructura de una fibra óptica .....	9
Figura 2.5: Reflexión total interna (haz verde).....	10
Figura 2.6: Estructura de materiales semiconductores extrínsecos .....	12
Figura 2.7: Tipos de uniones PN .....	13
Figura 2.8: Fundamento físico de la detección y generación de luz.....	15
Figura 2.9: Representación de los modos longitudinales de un láser .....	16
Figura 2.10: Tipos de estructuras láser .....	18
Figura 2.11: Diferencias de la estructura de un VCSEL .....	19
Figura 2.12: Estructura de fotodiodos PN y PIN.....	21
Figura 2.13: Estructura de un fotodiodo APD .....	22
Figura 2.14: Principio de funcionamiento de FBG .....	25
Figura 2.15: Gráfica OTDR.....	26
Figura 2.16: Espectro de la luz dispersada .....	26
Figura 2.17: Configuraciones de sensores DTS y DTSS .....	28
Figura 2.18: Tipos de barreras de luz .....	29
Figura 2.19: Principio de funcionamiento de un sensor de lluvia .....	30
Figura 2.20: Tipos de LiDAR.....	30
Figura 2.21: Imágenes de la superficie captadas por un ratón óptico.....	31
Figura 2.22: Diferentes tipos de interferómetro .....	33
Figura 2.23: Interferómetro de Fabry-Pérot .....	35
Figura 2.24: Interferómetro LIGO en Hanford.....	35
Figura 2.25: Estructura de un interferómetro LIGO.....	36
Figura 2.26: Imagen de retina empleando técnicas de OCT.....	37

Figura 2.27: Implementación de técnicas OCT .....	38
Figura 2.28: Principio de funcionamiento de InSAR .....	38
Figura 2.29: Interferograma del Valle de Napa tras un terremoto.....	39
Figura 2.30: Controlador láser comercial .....	40
Figura 2.31: Circuitos de controladores láser .....	41
Figura 2.32: Receptores ópticos comerciales .....	42
Figura 2.33: Diferentes topologías de front-end.....	43
Figura 3.1: Diseño esquemático del interferómetro .....	46
Figura 3.2: Montaje del interferómetro tras su calibración .....	47
Figura 3.3: Fuente láser TLX1 .....	47
Figura 3.4: Diagrama de bloques del equipo TLX1 .....	48
Figura 3.5: Kit PM122D .....	48
Figura 3.6: Respuesta del sensor S122C .....	49
Figura 3.7: Fotorreceptor PDA10CS2 .....	49
Figura 3.8: Respuesta del fotorreceptor PDA10CS2.....	50
Figura 3.9: Osciloscopio WaveRunner 6051 .....	50
Figura 3.10: Tarjeta de detección VRC2 .....	51
Figura 3.11: Montura y colimador empleados .....	52
Figura 3.12: Posiciones del sensor para medir la potencia.....	53
Figura 3.13: Situaciones de bloqueo en cada brazo.....	54
Figura 3.14: Incorporación del altavoz al interferómetro.....	58
Figura 3.15: Interferogramas por toque y por vibración a 1 kHz .....	58
Figura 3.16: Interferogramas por toque y por vibración a diferentes frecuencias.....	60
Figura 3.17: Desplazamiento del espejo por vibración a diferentes frecuencias.....	62
Figura 4.1: Fotodiodo FGA015 .....	64
Figura 4.2: Responsividad del fotodiodo FGA015.....	64
Figura 4.3: Amplificador operacional OP270 .....	65
Figura 4.4: Configuración de los pines del amplificador operacional OP270.....	65
Figura 4.5: Kit de placas.....	66
Figura 4.6: Impresora 3D Anet A8 .....	66
Figura 4.7: Descarga del modelo OP270.....	67
Figura 4.8: Creación del amplificador operacional OP270 en LTSpice.....	67
Figura 4.9: Cambio del nombre de los puertos.....	68
Figura 4.10: Parámetros de la corriente sinusoidal elegida .....	70

Figura 4.11: Simulación del TIA en LTSpice .....	70
Figura 4.12: Gráficas del TIA sin filtro .....	71
Figura 4.13: Gráficas del TIA con filtro de continua .....	72
Figura 4.14: Circuito con filtro de continua a la entrada del TIA .....	72
Figura 4.15: Esquema de configuración de un amplificador no inversor.....	73
Figura 4.16: Segunda etapa de amplificación.....	74
Figura 4.17: Gráficas de la 2ª etapa y efecto del slew rate .....	74
Figura 4.18: Diseño final del fotorreceptor .....	75
Figura 4.19: Fotorreceptor soldado en la placa .....	76
Figura 4.20: Diseño de las piezas del encapsulado del fotorreceptor.....	77
Figura 4.21: Fotorreceptor montado en el interferómetro .....	78
Figura 4.22: Conexiones del fotorreceptor .....	78
Figura 4.23: Interferogramas por toque y por vibración a diferentes frecuencias.....	80
Figura 4.24: Desplazamiento del espejo por vibración a diferentes frecuencias.....	81

# Índice de tablas

Tabla 1.1: Diagrama de Gantt.....	4
Tabla 2.1: Tipos de clasificación de sensores de fibra óptica .....	24
Tabla 3.1: Valores de potencia de salida y en cada brazo .....	53
Tabla 3.2: Valores de potencia a la entrada del fotorreceptor .....	55
Tabla 3.3: Parámetros del interferómetro con el fotorreceptor comercial.....	56
Tabla 3.4: Datos obtenidos de los interferogramas .....	61
Tabla 4.1: Valores de potencia y corriente para el diseño del fotorreceptor .....	64
Tabla 4.2: Parámetros de diseño de TIA .....	69
Tabla 4.3: Parámetros del interferómetro con nuestro fotorreceptor.....	79
Tabla 4.4: Datos obtenidos de los interferogramas .....	80

# Capítulo 1

## Introducción

Este primer capítulo tiene como objetivo establecer las bases generales que motivan el desarrollo de este proyecto a partir del cumplimiento de una serie de objetivos. También queda reflejada la planificación del proyecto, incluyendo las fases generales en las que se divide y la duración temporal de éstas; así como la estructura que sigue esta memoria.

### 1.1 Contexto y motivación

A pesar de que la luz ha sido estudiada y utilizada desde hace siglos, no fue hasta principios del siglo XX que Planck y Einstein demostraron que la luz, al igual que otros tipos de radiación electromagnética, puede tratarse como ondas y como partículas de energía llamadas fotones [1]. Este descubrimiento, junto con la invención del láser en 1960, sentó las bases para el surgimiento de la fotónica, siendo ésta la ciencia que se centra en las aplicaciones de la luz y en las tecnologías capaces de generarla, detectarla y manipularla. Su impacto en la economía mundial ha llevado a que el siglo XXI sea conocido como la Era del Fotón, al ser la fotónica una tecnología clave en muchos ámbitos de la vida moderna. La fotónica se utiliza en una gran variedad de aplicaciones, entre las que se incluyen las telecomunicaciones, la medicina y la industria, diferentes tipos de sensores ópticos, tecnología de defensa y seguridad, y electrónica de consumo (como controles remotos de televisión y escáneres de códigos de barras). La Figura 1.1 muestra la evolución de los ingresos en diferentes ámbitos desde 2012 hasta 2021.

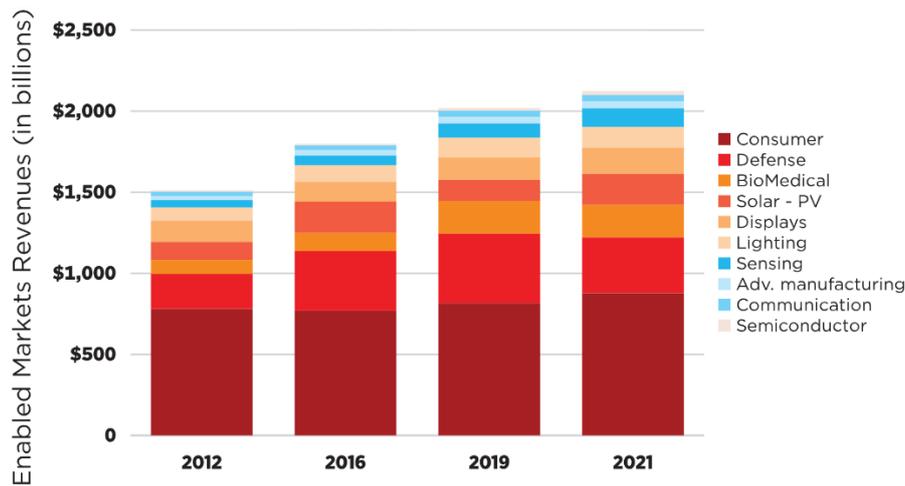


Figura 1.1: Evolución de los ingresos en el mercado de la fotónica [1]

Debido a su naturaleza ondulatoria, la luz puede producir interferencias cuando dos o más ondas se combinan, efecto que constituye la base de la interferometría. Esta técnica permite realizar mediciones extremadamente precisas a partir del patrón de interferencia producido por pequeños cambios en la diferencia de camino óptico de ambos haces gracias a la reducida longitud de onda de la luz, siendo de vital importancia la óptica y la fotónica debido al uso de fuentes ópticas, detectores, divisores de haz y otros elementos ópticos. Durante muchos años, la fuente óptica utilizada era una lámpara de vapor de mercurio que iluminaba un pequeño agujero a través de un filtro que seleccionaba una única línea espectral con el fin de obtener luz monocromática, aunque este método no podía proveer una gran cantidad de luz ni coherencia. La invención del láser resolvió estos inconvenientes y supuso una revolución en la interferometría, permitiendo muchísimos avances [2]. La interferometría se utiliza en muchos campos diferentes, abarcando la física y la astronomía, donde se emplea en la observación espacial a través de la combinación de señales de varios telescopios y en la detección de ondas gravitacionales; la ingeniería y las ciencias aplicadas para la medición de pequeños desplazamientos, variaciones en el índice de refracción de los materiales, irregularidades de superficies e incluso sensores interferométricos para medir cambios de temperatura y tensión; y la biología con el uso de biosensores para obtener medidas precisas de tejidos, células e incluso biomoléculas [3, 4].

La motivación de este proyecto es comprobar y demostrar la precisión en la medición de desplazamientos del orden de nanómetros a través de la interferometría, implementando para ello un interferómetro utilizando diferentes componentes ópticos y equipos de

laboratorio, así como llevando a cabo la fabricación de un fotorreceptor óptico de bajo coste que permitirá la obtención de dichas medidas de desplazamiento.

## 1.2 Objetivos generales y específicos

Los objetivos generales de este Trabajo de Fin de Grado se centran en el diseño y desarrollo de un fotorreceptor para su uso en un interferómetro, con el fin de obtener medidas de desplazamiento de uno de sus espejos a través de diferentes estímulos: toques y vibraciones causadas por tonos a frecuencias audibles.

Al mismo tiempo, estos objetivos generales derivan una serie de objetivos específicos que incluyen el aprendizaje de las bases y aplicaciones de la tecnología óptica y los pasos a seguir para la implementación de un interferómetro, incluyendo la selección de los componentes empleados tanto en el interferómetro como en la fabricación del fotorreceptor. Por otra parte, se pretende adquirir habilidades experimentales en el uso de equipos de laboratorio tales como la impresora 3D, el osciloscopio y el soldador de estaño; además de la familiarización con el programa LTSpice para el diseño y simulación del circuito del fotorreceptor, así como con Fusion 360 y Ultimaker Cura para el diseño de impresión 3D.

## 1.3 Metodología

Este proyecto comienza a plantearse en octubre de 2022 tras la finalización de las prácticas externas y su duración se extiende durante un periodo de tiempo de 12 meses. De forma general, su desarrollo se divide en 4 fases diferentes que quedan definidas a continuación, quedando reflejado en la Tabla 1.1 los meses dedicados a cada una de ellas.

- *Definición del trabajo:* Durante esta fase, se realizó una definición e idea general sobre el proyecto, fijando los puntos de investigación para el desarrollo del estado del arte y las pautas para el diseño del interferómetro y del fotorreceptor.
- *Estudio del estado del arte:* A lo largo del primer mes se llevó a cabo una recopilación de diferentes fuentes bibliográficas que sirvieran, de forma general, para la elaboración de la memoria. Posteriormente, se fueron incluyendo fuentes adicionales, a la par que se realizaba la escritura de la memoria, con el fin de obtener información más específica y figuras ilustrativas del contenido.
- *Trabajo práctico:* Una vez completada casi por completo la sección de la memoria dedicada al estado del arte, se realizó en primer lugar una búsqueda de un chip

amplificador cuyas prestaciones fueran idóneas para el diseño y fabricación del fotorreceptor. A continuación, se realizó la montura y calibración de un interferómetro de Michelson empleando un fotorreceptor comercial a partir del cual se realizaron medidas del desplazamiento de uno de los espejos del interferómetro ocasionadas por diferentes estímulos: toques y sonido a diferentes frecuencias; a la par que se realizaba una simulación de diseño de un fotorreceptor para la elección de los componentes adecuados. Tras ello, se realizó la fabricación del fotorreceptor en cuestión, que sustituyó al fotorreceptor comercial en el interferómetro y se empleó también para tomar medidas de desplazamiento de forma análoga.

- *Escritura de la memoria:* Esta fase se inició tras el estudio genérico del estado del arte, para posteriormente llevarse a cabo de manera simultánea con el trabajo práctico para incluir la información pertinente en la memoria; así como con la búsqueda de fuentes bibliográficas específicas con el fin de ampliar y complementar el estado del arte inicial. También se continuó trabajando durante esta fase tras finalizar las otras etapas para corregir y mejorar la memoria.

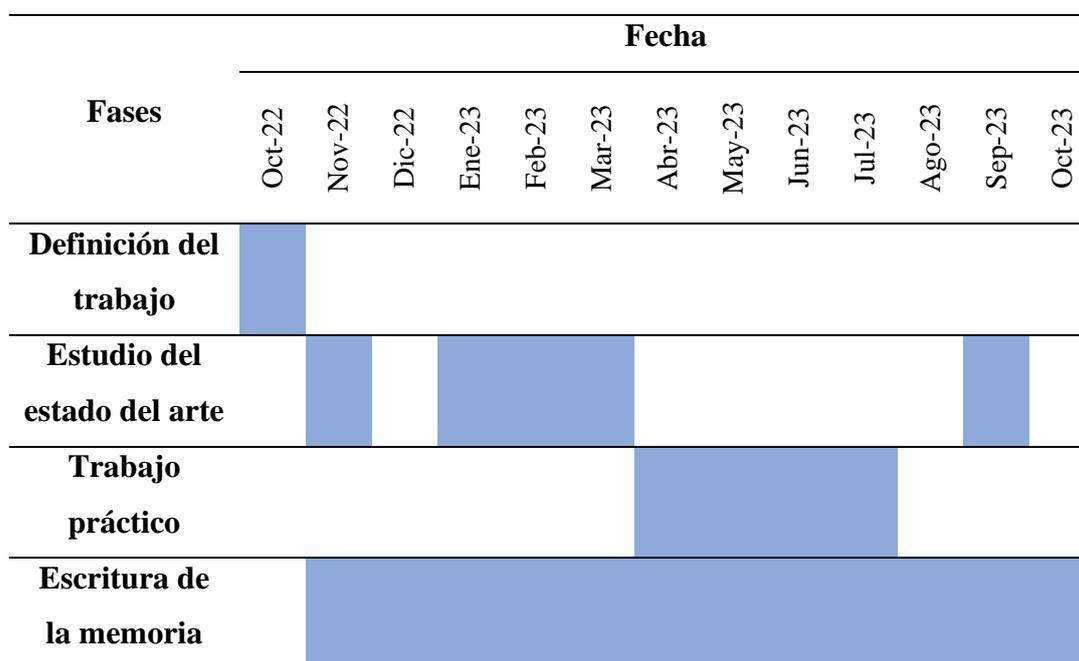


Tabla 1.1: Diagrama de Gantt

## 1.4 Estructura de la memoria

En esta sección se incluye una recopilación de los aspectos tratados en los capítulos que conforman la memoria de este Trabajo de Fin de Grado.

- *Capítulo 1. Introducción:* En este capítulo se introducen los temas principales que se tratan a lo largo de este proyecto, así como sus objetivos y estructura.
- *Capítulo 2. Estado del arte:* Este capítulo se centra en realizar un breve estudio de las bases teóricas sobre las que se fundamenta este proyecto, que serán de relevancia para su comprensión.
- *Capítulo 3. Interferómetro óptico:* A lo largo de este capítulo se desarrolla la implementación de un interferómetro de Michelson y los pasos seguidos para la obtención de medidas de desplazamiento de uno de sus espejos.
- *Capítulo 4. Diseño del fotorreceptor:* Los datos obtenidos en el Capítulo 3 servirán de guía en este capítulo, en el cual se lleva a cabo el diseño y fabricación de un fotorreceptor para obtener medidas de desplazamiento de forma análoga al capítulo anterior.
- *Capítulo 5. Conclusiones:* En este último capítulo se realiza un resumen de los resultados obtenidos en este proyecto, y se plantean posibles mejoras futuras para la ampliación de este proyecto.

# Capítulo 2

## Estado del arte

Durante este capítulo se realizará un estudio teórico sobre los fundamentos de este proyecto. Se abarcan los conceptos básicos de la luz y los semiconductores para su aplicación en diodos láser y fotodetectores, así como su uso en sensores ópticos e interferometría. Además, se estudiarán brevemente las características de los controladores láser y el diseño de los fotodetectores.

### 2.1 Propagación de la luz y fibra óptica

La luz es una onda electromagnética y, como tal, está formada por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí, cuya oscilación es perpendicular a la dirección en la que se propaga [5]. Al igual que el resto de las ondas electromagnéticas, la luz puede definirse por su longitud de onda  $\lambda$  o por su frecuencia  $f$ , relacionadas entre sí por la relación

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente  $3 \cdot 10^8$  m/s).

A su vez, la luz puede ser vista como fotones, es decir, partículas de energía electromagnética que viajan a la velocidad de la luz y cuya energía  $E$  se define como

$$E = h \cdot f \quad (2.2)$$

siendo  $f$  la frecuencia de la onda y  $h$  la constante de Planck, cuyo valor es  $6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s.

Al propagarse, la luz interactúa con los átomos y las moléculas del medio u objeto y en base a su interacción con la luz, los objetos se clasifican como transparentes si transmiten la luz, reflectantes si reflejan la luz, y opacos si absorben la luz (aunque ningún objeto es transparente, opaco, o reflectante completamente salvo el vacío, que es transparente puro para la luz). Dado que los materiales transparentes permiten el paso de la luz a través de

ellos, son relevantes a la hora de guiarla o modificar su dirección de propagación, siendo el índice de refracción su propiedad más importante. El índice de refracción  $n$  determina la velocidad de la luz en un medio determinado y se define como

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  la velocidad que lleva la luz en el material.

Cuando la luz pasa de un medio a otro (con diferentes índices de refracción), experimenta un fenómeno llamado refracción, que es dependiente del índice de refracción citado anteriormente y que provoca un cambio en la dirección de propagación. Este cambio se mide basándose en la ley de Snell, definida como

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \quad (2.4)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los medios 1 y 2, y  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  el ángulo de incidencia de la luz en la superficie del medio 2 respecto a su normal y el ángulo de refracción, respectivamente.

Por otra parte, la reflexión es otra propiedad importante que sucede cuando la luz se propaga de un medio a otro (además de en materiales reflectivos), y tiene la peculiaridad de que el ángulo de reflexión coincide con el ángulo de incidencia respecto a la normal. La Figura 2.1 ilustra los fenómenos de refracción y reflexión de la luz entre dos medios.

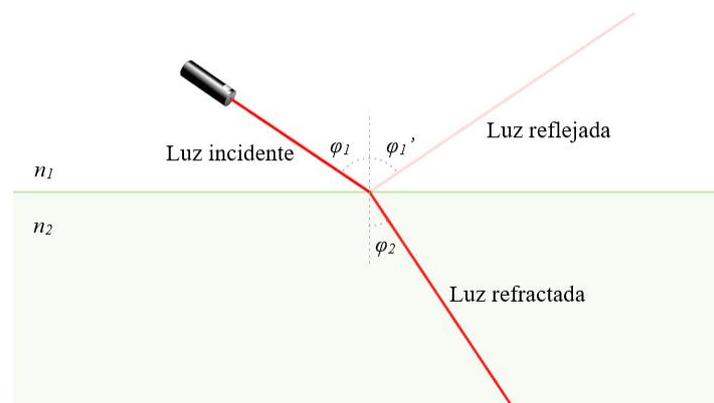


Figura 2.1: Fenómenos de refracción y reflexión [6]

El conocimiento de estas propiedades es necesario al emplear diferentes elementos, como lentes o espejos, para guiar la luz por un camino determinado [5, 7]. Las lentes se basan en la ley de Snell y su parámetro principal es la distancia focal  $f$ , que es la distancia comprendida desde el centro de la lente hasta el punto en el que se juntan los rayos de luz y se calcula como

$$f = \frac{1}{(n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (2.5)$$

donde  $n$  es el índice de refracción de la lente, y  $R_1$  y  $R_2$  los radios de curvatura de ambas superficies, definidos como la distancia entre la superficie de la lente y centro de la circunferencia con dicho radio. Dependiendo de la orientación de cada superficie, el radio será positivo si dicha superficie se sitúa de forma convexa hacia el haz de luz (haciendo que rayos de luz paralelos converjan en un punto) y negativo si está situado de forma cóncava (en la que rayos paralelos divergen); tal y como muestra la Figura 2.2. Además, si una de las superficies es plana, su radio de curvatura se considera infinito.

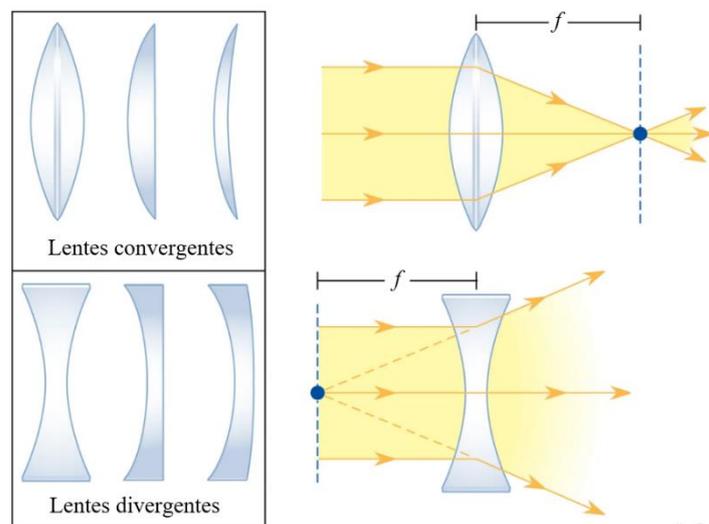


Figura 2.2: Diferentes tipos de lentes [8]

Las lentes tienen un papel muy importante a la hora de enfocar la luz hacia un punto, expandirla o incluso colimarla (es decir, obtener un haz de luz paralelo a partir de uno divergente). Por otra parte, los espejos se basan en la ley de la reflexión y pueden ser planos o curvos, siendo éstos últimos capaces de enfocar o expandir la luz si son cóncavos o convexos, respectivamente; como ilustra la Figura 2.3.

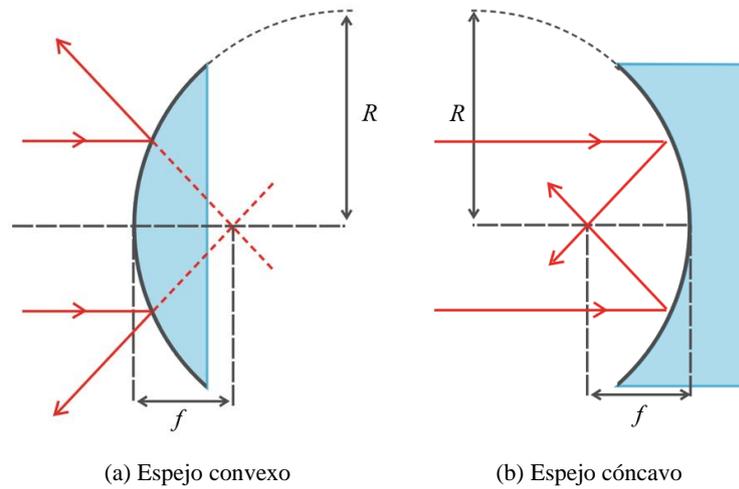


Figura 2.3: Tipos de espejos curvos [9]

Los espejos curvos también tienen una distancia focal  $f$  al igual que las lentes, que queda determinada por

$$f = \frac{R}{2} \quad (2.6)$$

siendo  $R$  el radio de curvatura, que será positivo para espejos cóncavos y negativo para espejos convexos.

Otro elemento ampliamente utilizado para guiar o transmitir la luz en muchos campos, como en comunicaciones ópticas, es la fibra óptica. Una fibra óptica es una fina guía de ondas fabricada con material dieléctrico (como vidrio o plástico) capaz de conducir la luz a lo largo de su longitud, pudiendo abarcar grandes distancias [5, 10]. La mayoría de las fibras ópticas cuentan con, al menos, dos capas; como muestra la Figura 2.4: un núcleo y un revestimiento, cuyo índice de refracción es menor que el del núcleo; además de un recubrimiento de plástico exterior para proteger la fibra. El objetivo de la capa de revestimiento es garantizar que la luz se propaga a través del núcleo y evitar la dispersión de la luz al exterior de la fibra.

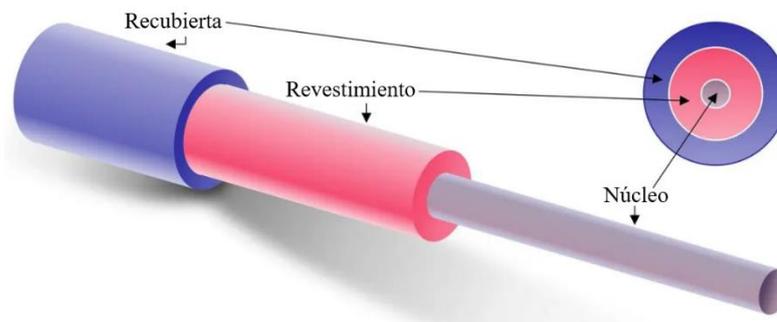


Figura 2.4: Estructura de una fibra óptica [11]

La propagación de la luz a lo largo de una fibra óptica sigue los mismos principios de refracción y reflexión explicados anteriormente, por lo que es necesario asegurar una reflexión total en el núcleo para evitar pérdidas [10, 12]. Dado que el índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento, el ángulo de incidencia será menor que el ángulo de refracción hasta que éste último alcanza los  $90^\circ$ , haciendo que la luz refractada se propague por la superficie entre ambos medios. El ángulo de incidencia necesario para conseguir esto recibe el nombre de ángulo crítico  $\varphi_c$  y su valor viene dado por

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.7)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, respectivamente. Cuando el ángulo de incidencia supera al ángulo crítico, la luz se reflejará por completo y no habrá refracción.

Para conseguir esto, es necesario que los rayos de luz que inciden en el núcleo de la fibra estén contenidos dentro del denominado cono de aceptación, delimitado por el ángulo de aceptación  $\varphi_a$ , ilustrado en la Figura 2.5, que se obtiene como

$$\sin \varphi_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA \quad (2.8)$$

siendo  $n_1$  y  $n_2$  los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, respectivamente; y la apertura numérica  $NA$  el valor de la expresión. Por lo tanto, una mayor apertura numérica permitirá que la luz penetre en la fibra con un mayor ángulo de incidencia.

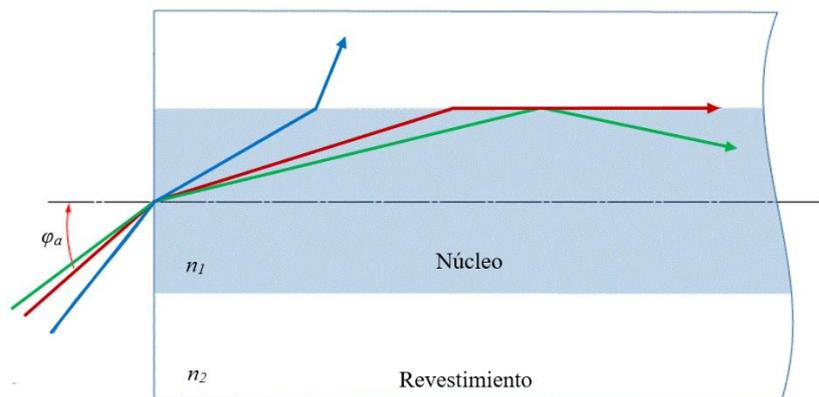


Figura 2.5: Reflexión total interna (haz verde) [13]

Este parámetro también es importante para determinar si la fibra óptica es capaz de transmitir luz en varios modos o únicamente en uno, es decir, si se trata de una fibra multimodo o monomodo [12, 14]. Para ello, se emplea un parámetro denominado

frecuencia normalizada  $V$  que es directamente proporcional a la apertura numérica y que se calcula como

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} NA \quad (2.9)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda empleada y  $r$  el radio interno de la fibra. Por lo tanto, este valor será dependiente de la longitud de onda empleada y cuanto mayor sea ésta, más disminuirá el valor de la frecuencia normalizada. El valor de  $V$  que determina el tipo de fibra es 2,405. Para valores inferiores, la fibra óptica será monomodo; mientras que a partir de este valor podrán existir más modos de propagación y la fibra se considerará multimodo. La ventaja de las fibras monomodo frente a las fibras multimodo es la ausencia de la dispersión intermodal, que produce el ensanchamiento de los pulsos ópticos emitidos [14]. Sin embargo, este ensanchamiento no desaparece por completo ya que los pulsos siguen siendo afectados por otras dispersiones, como las producidas por el material y la guía. El ensanchamiento  $\Delta T$  viene determinado en estos casos por

$$\Delta T = DL\Delta\lambda \quad (2.10)$$

donde  $D$  es la dispersión total,  $L$  la longitud de la fibra óptica y  $\Delta\lambda$  el ancho del pulso.

También se debe tener en cuenta que la luz que se propaga a lo largo de una fibra óptica sufre pérdidas debidas a la atenuación, dispersión, absorción o imperfecciones. La forma de relacionar la potencia de salida  $P_o$  con la potencia inyectada inicialmente  $P_i$  en una fibra óptica de longitud  $L$  es mediante la fórmula

$$P_o = P_i e^{-\alpha L} \quad (2.11)$$

en la que  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación, dependiente de factores como la absorción del material o la dispersión Rayleigh (proporcional a  $1/\lambda^4$ ), ambos dependientes de la longitud de onda.

Además, la luz puede experimentar efectos no lineales a lo largo de la fibra óptica producidos por campos electromagnéticos intensos, siendo notables cuando la longitud de la fibra es elevada. Un ejemplo son los efectos producidos por la dispersión inelástica, que apenas son notables a niveles bajos de potencia, pero cobran mayor importancia cuando se trabaja a niveles altos de potencia. A diferencia de la dispersión elástica (como la dispersión Rayleigh) en la que la frecuencia de la luz dispersada no se ve alterada, durante la dispersión inelástica la luz sufre una transferencia de energía con el medio por el que se propaga y, por tanto, su frecuencia varía con respecto a la luz incidente. Esa

diferencia de energía se libera como un fonón. Dos ejemplos de este tipo de dispersión son la dispersión Raman, que produce fonones ópticos; y la dispersión Brillouin, en la que se producen fonones acústicos. La utilidad de estos tipos de dispersión se estudiará en la sección 2.5.1.3. Otro efecto no lineal es debido a las variaciones en el índice de refracción en la fibra óptica a altas intensidades, lo que produce desfases no lineales que varían la frecuencia y el ancho de los pulsos ópticos.

## 2.2 Fundamentos de semiconductores

Los materiales semiconductores reciben su nombre porque el flujo de electrones es mejor que en un aislante, pero no tan bueno como en un conductor [5]. En estos materiales podemos considerar dos niveles o bandas de energía: banda de valencia y banda de conducción. La banda de valencia representa los niveles bajos de energía, en la que los electrones se mantienen estables en los átomos. Por otra parte, la banda de conducción, cuya energía es mayor, es la banda en la que se encuentran los electrones con suficiente energía como para moverse por el sólido conduciendo una corriente eléctrica. Ambas bandas están separadas por una banda conocida como banda prohibida que determina la conductividad del material y que se mide en electronvoltios (número de voltios necesario para conseguir mover un electrón a la banda de conducción desde la banda de valencia).

Los materiales semiconductores puros reciben el nombre de intrínsecos. Para mejorar la conductividad de los semiconductores se añaden impurezas al material, formando lo que se conoce como semiconductor extrínseco. Dependiendo del tipo de impurezas añadidas, los materiales extrínsecos pueden ser de tipo N si son dopados con átomos que producen electrones libres, o de tipo P si dichos átomos añaden huecos de más (ilustrados en la Figura 2.6(a) y en la Figura 2.26(b), respectivamente).

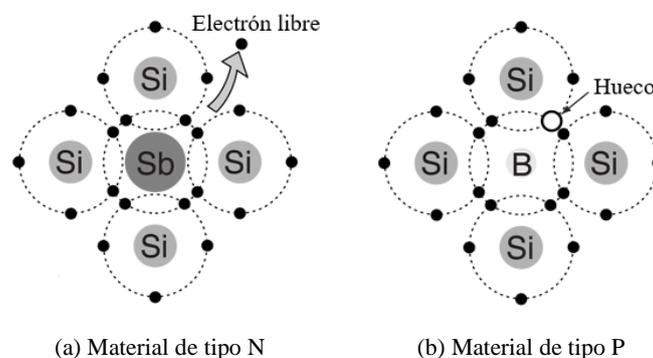


Figura 2.6: Estructura de materiales semiconductores extrínsecos [15]

La unión entre un semiconductor de tipo P y otro de tipo N recibe el nombre de diodo semiconductor, cuya función puede ser emitir luz (diodos láser y LEDs) o convertir luz en electricidad (detectores ópticos). En la región de unión entre ambos los electrones de la capa N caen en los huecos de la capa P al no aplicar ningún voltaje, por lo que no hay ningún flujo de corriente. Si el diodo se polariza inversamente como se ilustra en la Figura 2.7(b) (aplicando un voltaje negativo a la capa P y un voltaje positivo a la capa N), el electrodo negativo atrae a los huecos del semiconductor de tipo P y el electrodo positivo a los electrones del tipo N, por lo que tampoco hay flujo de corriente. En cambio, cuando el diodo es polarizado directamente tal y como indica la Figura 2.7(a) (aplicando un voltaje negativo a la capa N y un voltaje positivo a la capa P), los huecos del lado P son atraídos por el electrodo negativo y los electrones del lado N por el electrodo positivo creando un flujo de corriente, recombinándose así en la región de unión y liberando energía (parte de ella en forma de luz). Esta región es el lugar donde se produce la luz y recibe el nombre de capa activa.

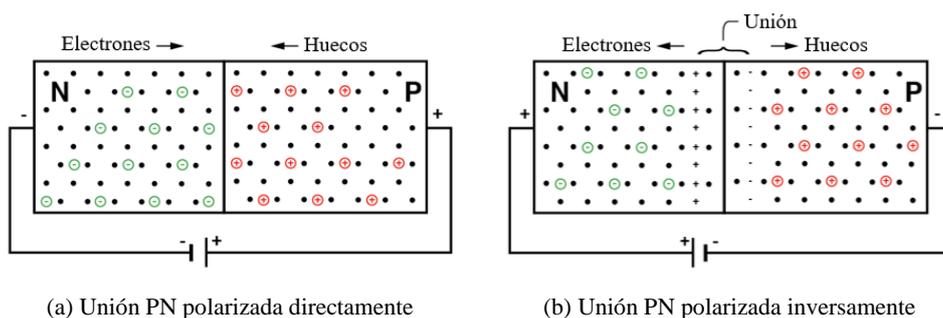


Figura 2.7: Tipos de uniones PN [16]

## 2.3 Láseres semiconductores

El láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) semiconductor, o diodo láser, se emplea como fuente óptica y tiene su origen en los LEDs (Light-Emitting Diodes), que emiten luz basándose en las propiedades de los materiales semiconductores [5]. Los LEDs emiten luz en todas las direcciones a través del proceso de emisión espontánea en un rango de longitudes de onda determinado por el material del semiconductor. La diferencia entre los LEDs y los diodos láser es que estos últimos se sitúan en una cavidad con espejos que provoca una amplificación de la luz, principalmente en una única longitud de onda, a través de la emisión estimulada, como se detallará posteriormente en esta sección.

### 2.3.1 Propiedades del láser

La luz emitida por un láser presenta ciertas propiedades que la hacen diferente a la de otras fuentes ópticas. Algunas de estas características son la monocromaticidad, la coherencia y la divergencia [5]. Un láser emite luz monocromática, es decir, de un único color (aunque también puede operar en la zona infrarroja o ultravioleta del espectro); lo que permite ajustar la longitud de onda a partir de un rango dado por el material del láser. La luz coherente se consigue gracias a la emisión estimulada ya que los fotones heredan la longitud de onda y la fase de los fotones que los producen, por lo que las ondas se mantienen en fase. La coherencia será mayor si el láser emite una única longitud de onda, e irá disminuyendo cuanto mayor sea el rango de longitudes de onda emitidas por el láser. El haz de luz emitido por un láser presenta una alta direccionalidad, pero, aunque no se aprecie, tiene un pequeño ángulo de divergencia que dependerá del tipo de láser y de otros factores (aunque esto puede corregirse empleando, por ejemplo, lentes colimadoras). Esta propiedad permite calcular el radio de un punto láser a una determinada distancia a partir del ángulo de divergencia (el cual suele medirse en milésimas de un radián).

### 2.3.2 Física láser

#### 2.3.2.1 Emisión estimulada e inversión de población

Consideramos los niveles de energía de la banda de valencia  $E_v$  (nivel estable) y de la banda de conducción  $E_c$  (nivel excitado), ambos separados por la banda prohibida cuya energía  $E_g$  viene dada por

$$E_g = E_c - E_v \quad (2.12)$$

El proceso de absorción tiene lugar cuando un fotón incide sobre el material como se muestra en la Figura 2.8(a), siendo absorbido por el átomo que pasa a estar excitado (los electrones que pasan a la banda de conducción dejan huecos en la banda de valencia). Para que esto suceda, la energía del fotón  $hf$  (siendo  $h$  la constante de Planck) debe ser igual a la energía de la banda prohibida  $E_g$  [14].

Cuando el átomo está excitado debe regresar a su estado estable emitiendo luz (en algunos casos), la cual se produce cuando un electrón de la banda de conducción se recombina con un hueco de la banda de valencia. Esto puede suceder mediante emisión espontánea o por emisión estimulada. La Figura 2.8(b) ilustra el proceso de emisión espontánea, durante la cual se emiten fotones de energía  $E_g$  (en direcciones aleatorias y sin relación

de fase entre sí) cada vez que un electrón se recombina con un hueco. En cambio, la emisión estimulada es generada por un fotón existente. Si dicho fotón incide con una energía igual a la de la banda prohibida  $E_g$ , estimulará la transición del átomo al estado estable (recombinación de un electrón con un hueco) como se ve en la Figura 2.8(c), liberando en el proceso energía como un fotón de energía  $E_g$ . La diferencia con la emisión espontánea es que estos fotones tienen exactamente la misma fase, polarización, energía y frecuencia.

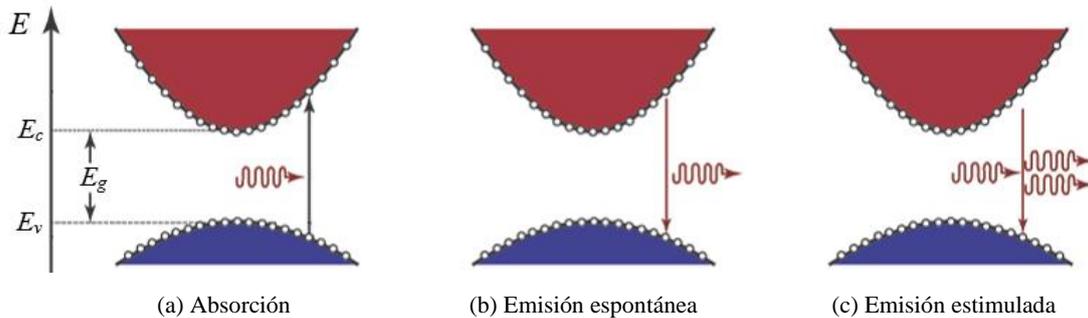


Figura 2.8: Fundamento físico de la detección y generación de luz [17]

Por tanto, tanto los fotones emitidos como los incidentes que causan el proceso de absorción tendrán una frecuencia dada por

$$f = \frac{E_g}{h} = \frac{E_c - E_v}{h} \quad (2.13)$$

donde  $h$  es la constante de Planck ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ).

El número de electrones de la banda de conducción  $N_c$  y el de la banda de valencia  $N_v$  están relacionados entre sí por la energía de la banda prohibida  $E_g$  como

$$\frac{N_c}{N_v} = e^{\frac{E_g}{kT}} \quad (2.14)$$

donde  $T$  es la temperatura y  $k$  la constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ) [5, 10].

La emisión estimulada se consigue rompiendo la situación de equilibrio a través de una inversión de población. En un material semiconductor intrínseco, se consigue una inversión de población cuando se inyectan electrones en la banda de conducción. En una unión PN, esto se consigue con un fuerte dopaje de impurezas en cada material, agregando átomos que generan huecos en el material de tipo p, y átomos que generan electrones libres en el material de tipo n.

### 2.3.2.2 Realimentación óptica

La realimentación óptica se consigue empleando una cavidad de Fabry-Perot a través de dos espejos. En los láseres semiconductores no se precisan espejos externos, ya que esta cavidad viene dada por las interfaces semiconductor-aire [14, 10]. La reflectividad  $R$  viene dada por

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \quad (2.15)$$

donde  $n$  es el índice de refracción del medio. Gracias a este efecto, los fotones se reflejan y contribuyen a la emisión estimulada dentro de la cavidad, por lo que la señal óptica es realimentada muchas veces.

Sin embargo, la realimentación solo es efectiva en un determinado número de frecuencias en las que la ganancia en la cavidad iguala o supera las pérdidas. Estas frecuencias se corresponden con los modos longitudinales y dan lugar a una curva de ganancia como la de la Figura 2.9, siendo el modo dominante el más cercano al pico de ganancia.

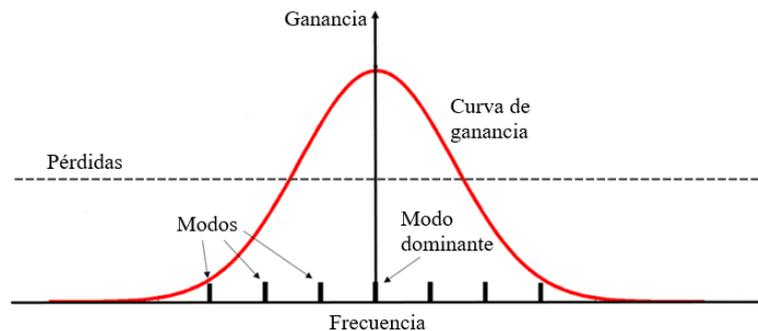


Figura 2.9: Representación de los modos longitudinales de un láser [18]

Las frecuencias de oscilación vienen dadas por

$$f = \frac{mc}{2nL} \quad (2.16)$$

siendo  $m$  un entero,  $c$  la velocidad de la luz,  $n$  el índice de refracción del medio de amplificación y  $L$  la longitud de la cavidad.

Los diferentes valores de  $m$  darán lugar a las diferencias frecuencias de oscilación, y cada una de ellas constituirá un modo. Los modos estarán separados por intervalos de frecuencia que cumplen

$$\Delta f = \frac{c}{2nL} \quad (2.17)$$

Por tanto, solo los modos contenidos dentro de la curva de ganancia provocarán la emisión del láser. Estos láseres reciben el nombre de láseres multimodo.

Sin embargo, la oscilación entre modos puede suponer un problema. Para ello se emplean láseres monomodo, que son aquellos que emiten en un único modo y cuyo diseño es diferente al del resonador de Fabry-Pérot (en el cual las pérdidas son independientes de los modos). En este tipo de láseres, las pérdidas son diferentes para cada modo, por lo que el modo dominante y, por tanto, el modo de emisión láser será aquel en el que las pérdidas sean menores que las del resto.

### **2.3.2.3 Estructuras y confinamiento**

Dependiendo de la composición de las capas p y n, podemos hablar de láseres homoestructura (o homounión) y de láseres heteroestructura (o heterounión) [5]. Los láseres homoestructura están fabricados con el mismo semiconductor en ambas capas, mientras que la composición de las capas p y n en los láseres heteroestructura es diferente. La ventaja de estos últimos es que permite un mejor confinamiento de los electrones debido a que la banda prohibida de cada capa es distinta, por lo que los electrones pueden mantenerse en el material con menor banda prohibida ya que carecen de energía para pasar a la capa con mayor banda prohibida. El confinamiento puede mejorarse empleando una heteroestructura doble.

Por otra parte, podemos hablar de láseres guiados por ganancia y de láseres guiados por índice al referirnos al confinamiento de la luz en el plano de unión. En un láser guiado por ganancia, se introducen regiones aislantes que bloquean el flujo de corriente en determinadas zonas, permitiéndolo únicamente a través de una franja estrecha; mientras que los láseres guiados por índice añaden una capa que rodea la región activa cuyo índice de refracción es más bajo, permitiendo una total reflexión que confina la emisión.

## **2.3.3 Tipos de láseres semiconductores**

### **2.3.3.1 Láseres de realimentación distribuida (DFB)**

Una forma de limitar las longitudes de ondas emitidas por el láser es insertar una rejilla en el medio activo, cuyas ranuras equiespaciadas dispersan la luz hacia atrás en un determinado rango de longitudes de onda y solo éstas serán amplificadas [5, 14]. La realimentación se consigue por la condición de Bragg, ya que solo se produce la

realimentación para la longitud de onda  $\lambda_B$  del modo empleado en la emisión, la cual debe cumplir

$$\Lambda = m \frac{\lambda_B}{2n} \quad (2.18)$$

siendo  $\Lambda$  el periodo de la rejilla,  $n$  el índice de refracción y  $m$  el orden de difracción de Bragg. El acoplamiento entre las ondas que viajan hacia delante y hacia atrás es mejor para el primer orden ( $m = 1$ ).

Desde el punto de vista de operación, los láseres que emplean realimentación distribuida pueden clasificarse como láseres de realimentación distribuida (DFBs) y láseres de reflector Bragg distribuido (DBRs), ilustrados en la Figura 2.10(a) y en la Figura 2.10(b) respectivamente. En esta variación, la rejilla se inserta en los extremos de la cavidad donde no hay ganancia actuando como espejos, en los que la reflexividad es máxima para las longitudes de onda que satisfacen la ecuación anterior. La principal diferencia entre ambos es que en los láseres DFB la realimentación tiene lugar a lo largo de la cavidad láser, mientras que en los láseres DBR solo sucede en los extremos.

### 2.3.3.2 Láseres de cavidad externa

En este tipo de láseres, se consigue trabajar en un único modo acoplando la cavidad láser a una cavidad externa que devuelve parte de la luz a la cavidad láser. La realimentación se consigue para los modos de la cavidad láser que coinciden con los de la cavidad externa. Una ventaja de estos láseres es que se puede seleccionar qué longitudes de onda se reflejan de vuelta a la cavidad láser y cuáles no, simplemente rotando la rejilla de la cavidad externa. La Figura 2.10(c) muestra una estructura sencilla de este tipo de láseres.

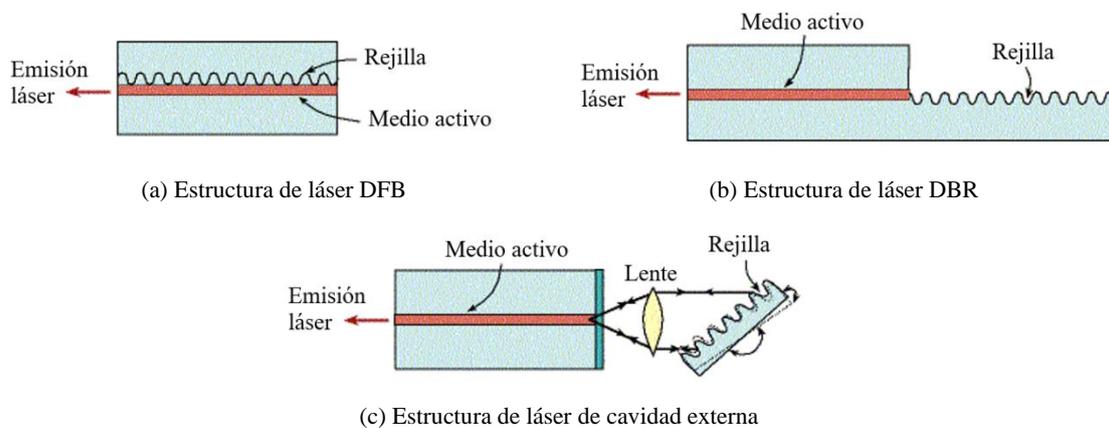


Figura 2.10: Tipos de estructuras láser [19]

### 2.3.3.3 Láseres emisores de superficie de cavidad vertical (VCSEL)

Algunos láseres son diseñados para emitir desde su superficie, a diferencia de los anteriores que emiten desde el borde (siguiendo la estructura ilustrada en la Figura 2.11(a)). Un ejemplo de este tipo son los láseres emisores de superficie de cavidad vertical (VCSELs). La cavidad resonante de estos láseres es perpendicular a la región activa, por lo que la luz es emitida en una dirección normal al plano de dicha región, como muestra la Figura 2.11(b). Además, la región activa queda rodeada por dos espejos DBR altamente reflectivos fabricados en el propio semiconductor alternando pares de capas de dos composiciones distintas cuyos índices de refracción son muy diferentes entre sí, permitiendo la amplificación y emisión de longitudes de onda determinadas. Uno de los espejos permite la transmisión de una pequeña fracción de la luz de la cavidad, mientras que el otro la refleja completamente y la mantiene en la cavidad.

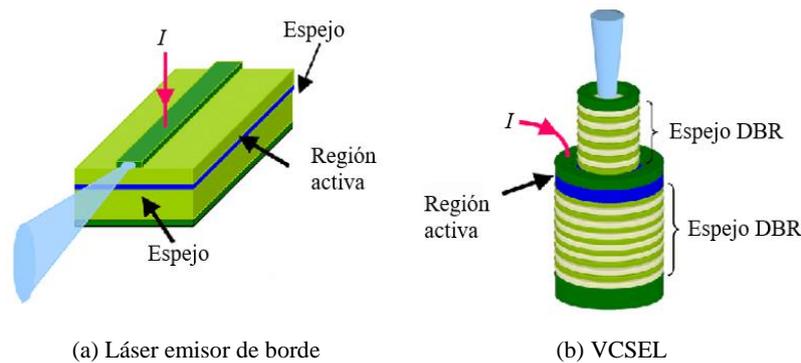


Figura 2.11: Diferencias de la estructura de un VCSEL [20]

## 2.4 Fotodetectores

Los fotodetectores están fabricados con materiales semiconductores y son los componentes encargados de convertir la luz que reciben en una señal eléctrica basándose en el proceso de absorción (desarrollado en el punto 2.3.2.1), a partir del cual un fotón incidente excita a un electrón, pasando éste de la banda de valencia a la banda de conducción [10, 14].

### 2.4.1 Propiedades de un fotodetector

Cuando la energía de un fotón incidente supera la energía de la banda prohibida, se crea una pareja electrón-hueco en el semiconductor por la absorción [14]. Al aplicar un campo eléctrico, los electrones y los huecos se mueven por el semiconductor creando una

corriente eléctrica. Esta corriente, llamada fotocorriente, está relacionada directamente con la potencia óptica incidente como

$$I_p = RP_{in} \quad (2.19)$$

donde la constante  $R$  recibe el nombre de responsividad.

La responsividad es directamente proporcional a la eficiencia cuántica, la cual se define como la fracción de los fotones incidentes y los electrones generados por absorción:

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} \quad (2.20)$$

siendo  $r_e$  la tasa de electrones por segundo y  $r_p$  la tasa de fotones incidentes por segundo. Desarrollando la ecuación obtenemos que

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} = \frac{I_p/q}{P_{in}/hf} = R \frac{hf}{q} \quad (2.21)$$

donde  $q$  es la carga de un electrón y  $h$  la constante de Planck.

Para poder aplicar la ecuación anterior al calcular la eficiencia cuántica, es necesario que la energía del fotón incidente supere la energía de la banda prohibida. Cuando esto no ocurre, no se generan electrones por absorción, por lo que la eficiencia cuántica pasa a valer cero.

Para ello, debe cumplirse que la energía del fotón  $hf$  supere la energía de la banda prohibida  $E_g$ . Por tanto, la longitud de onda debe cumplir

$$hf \geq E_g \rightarrow h \frac{c}{\lambda} \geq E_g \rightarrow \lambda \leq \frac{hc}{E_g} \quad (2.22)$$

por lo que solo las longitudes de onda que cumplan esa relación podrán ser empleadas en el fotodetector.

## 2.4.2 Tipos de fotodiodo

### 2.4.2.1 Fotodiodos PN y fotodiodos PIN

La Figura 2.12(a) muestra la estructura de un fotodiodo PN polarizado inversamente con una región de agotamiento, donde un campo eléctrico impide el flujo de electrones del lado N al lado P y el flujo de huecos del lado P al lado N [10, 14]. Cuando los fotones incidentes son absorbidos en la región de agotamiento, se crean parejas electrón-hueco de

modo que los electrones y huecos generados se aceleran por el efecto del campo eléctrico hacia los lados N y P, respectivamente, generando una corriente proporcional a la potencia óptica incidente. Sin embargo, cuando la absorción tiene lugar fuera de la región de agotamiento, los electrones generados en el lado P y los huecos generados en el lado N se difunden primero hasta la región de agotamiento, para acelerarse después hacia los lados N y P, respectivamente. La difusión es un proceso muy lento, por lo que es importante que los fotones sean absorbidos directamente en la región de agotamiento.

Una forma de aumentar la región de agotamiento es introducir una capa de material semiconductor no dopado (intrínseco) o ligeramente dopado entre las capas P y N de la unión, cuya estructura recibe el nombre de fotodiodo PIN y queda ilustrada en la Figura 2.12(b). En este caso, el campo eléctrico y la región de agotamiento se encuentran dentro de la capa I gracias a su naturaleza intrínseca (ya que ofrece una gran resistencia y la mayoría de la caída del voltaje sucede en ella). La principal diferencia con el fotodiodo PN es que el componente difusivo es mucho menor ya que la mayoría de los fotones se absorben en la capa I.

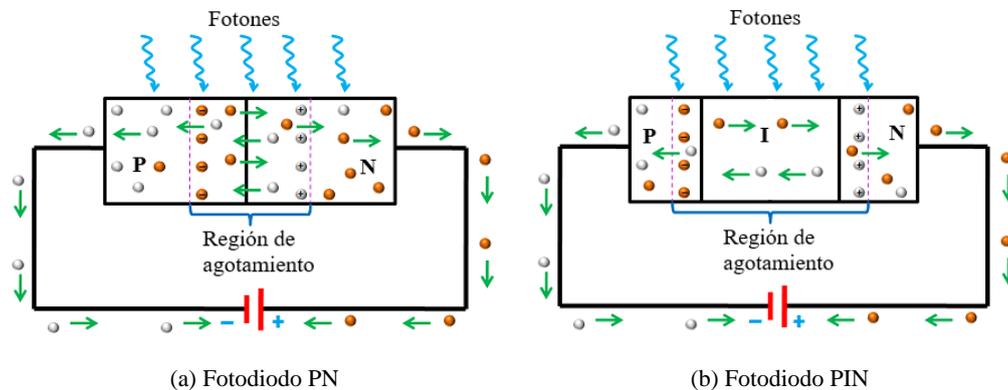


Figura 2.12: Estructura de fotodiodos PN y PIN [21]

### 2.4.2.2 Fotodiodos de avalancha (APD)

A diferencia de los anteriores, en los que cada fotón absorbido generaba una pareja electrón-hueco, estos fotodiodos cuentan con una región en la que los electrones y los huecos generados adquieren suficiente energía como para generar nuevas parejas de electrón-hueco, gracias a un fenómeno físico llamado ionización de impacto [10]. Los fotodiodos de avalancha (APDs) se diferencian de los fotodiodos PIN, principalmente, en una capa adicional en la que se generan electrones y huecos por ionización de impacto y que recibe el nombre de capa de multiplicación [10, 14]. Esta capa (de tipo P) situada entre las capas I y N, experimenta un gran campo eléctrico al polarizar el fotodiodo

inversamente. De esta manera, los electrones y huecos generados por la absorción de los fotones en la capa I atraviesan esta nueva región generando nuevas parejas electrón-hueco, las cuales contribuyen a la ganancia de la corriente. El esquema de operación de este tipo de fotodiodos se muestra en la Figura 2.13.

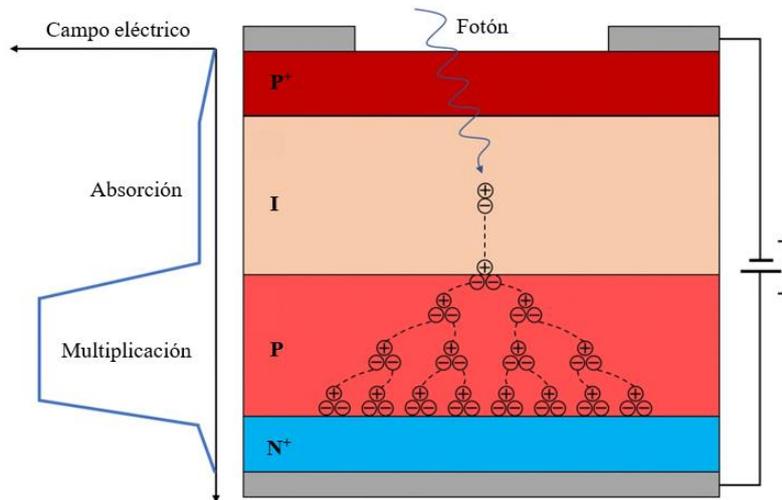


Figura 2.13: Estructura de un fotodiodo APD [22]

Una manera de medir esta ganancia es a través del factor de multiplicación  $M$ , el cual se calcula como

$$M = \frac{I_{out}}{I_p} \quad (2.23)$$

en la que  $I_{out}$  es la corriente de salida tras la multiplicación de electrones y huecos, e  $I_p$  la fotocorriente inicial producida por absorción de fotones antes de la multiplicación [10].

### 2.4.2.3 Fotodetectores MSM (Metal-Semiconductor-Metal)

Este tipo de fotodetectores consta de una capa de material semiconductor situado entre dos electrodos de metal, de manera que los electrones y los huecos generados por absorción fluyen a través de los contactos metálicos formando una fotocorriente. En este caso, mientras los electrones se encuentran en la banda de conducción se incrementa la conductividad del semiconductor (fenómeno conocido como fotoconductividad), por lo que estos fotodetectores reciben el nombre de fotoconductores. Sin embargo, no es necesaria una unión PN como la de los fotodetectores citados anteriormente, por lo que su diseño es más sencillo.

## 2.5 Sensores ópticos

Los sensores ópticos son aquellos que emplean las propiedades de la luz y su interacción con el medio para detectar elementos o medir diferentes magnitudes físicas, químicas e incluso biológicas [7]. Son relevantes por las ventajas que presentan frente a otro tipo de sensores, tales como los electrónicos o los mecánicos, como su rápida velocidad de detección de cambios, su alta tolerancia a interferencias eléctricas o magnéticas externas, y su capacidad de evitar errores que presentan los sistemas cuyos elementos están en contacto físico.

Estos sensores están formados por una fuente de luz (incluida la luz ambiente), un fotodetector y elementos ópticos, que se encargarán de guiar la luz, dispersarla, modularla, o limitar los rangos de longitudes de onda deseados.

### 2.5.1 Sensores en fibra óptica

Los sensores de fibra óptica se encargan de medir parámetros (como la tensión o la temperatura) o detectar cambios en el entorno a través de su interacción con la luz, produciendo una señal óptica modulada de forma que lleve la información necesaria al detector [12, 23]. Estos sensores pueden clasificarse tal y como refleja la Tabla 2.1.

<b>Clasificación</b>	<b>Definición</b>
<b>Basada en su interacción con la fibra óptica</b>	<i>Intrínsecos</i> : La fibra conduce la luz y actúa como sensor.
	<i>Extrínsecos</i> : La fibra óptica conduce la luz a un sensor externo.
<b>Basada en la propiedad de la luz modulada o analizada</b>	<i>Sensores de intensidad modulada</i> : Detección basada en la intensidad recibida.
	<i>Sensores de fase modulada</i> : Detección a través de la diferencia de fase comparada con una de referencia.
	<i>Sensores de longitud de onda modulada</i> : Detección por los cambios en la longitud de onda.
	<i>Sensores basados en polarización</i> : Detección analizando los cambios en la polarización de la luz.
<b>Basada en su topología</b>	<i>Sensores basados en dispersión</i> : Detección a partir de cambios en la dispersión de la luz.
	<i>De punto único</i> : Las mediciones se realizan en una sección de la fibra (normalmente en un extremo).
	<i>Multipunto</i> : Las mediciones se realizan en dos o más secciones de la fibra
	<i>Distribuidos</i> : Las mediciones se realizan a lo largo de toda la fibra

Tabla 2.1: Tipos de clasificación de sensores de fibra óptica [12, 23]

En las secciones siguientes quedan detallados algunos de los sensores ópticos que se emplean en aplicaciones de fibra óptica.

### 2.5.1.1 FBG (Fiber Bragg Grating)

Los sensores FBG trabajan con la longitud de onda de la luz que atraviesa la fibra óptica para detectar distintas perturbaciones [12, 23]. Éstas son detectadas gracias a una estructura de rejilla que actúa como un reflector selectivo, reflejando únicamente la longitud de onda que cumple la condición de Bragg, como ilustra la Figura 2.14. Por lo tanto, al emplear una fuente óptica de banda ancha, se transmitirán todas las longitudes de onda excepto aquellas que cumplan la condición de Bragg, que serán reflejadas. Estas longitudes de onda  $\lambda_B$  cumplirán que

$$\lambda_B = 2\Lambda n_e \quad (2.24)$$

siendo  $\Lambda$  la periodicidad de la rejilla y  $n_e$  el índice de refracción efectivo.

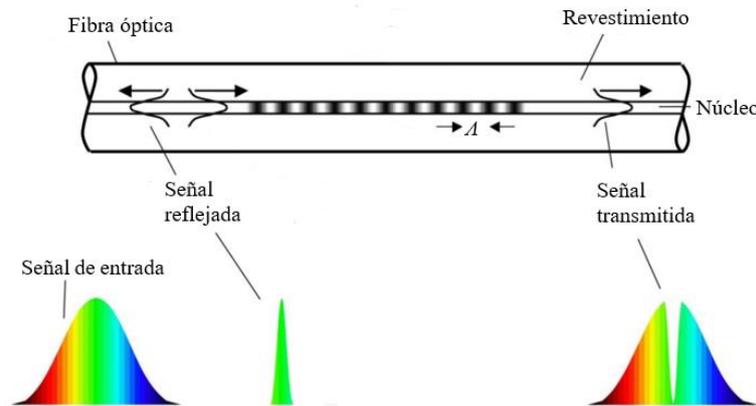


Figura 2.14: Principio de funcionamiento de FBG [24]

Las aplicaciones más comunes de estos sensores se centran en la monitorización de la tensión y la temperatura. Cuando este sensor es sometido a una elongación, la tensión provoca un cambio en el espaciado de la rejilla  $\Lambda$  y en el índice de refracción  $n_e$ . Esto produce variaciones en la longitud de onda de Bragg  $\lambda_B$ . Por otra parte, los cambios térmicos también alteran la longitud de onda de Bragg al modificar el índice de refracción (que es dependiente de la temperatura) y el espaciado de la rejilla por la dilatación térmica.

### 2.5.1.2 OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry)

OTDR está basado en la dispersión Rayleigh (ilustrada en la Figura 2.16) y su uso se centra en la detección de perturbaciones y el estudio de las características de la atenuación en la fibra óptica [12, 25]. Para ello, se inyectan pulsos ópticos de alta potencia que se dispersan a medida que se propagan a lo largo de la fibra óptica. La luz retrodispersada es medida por un fotodetector, analizando la potencia recibida. Por tanto, la potencia de la señal recibida (combinando múltiples pulsos ópticos) se muestra como una curva en un osciloscopio en función del tiempo (siendo éste el tiempo de retardo que tarda en llegar de vuelta desde que el pulso óptico es emitido). Los puntos en la fibra no uniformes, tales como conectores, empalmes y posibles fallos o roturas; producen señales de retorno que se muestran como picos de alta intensidad en la curva obtenida (como muestra la Figura 2.15), y cuya posición puede obtenerse a través del tiempo de retardo empleado.

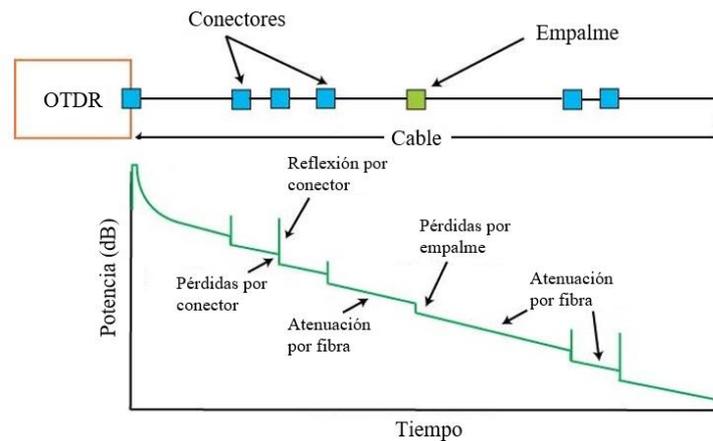


Figura 2.15: Gráfica OTDR [26]

Esta posición se calcula como el producto entre la mitad del tiempo de retardo del pulso  $t$  (puesto que  $t$  es el tiempo de ida y vuelta) y la velocidad de propagación  $v$ , obtenida como la velocidad de la luz en el vacío  $c$  entre el índice de refracción del núcleo de la fibra  $n$ . Así, obtenemos que la distancia  $d$  al evento ocurrido en el instante  $t$  es

$$d = v \frac{t}{2} = \frac{ct}{2n} \quad (2.25)$$

### 2.5.1.3 DTS (Distributed Temperature Sensing) y DTSS (Distributed Temperature and Strain Sensing)

Como se mencionó en la sección 2.1, la luz puede experimentar dispersión elástica (dispersión Rayleigh) e inelástica (dispersión Raman y dispersión Brillouin). El espectro de la luz dispersada, reflejado en la Figura 2.16, tiene componentes cuya frecuencia es superior e inferior a la de la luz incidente  $f_0$  (denominados componentes anti-Stokes y componentes Stokes, respectivamente) debidos a la dispersión inelástica, que serán clave para detectar cambios en la temperatura y en la tensión a lo largo de la fibra óptica [12].

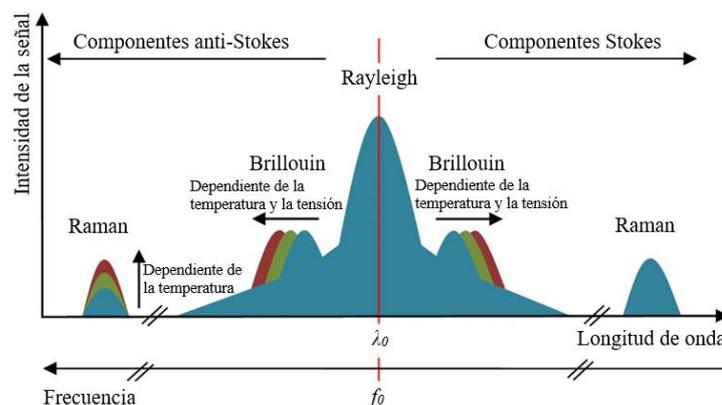
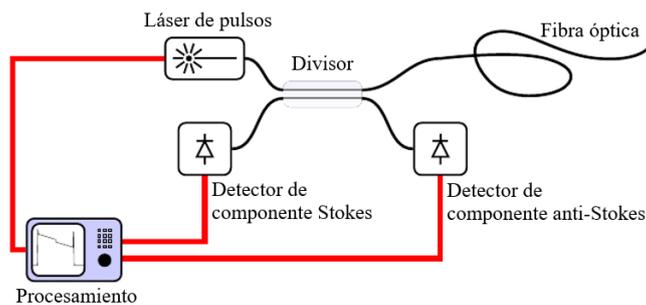


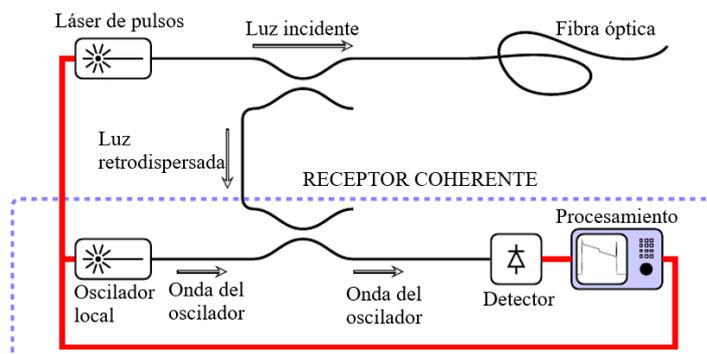
Figura 2.16: Espectro de la luz dispersada [27]

Los sensores distribuidos de temperatura o DART (Distributed Anti-Stokes Raman Thermometry) se basan en la dispersión Raman utilizando la proporción entre las componentes de Stokes y de anti-Stokes, siendo ésta última muy sensible a cambios de temperatura, para conseguir a partir de ella la temperatura [12, 25]. Para ello, un divisor se encarga de separar y dirigir la luz retrodispersada hacia dos fotodetectores provistos de filtros ópticos, capaces de obtener dichas componentes, tal y como muestra la Figura 2.17(a). Al igual que OTDR, es posible obtener la distancia a partir del tiempo de viaje de cada uno de los pulsos, pudiendo obtener una representación de la temperatura en función de la distancia.

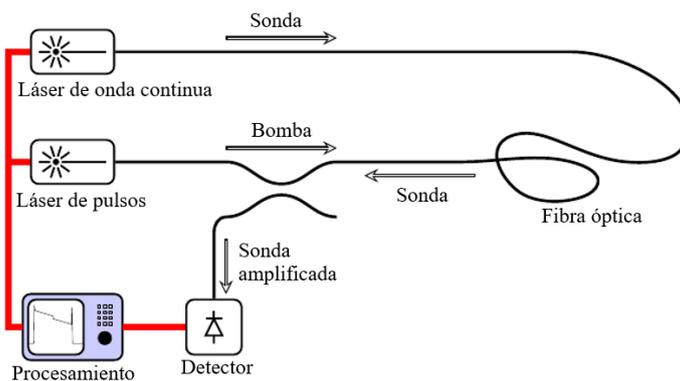
Por otra parte, los sensores distribuidos basados en la dispersión Brillouin son útiles para obtener cambios en la tensión y en la temperatura, pudiendo clasificarse generalmente según el tipo de dispersión (espontánea o estimulada) [28]. En esta sección se hablará de dos configuraciones diferentes: BOTDR (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry) y BOTDA (Brillouin Optical Time-Domain Analysis). BOTDR inyecta pulsos de luz para generar dispersión Brillouin espontánea y emplea un receptor coherente, reflejado en la Figura 2.17(b), que combina la luz retrodispersada con un oscilador local, ya que la calidad de ésta se ve afectada por la atenuación de la fibra óptica debido a su baja intensidad. Los datos obtenidos se pueden representar en función de la distancia empleando la técnica OTDR convencional. En contraste, BOTDA se basa en la dispersión Brillouin estimulada, para lo cual se combina con los pulsos ópticos (bomba) una onda continua (sonda) propagándose en sentido contrario que sondea el perfil de la frecuencia de Brillouin, tal y como ilustra la Figura 2.17(c), produciéndose la estimulación cuando la diferencia de frecuencia entre ambas ondas coincide con la frecuencia de Brillouin. Cuando esto ocurre, se transfiere energía de los pulsos a la onda continua y ésta se amplifica, midiéndose en función del tiempo o la distancia de forma similar a OTDR.



(a) Configuración de DART



(b) Configuración de BOTDR



(c) Configuración de BOTDA

Figura 2.17: Configuraciones de sensores DTS y DTSS [29, 30, 31]

## 2.5.2 Sensores en espacio libre

Aunque los sensores tienen muchas aplicaciones diferentes en fibra óptica, también es posible emplearlos en espacio libre para detectar cambios o para medir parámetros tales como la distancia, el desplazamiento o la velocidad. A continuación, se detallan algunos tipos de sensores ópticos utilizados en espacio libre [7].

### 2.5.2.1 Barreras de luz

Las barreras de luz son ampliamente utilizadas en muchos campos diferentes para la detección de elementos cuando éstos interrumpen el camino que sigue el haz de luz y, tal

y como muestra la Figura 2.18, pueden clasificarse como transmisivas o reflexivas según su estructura [7].

Las barreras de luz transmisivas constan de una fuente óptica que emite luz constantemente hacia un fotodetector, que detectará la presencia de algún elemento cuando éste interrumpa el camino que sigue la luz ya que dejará de recibirla. Por otra parte, las barreras de luz reflexivas se caracterizan porque la luz llega al fotodetector a través de una reflexión, pudiendo detectar la presencia de elementos a través de dos diseños diferentes. Uno de ellos se basa en detectar al elemento cuando éste interrumpe la trayectoria de la luz (al igual que el tipo anterior), que llega al fotodetector tras incidir en una superficie reflectante; mientras que en el otro diseño la luz no llegará al fotodetector hasta que un elemento se cruce en su trayectoria y la refleje o disperse, en cuyo caso la luz logrará incidir en el fotodetector.

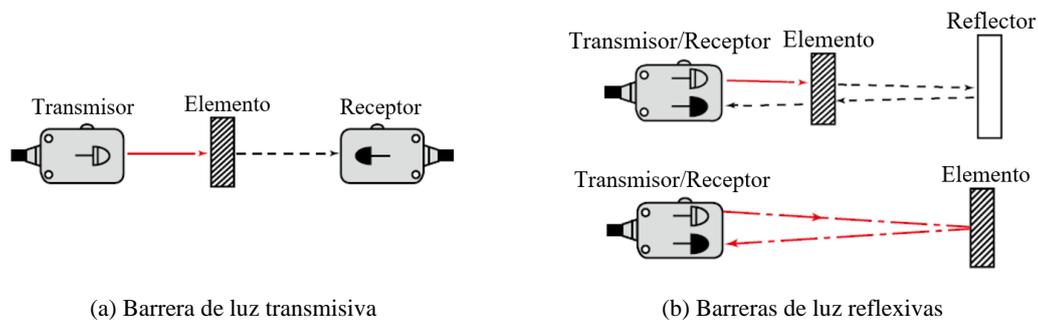


Figura 2.18: Tipos de barreras de luz [32]

### 2.5.2.2 Sensor de lluvia

Actualmente, muchos automóviles modernos emplean este tipo de sensor de lluvia para la activación automática del limpiaparabrisas basándose en la ley de Snell y en el principio de la reflexión total interna, empleando un LED y un fotodetector [7].

La Figura 2.19 refleja el funcionamiento de este sensor: cuando el parabrisas está seco, éste actúa como una guía (al igual que una fibra óptica) llevando la luz hasta el fotorreceptor; mientras que en presencia de lluvia las gotas de agua cambian el índice de refracción del parabrisas, rompiendo la condición de reflexión total y haciendo que parte de la luz escape, por lo que la intensidad recibida en el fotodetector disminuye. De esta forma, el sensor detecta la presencia de lluvia y activa el limpiaparabrisas automáticamente.

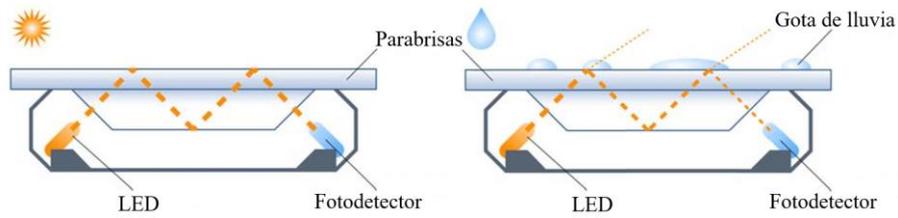


Figura 2.19: Principio de funcionamiento de un sensor de lluvia [33]

### 2.5.2.3 LiDAR

LiDAR (Light Detection And Ranging) es un método de detección empleado para medir distancias a elementos empleando un láser pulsado, un escáner y un receptor [34, 35]. Para ello, se mide el tiempo que tarda en llegar al elemento y regresar la luz emitida por el láser. La Figura 2.20(a) ilustra este tipo de sensores, conocidos como sensores de tiempo de vuelo ToF (Time Of Flight), que calculan la distancia al elemento dividiendo el tiempo de ida y vuelta entre dos y multiplicando el resultado por la velocidad de la luz.

Sin embargo, el método de detección puede variar en función de los parámetros utilizados, por lo que podemos hablar también de sensores FMCW (Frequency-Modulated Continuous-Wave). Los sensores LiDAR FMCW emplean, a diferencia de los citados anteriormente, un láser de onda continua cuya luz emitida es modulada en frecuencia tal y como muestra la Figura 2.20(b). Cuando esta luz se refleja en el objeto, la frecuencia varía con respecto a la frecuencia emitida inicialmente, empleando así la diferencia entre ambas para calcular la distancia al objetivo, que es proporcional a ésta.

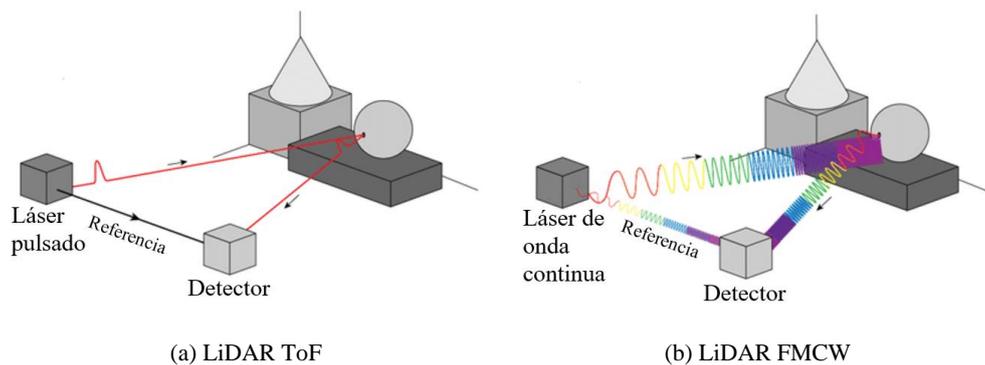


Figura 2.20: Tipos de LiDAR [36]

LiDAR se emplea en diversos campos, incluyendo medidas de profundidad en océanos y el desarrollo de mapas topográficos tridimensionales del terreno. Actualmente, han cobrado mucha importancia en los vehículos autónomos para la medición de distancias en tiempo real.

### 2.5.2.4 Ratones ópticos

Los ratones ópticos emplean sensores ópticos con la finalidad de detectar movimiento, utilizando un LED o un láser como fuente óptica, un fotodetector y un sistema de procesamiento de señal digital [37]. La fuente emite luz que ilumina la superficie, reflejándose y llegando hasta el fotodetector, que se encarga de formar más de mil imágenes por segundo de la superficie iluminada. Éstas son enviadas al procesador digital para ser comparadas entre sí (como ilustra la Figura 2.21) y obtener información sobre el movimiento realizado a partir de sus diferencias, que será enviada al ordenador para actualizar la posición del cursor.

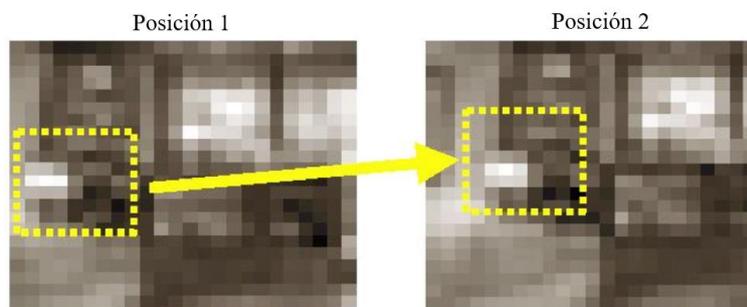


Figura 2.21: Imágenes de la superficie captadas por un ratón óptico [37]

Dependiendo del tipo de fuente empleada, se puede hablar de ratones ópticos (si utilizan un LED) o de ratones láser [38]. La luz emitida por estos últimos es más potente, por lo que los detalles de la superficie capturados tras la reflexión son más precisos, haciéndolos aptos para ser usados en una mayor variedad de superficies.

## 2.6 Interferometría

La interferometría permite la realización de medidas muy precisas a través de las interferencias entre ondas de luz. Para ello, se necesita que dos o más haces interfieran en algún momento [2]. El fenómeno de interferencia se entiende como la superposición de ondas cuya intensidad resultante depende de si éstas se refuerzan o cancelan. Cuando la diferencia de fase  $\Delta\varphi$  entre ambos haces varía linealmente a lo largo del campo de visión, la intensidad varía sinusoidalmente. Esto da lugar a unas bandas claras y oscuras que se alternan entre sí y que reciben el nombre de franjas de interferencia.

La visibilidad  $V$  de dichas franjas viene dada por

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2.26)$$

y su valor oscila entre 0 y 1. Los valores  $I_{max}$  e  $I_{min}$  se calculan a partir de la intensidad de dos ondas  $A$  y  $B$ , y la diferencia de fase de ambas, cumpliendo que

$$I_{max} = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \longleftarrow \longrightarrow \Delta\varphi = 2n\pi \quad (2.27)$$

$$I_{min} = I_A + I_B - 2\sqrt{I_A I_B} \longleftarrow \longrightarrow \Delta\varphi = (2n + 1)\pi \quad (2.28)$$

Un patrón de interferencia estacionario se consigue cuando la diferencia de fase entre ambas ondas no cambia con el tiempo, es decir, ambas tienen la misma frecuencia. Para ello, las dos ondas deben derivarse de una misma fuente. Existen dos métodos que permiten obtener dos haces a partir de una fuente única: división de frente de onda y división de amplitud. La división de frente de onda consiste en aislar dos haces a partir de porciones diferentes de un mismo frente de onda, mientras que la división de amplitud separa dos haces de una misma porción del frente de onda original.

## 2.6.1 Interferómetros de dos haces

### 2.6.1.1 Interferómetro de Rayleigh

El interferómetro de Rayleigh emplea dos aperturas para producir dos haces a partir de una misma fuente empleando división de frente de onda. Posteriormente, los dos haces se juntan de nuevo gracias a una lente y pueden realizarse las medidas deseadas basándose en el patrón de interferencia. La aplicación más común de este tipo de interferómetro es la medición del índice de refracción de un gas, como ilustra la Figura 2.22(a).

### 2.6.1.2 Interferómetro de Michelson

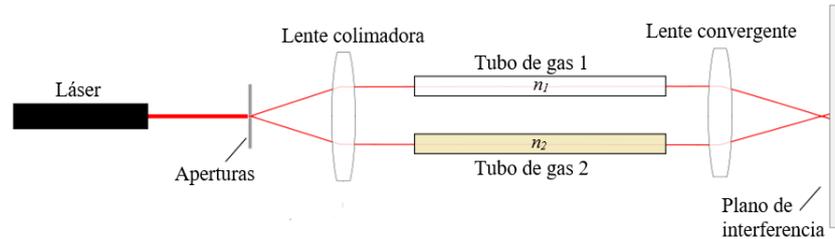
Este interferómetro, cuyo esquema queda ilustrado en la Figura 2.22(b), emplea una superficie semirreflectante para dividir el haz proveniente de la fuente, la cual también se encarga de recombinar los haces resultantes siguiendo el principio de división de amplitud tras ser reflejados en espejos. Se suele emplear para medir longitudes o para testado óptico.

### 2.6.1.3 Interferómetro de Sagnac

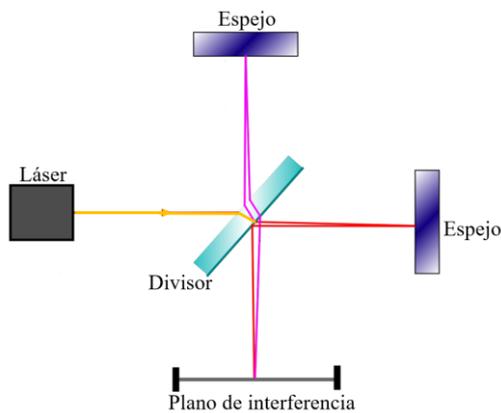
El interferómetro de Sagnac, ilustrado en la Figura 2.22(c), es muy estable y fácil de alinear. Este tipo de interferómetro recibe el nombre de interferómetro de camino común, ya que los dos haces siguen el mismo camino en direcciones opuestas. Una aplicación es muy extendida de este tipo de interferómetros es el sensado de rotación.

### 2.6.1.4 Interferómetro de Mach-Zehnder

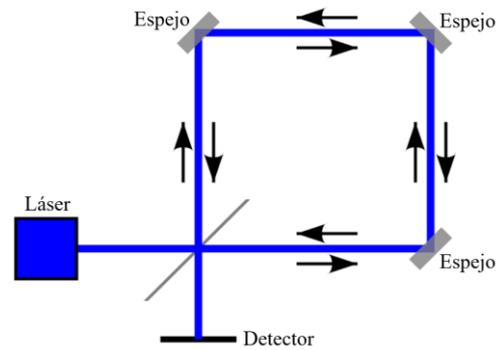
Este tipo de interferómetro consigue dividir y recombinar los haces empleando dos divisores de haz y dos espejos como muestra la Figura 2.22(d). Variando la separación lateral entre haces es posible controlar el punto de intersección entre ambos. Se utiliza para estudios de transferencia de calor o flujo de fluidos.



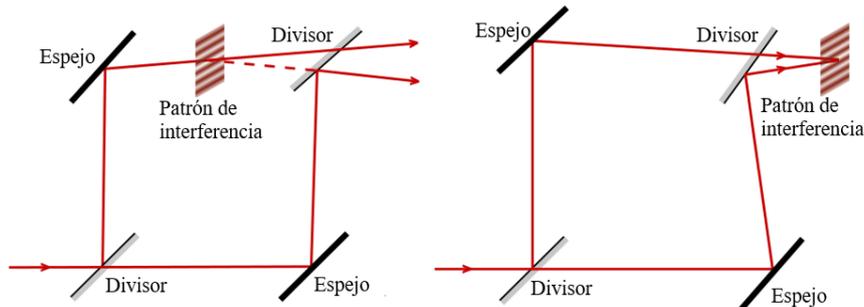
(a) Interferómetro de Rayleigh



(b) Interferómetro de Michelson



(c) Interferómetro de Sagnac



(d) Interferómetro de Mach-Zehnder

Figura 2.22: Diferentes tipos de interferómetro [39, 40, 41, 42]

## 2.6.2 Interferometría con múltiples haces

Hasta ahora, solo se había considerado una única reflexión en las superficies. Sin embargo, cuando un haz de luz entra en contacto con superficies altamente reflectantes, se deben tener en cuenta las múltiples reflexiones [2].

Consideremos una placa plana de superficies paralelas separadas una distancia  $d$  y con un índice de refracción  $n$  en su interior, en la que incide un haz de luz (suponer amplitud unitaria) con ángulo  $\alpha$  respecto a la normal y un ángulo de refracción con la placa  $\beta$ . Se producirán múltiples transmisiones y reflexiones debido a las sucesivas reflexiones en el interior de la placa, y el desfase entre cada transmisión o reflexión vendrá dado por

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} nd \cos \beta \quad (2.29)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de onda del haz de luz incidente.

La onda transmitida y la onda reflejada resultantes serán una suma de las amplitudes de las componentes transmitidas y reflejadas, respectivamente; definidas por la relación

$$A_{tx}(\varphi) = \frac{t^2}{1 - r^2 e^{-j\varphi}} \quad (2.30)$$

$$A_{rx}(\varphi) = \frac{r(1 - e^{-j\varphi})}{1 - r^2 e^{-j\varphi}} \quad (2.31)$$

en los que  $t$  y  $r$  son los coeficientes de transmisión y reflexión en la superficie, respectivamente.

El interferómetro de Fabry-Perot (o etalon de Fabry-Perot) emplea la interferencia entre múltiples haces usando dos superficies paralelas reflectantes, siendo utilizado comúnmente como un espectrómetro de alta resolución. El patrón de interferencia producido por este interferómetro (al emplear una fuente monocromática de longitud de onda  $\lambda$ ) consiste en anillos concéntricos entre sí como muestra la Figura 2.23, que cumplen

$$2nd \cos \theta = m\lambda \quad (2.32)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia del haz,  $d$  y  $n$  la distancia y el índice de refracción entre las superficies, respectivamente; y  $m$  un entero.

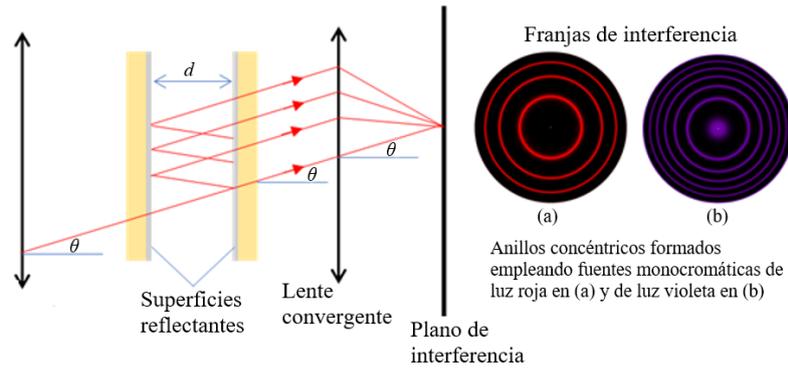


Figura 2.23: Interferómetro de Fabry-Pérot [43]

## 2.6.3 Aplicaciones de la interferometría

### 2.6.3.1 Detección de ondas gravitatorias

Destaca el proyecto LIGO (Laser Interferometer Gravitational Observatory) ilustrado en la Figura 2.24, que emplea la interferometría para detectar ondas gravitatorias, las cuales pueden alterar la longitud del camino óptico seguido por un haz [44, 45].



Figura 2.24: Interferómetro LIGO en Hanford [46]

Para ello, se sigue el esquema de un interferómetro Michelson cuyos brazos miden 4 km y son perpendiculares entre sí. Para mejorar la detección, se incluyen cavidades de Fabry-Perot en cada brazo, haciendo que la luz rebote varias veces dentro de cada uno y, por tanto, aumentando la distancia efectiva que recorre cada haz. Debido a la larga longitud de cada brazo, se necesita trabajar a una alta potencia para detectar la presencia de ondas gravitatorias, por lo que se emplean espejos entre el láser y el divisor (que refleja parte de la luz recibida). De esta forma, la luz reflejada en el divisor vuelve al espejo, que a su vez

vuelve a reflejar la luz, consiguiendo así la amplificación de potencia deseada. El esquema de su implementación queda ilustrado en la Figura 2.25.

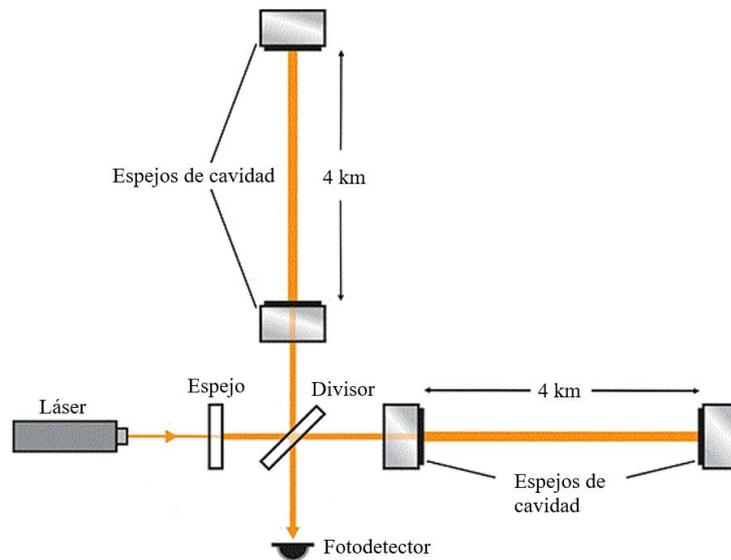


Figura 2.25: Estructura de un interferómetro LIGO [47]

Normalmente, ambos haces de luz estarán en fase y recorrerán la misma distancia de forma que, al fusionarse de nuevo tras reflejarse en los espejos de cada extremo, la interferencia entre ellos será destructiva. Sin embargo, las ondas gravitacionales provocan un estiramiento en uno de los caminos y una compresión en el otro, es decir, los haces recorrerán distancias diferentes. Por lo tanto, cuando vuelven a fusionarse no se encuentran alineadas en fase y, por tanto, la interferencia no será destructiva y se detectaría luz a la salida (registrando así una onda gravitacional).

### 2.6.3.2 OCT

La tomografía de coherencia óptica OCT (Optical Coherence Tomography) se emplea para realizar imágenes en tiempo real utilizando la interferencia entre haces de luz producida entre una señal óptica de referencia y una señal de muestra; siendo ampliamente empleada en oftalmología para la examinación y detección de problemas en la retina (ilustrado en la Figura 2.26), o para el estudio de las arterias coronarias durante intervenciones intravasculares [48, 49]. Para ello, típicamente se emplea un interferómetro Michelson cuyo divisor separa la luz emitida por la fuente en dos ramas: una de ellas dirige la luz hacia un reflector que refleja de vuelta la luz y es considerada como referencia, mientras que la otra conducirá el haz de luz hacia la muestra a examinar sobre la que se producirá también una reflexión. Cuando los haces reflejados de ambas ramas se recombinan, se genera un patrón de interferencia. Existen principalmente dos

tecnologías OCT, una de ellas en el dominio del tiempo (TD-OCT) y otra en el dominio de Fourier (FD-OCT).

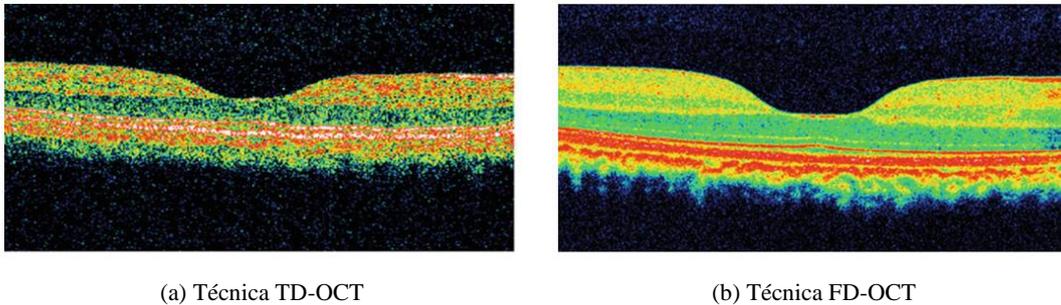


Figura 2.26: Imagen de retina empleando técnicas de OCT [50]

El método TD-OCT emplea un reflector móvil, por lo que la luz de la rama de referencia sufra retardos variables; de manera que la luz reflejada en la muestra producirá patrones de interferencia cuando la distancia óptica que recorren ambos haces es la misma. De esta forma, se puede analizar la profundidad de la muestra, ya que la luz que penetra en las capas de la muestra y se refleja recorre mayor distancia que la reflejada en su superficie, produciendo patrones de interferencia con la luz proveniente de diferentes posiciones del reflector. El funcionamiento de este método queda ilustrado en la Figura 2.27(a).

Por otra parte, el método FD-OCT mantiene el reflector de la trayectoria de referencia en una posición fija y analiza la profundidad de la muestra empleando diferentes longitudes de onda diferentes, por lo que la reflectividad de cada longitud de onda vendrá dada por los diferentes índices de refracción de la muestra [51]. Se pueden realizar dos implementaciones con este método: empleando una fuente de banda ancha y un espectrómetro para medir las reflexiones en cada longitud de onda o a través de una fuente de banda estrecha sintonizable en un ancho de banda determinado que permitirá analizar en el detector la reflectividad para cada longitud de onda, ambos ilustrados en la Figura 2.27(b) y en la Figura 2.27(c), respectivamente.

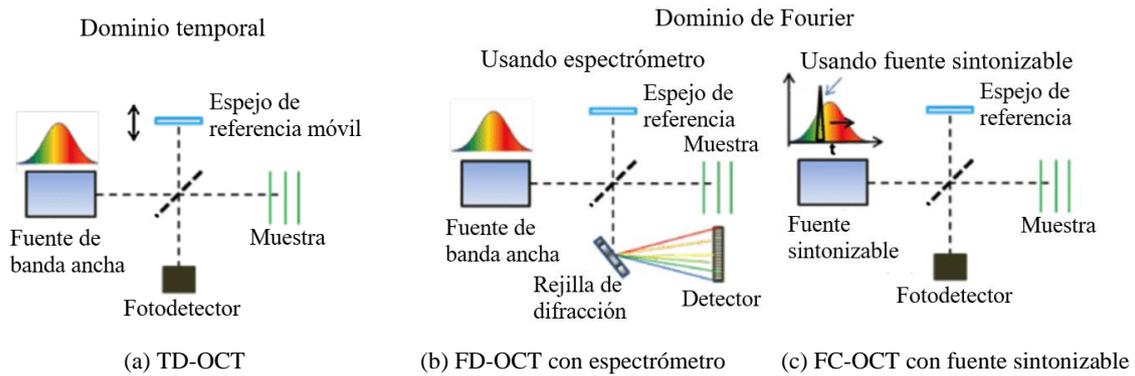


Figura 2.27: Implementación de técnicas OCT [52]

### 2.6.3.3 InSAR

Para medir el relieve de la superficie de la Tierra se emplean satélites de radar de apertura sintética o satélites SAR (Synthetic-Aperture Radar), que forman imágenes emitiendo señales radar hacia la superficie terrestre y analizando la señal reflejada [53]. Éstas se caracterizan por su amplitud, que determina la intensidad de la señal reflejada (los elementos más reflectantes producirán reflexiones de mayor intensidad); y por su fase, que es determinante en la medición de la distancia al elemento.

El radar de apertura sintética interferométrica o InSAR (Interferometric Synthetic-Aperture Radar) es un método que combina la tecnología anterior con la interferometría, que se encarga de medir el desfase entre dos o más imágenes obtenidas de la misma porción de superficie terrestre en diferentes momentos para detectar cambios en la topografía como se muestra en la Figura 2.28 [54]. Cada píxel de cada imagen queda definido por la amplitud y la fase de la señal recibida determinando, como se citó anteriormente, la capacidad de retrodispersión (imagen de amplitud) y la distancia al objetivo (imagen de fase), respectivamente.

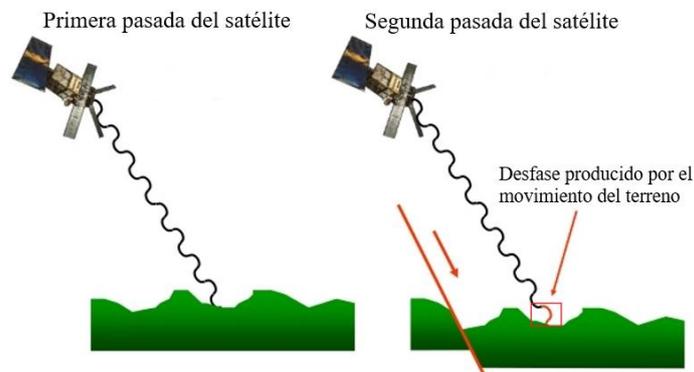


Figura 2.28: Principio de funcionamiento de InSAR [55]

A partir de dos o más imágenes de fase de una misma área es posible medir las diferencias de fase entre ellas, formando una imagen como la que ilustra la Figura 2.29, que recibe el nombre de interferograma y en el que cada franja de interferencia queda determinada por líneas con la misma fase.

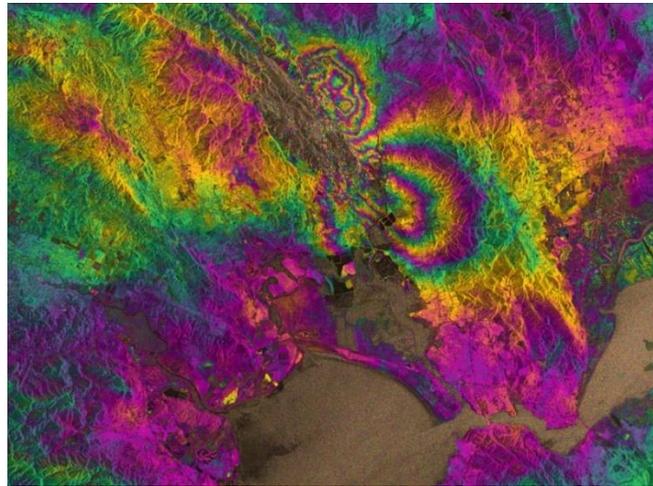


Figura 2.29: Interferograma del Valle de Napa tras un terremoto [55]

Las medidas obtenidas con los interferogramas permiten conocer los cambios espaciales y/o dieléctricos de la superficie terrestre. Por lo tanto, InSAR permite medir los cambios topográficos producidos por terremotos, vigilar y evaluar desastres producidos por volcanes y desprendimientos de tierra, monitorear los niveles de agua o nieve y los cambios en el suelo por alteraciones de aguas subterráneas, detectar movimientos glaciares y analizar la altura y espesor de la vegetación en zonas forestales.

## 2.7 Controladores láser y receptores ópticos

### 2.7.1 Controladores láser y modos de operación

La longitud de onda a la que trabaja un láser depende de la corriente que recibe y de la temperatura, por lo que es necesario mantener cierta estabilidad de corriente y temperatura para asegurar el correcto funcionamiento del láser y prevenir daños [56]. Por lo tanto, es esencial contar con electrónica que cumpla los requerimientos anteriores. La Figura 2.30 muestra un controlador láser comercial del fabricante Thorlabs.



Figura 2.30: Controlador láser comercial [57]

Los controladores láser pueden clasificarse de forma general como controladores de corriente continua, pulsados, de baja potencia y de alta potencia [58]. Los controladores láser de corriente constante mantienen, como su propio nombre indica, un nivel de corriente constante en cada momento. A diferencia de los anteriores, los controladores láser pulsados emiten corriente solamente durante el ciclo de trabajo. Comercialmente, es común referirse a los controladores láser como controladores de baja potencia y alta potencia, aunque el nivel de salida no se mide en vatios sino en microamperios, miliamperios y amperios. Aproximadamente, los controladores de baja potencia comprenden el rango de corriente de salida definido entre 1 miliamperio y 5 amperios, mientras que a partir de 5 amperios se consideran controladores de alta potencia.

Existen dos modos de operación para trabajar con láseres semiconductores: modo de corriente constante y modo de potencia constante [56].

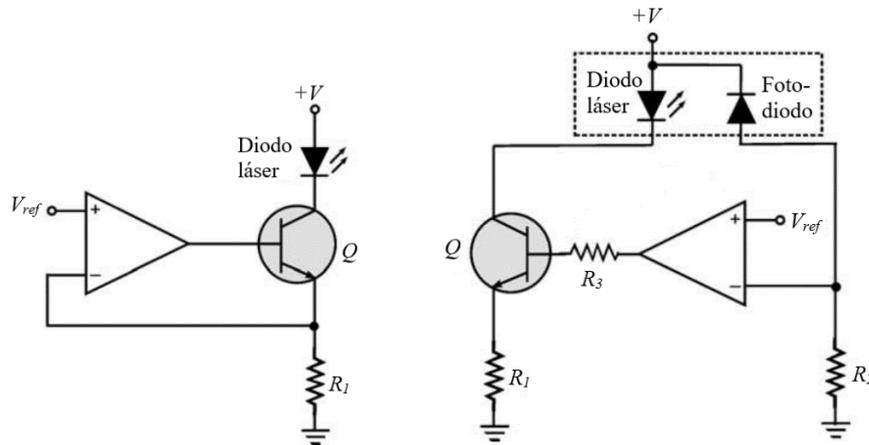
### 2.7.1.1 Modo de corriente constante

El modo de corriente constante mantiene, como su nombre indica, la corriente de alimentación del láser constante (además de llevar un control preciso de la temperatura), independientemente de las variaciones en la potencia de entrada en la fuente. Para ello, tal y como ilustra la Figura 2.31(a), el circuito incorpora un elemento que mide la corriente y produce un voltaje proporcional a ella, el cuál es comparado con un voltaje de referencia (el necesario para obtener una determinada corriente). Esta comparación produce una señal de error, que es retroalimentada para restaurar la corriente deseada.

### 2.7.1.2 Modo de potencia constante

Por otra parte, el modo de potencia constante se encarga de mantener constante la potencia de salida. Si el láser es alimentado con una corriente constante, el calor disipado produce un incremento en la temperatura que lleva a una reducción en la potencia de

salida. Para ello, en su diseño; ilustrado en la Figura 2.31(b), se emplea una fuente de corriente (por ejemplo, un fotodiodo) proporcional a la potencia de salida del diodo láser, que se ajusta a través de realimentación para mantener una potencia de salida constante. Sin embargo, este tipo de operación puede provocar una situación de fuga térmica, dañando al láser, por lo que el modo de corriente constante suele ser la mejor opción en la mayoría de las situaciones.



(a) Circuito controlador de corriente constante (b) Circuito controlador de potencia constante

Figura 2.31: Circuitos de controladores láser [56]

## 2.7.2 Receptores ópticos y diseño de front end

Un receptor óptico es el sistema encargado de convertir una señal óptica en eléctrica, para su posterior procesamiento y recuperación de datos; y su diseño depende de las características empleadas por el transmisor [14]. Generalmente, se puede dividir en tres etapas diferentes: el front end, encargado de convertir la señal óptica en eléctrica, además de amplificarla (siendo ilustrados algunos modelos comerciales de Thorlabs en la Figura 2.32); una etapa ecualización y amplificación para limitar el voltaje de salida, y filtrado para eliminar el ruido; y un circuito de decisión que asigna unos valores determinados a la salida de la etapa anterior.



Figura 2.32: Receptores ópticos comerciales [59]

Esta sección se centrará en la etapa de front end, así como en algunos de sus diseños. Durante esta etapa, el objetivo es minimizar el ruido para mejorar la sensibilidad del receptor lo máximo posible, manteniendo un ancho de banda adecuado [10, 14]. Este ancho de banda  $B$  queda determinado por

$$B = \frac{1}{2\pi R_L C_T} \quad (2.33)$$

donde  $R_L$  es la resistencia de la carga (en la práctica, se debe tener en cuenta la impedancia de entrada del amplificador) y  $C_T$  la capacitancia total. Existen varias estructuras de diseño, las cuales serán explicadas a continuación.

### 2.7.2.1 Front-end de baja impedancia

Esta configuración, ilustrada en la Figura 2.33(a) consta de un amplificador y un detector en paralelo. Para obtener un ancho de banda óptimo, es preciso reducir el valor de la resistencia de carga total  $R_L$ . Sin embargo, el efecto del ruido aumentará a medida que incremente el ancho de banda, limitando la sensibilidad del receptor.

### 2.7.2.2 Front-end de alta impedancia

En este tipo de configuración, la resistencia de carga  $R_L$  se incrementa considerablemente con respecto a la configuración anterior. Esto implica una reducción de los efectos del ruido, mejorando así la sensibilidad, pero también la reducción del ancho de banda. Por lo tanto, es común emplear ecualizadores para aumentar el ancho de banda.

### 2.7.2.3 Front-end de transimpedancia

Esta configuración emplea un amplificador con una alta impedancia de entrada (consiguiendo así una reducción del ruido en la entrada del amplificador), cuya resistencia de carga  $R_L$  se conecta como una resistencia de realimentación para el amplificador

(realimentación negativa) como se muestra en la Figura 2.33(b). Este efecto produce una reducción del valor efectivo de la impedancia de entrada del amplificador, incrementando a su vez el ancho de banda.

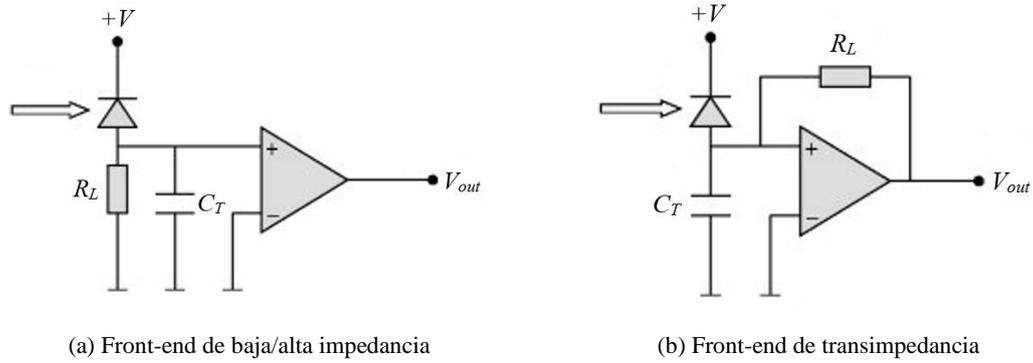


Figura 2.33: Diferentes topologías de front-end [60]

# Capítulo 3

## Interferómetro óptico

Este capítulo está dedicado a la implementación de un interferómetro de Michelson (introducido en la sección 2.6.1.2). En primer lugar, se calculará su longitud de coherencia en base a nuestros parámetros, y posteriormente se realizarán diferentes medidas del desplazamiento de uno de los espejos a través de diferentes estímulos. También se detallarán los equipos y la optomecánica empleados, así como el estudio y análisis de interferogramas obtenidos.

### 3.1 Longitud de coherencia

La longitud de coherencia en un interferómetro se puede definir como la máxima diferencia de camino que se puede tener entre las ramas de un interferómetro para las que se puede observar la interferencia.

Este valor puede relacionarse con el ancho de línea de la fuente láser, que determina el rango de frecuencias en torno a una frecuencia central en el cual el láser emite luz. Por lo tanto, la longitud de coherencia será mayor a medida que disminuye el ancho de línea. Asumiendo que el espectro de emisión de la fuente láser sigue una distribución gaussiana, la longitud de coherencia  $L_c$  se calcula como

$$L_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{n_g \Delta\lambda} \quad (3.1)$$

donde  $n_g$  es el índice de refracción de grupo en el medio (cuyo valor se considera 1 ya que la luz se propaga por el aire),  $\lambda$  es la longitud de onda central de emisión y  $\Delta\lambda$  es el ancho espectral de la fuente láser expresado en rango de longitudes de onda [61].

En nuestro caso, y como veremos más adelante, la hoja de especificaciones de la fuente láser TLX1 nos indica que su ancho de línea  $\Delta\nu$  es de 10 kHz. Para poder emplear la

fórmula anterior, debemos convertir este valor en su equivalente expresado en longitud de onda de la siguiente forma

$$\Delta\lambda = \Delta\nu \frac{\lambda^2}{c} \quad (3.2)$$

en la que  $\Delta\lambda$  es el ancho espectral expresado en longitud de onda,  $\lambda$  es la longitud de onda central de la emisión (en nuestro caso 1550 nm) y  $c$  la velocidad de la luz. Despejando su valor obtenemos que  $\Delta\lambda$  tiene un valor de  $8,01 \cdot 10^{-17}$  m, aproximadamente [62].

Una vez calculado este valor, obtenemos que la longitud de coherencia  $L_c$  es de 13235,38 m. Esto nos indica que los haces de luz dejarán de interferir cuando la diferencia entre sus distancias de propagación supere esa distancia. En nuestro caso, la distancia óptica recorrida es mucho menor, por lo que siempre se observará interferencia.

## 3.2 Implementación del interferómetro

Tal y como se describió en la sección dedicada al interferómetro de Michelson en el capítulo anterior, éste consta de un divisor que se encargará de dividir el haz proveniente de una fuente láser en dos caminos o “brazos”. Estos brazos tendrán un espejo al final, siendo uno de ellos fijo y otro móvil tal y como se ilustra en la Figura 3.1.

El objetivo será obtener el desplazamiento del espejo móvil en situaciones diferentes a través de la señal de interferencia captada por un osciloscopio. Dicha señal alcanzará valores máximos cuando la diferencia de trayectoria recorrida entre ambos haces produzca una interferencia constructiva, mientras que sus valores mínimos se corresponderán con una interferencia destructiva.

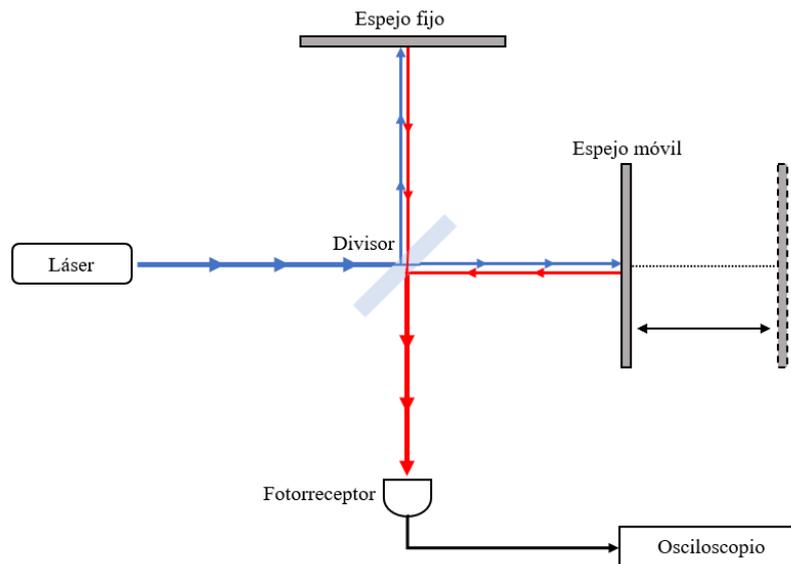


Figura 3.1: Diseño esquemático del interferómetro

Para llevar a cabo la calibración del interferómetro, se insertan en primer lugar los componentes del interferómetro sobre postes que permiten variar su elevación anclados en una base que asegura su sujeción. Además, el láser, el fotorreceptor y el espejo móvil se sitúan sobre raíles que permiten su movimiento en un único eje sobre la base; mientras que el divisor de haz puede rotar para conseguir que los haces de cada brazo lleguen a los espejos, así como la llegada posteriormente de los haces superpuestos al fotorreceptor. Dado que la luz empleada es infrarroja, se emplea una tarjeta de detección que permite la visualización de dicha luz, a través de la cual es posible seguir la trayectoria de los haces para ajustar las posiciones y alturas idóneas de cada componente y asegurar la correcta llegada al fotorreceptor. La Figura 3.2 muestra la montura de los componentes del interferómetro. Tras realizar las rectificaciones adecuadas, es necesario alinear los haces correctamente para que se superpongan de manera adecuada al incidir en el fotorreceptor y obtener una interferencia con la máxima visibilidad posible, gracias a lo cual las medidas de desplazamiento serán más exactas. Para ello, se realizan ajustes mucho más precisos utilizando las monturas de los espejos, que permiten variar la inclinación de éstos de forma muy precisa, y se dan toques a uno de los espejos para visualizar la interferencia en el osciloscopio. Además, se fijan 20 dB de ganancia en el fotorreceptor para obtener el mayor rango dinámico de amplitud (a partir de 30 dB el fotorreceptor satura), obteniendo finalmente la distribución de los componentes ilustrada en la Figura 3.2.

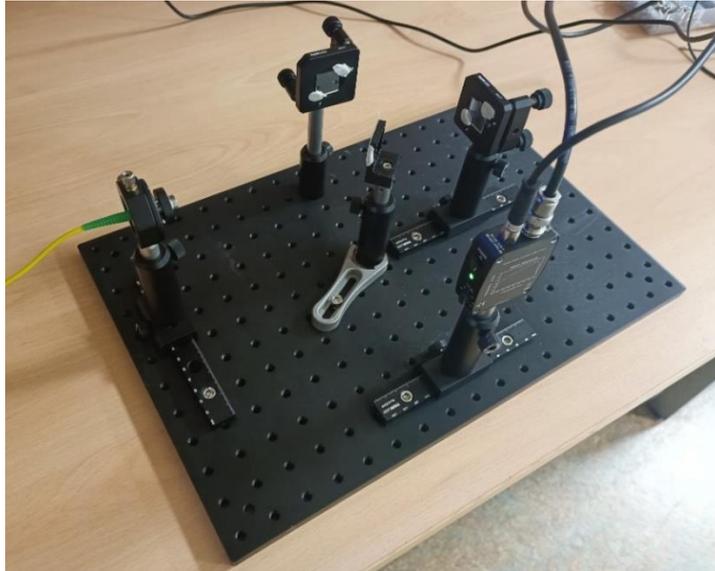


Figura 3.2: Montaje del interferómetro tras su calibración

Los detalles del fotorreceptor, así como los del resto de equipos y elementos empleados en la implementación y calibración del interferómetro, se detallan a continuación.

### 3.2.1 Fuente láser

La fuente láser empleada en el interferómetro es el equipo TLX1 de Thorlabs ilustrado en la Figura 3.3. El láser de esta fuente emite en la banda C (encontrándose en la tercera ventana de transmisión en fibra óptica, siendo ésta la de menor pérdidas), en el rango de longitudes de onda comprendido entre 1527,6 nm y 1565,5 nm [63].



Figura 3.3: Fuente láser TLX1 [63]

Este láser tiene una potencia óptica de salida típica de 13,5 dBm (pudiendo variar entre 12,5 dBm y 14,5 dBm) y un ancho de línea de 10 kHz que influirá en la longitud de coherencia del interferómetro.

Este equipo cuenta con un atenuador óptico variable, ilustrado en la Figura 3.4, que se encargará de estabilizar y controlar la atenuación o la potencia de salida del láser, pudiendo emplearse también un láser externo como entrada y cuya potencia de entrada no debe superar los 20 dBm.

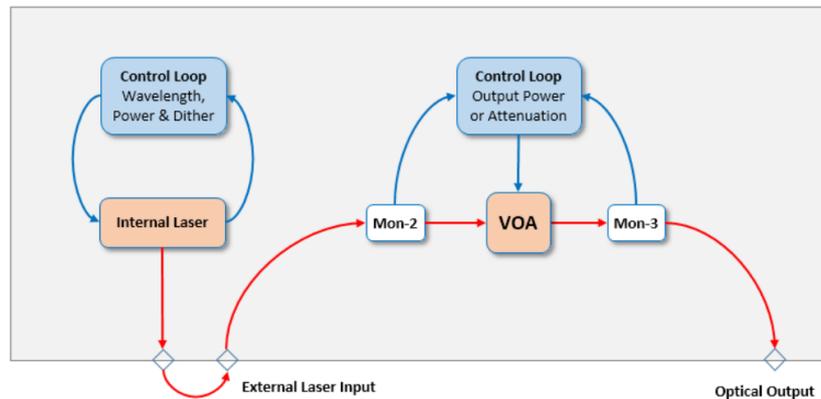


Figura 3.4: Diagrama de bloques del equipo TLX1 [63]

### 3.2.2 Medidor de potencia

Para medir la potencia óptica en los brazos del interferómetro y realizar el posterior balance de potencias (detallado en el punto 3.3), se ha empleado el kit PM122D del fabricante Thorlabs. Este kit está formado, como se muestra en la Figura 3.5, por la consola digital PM100D y el sensor de fotodiodo S122C.



Figura 3.5: Kit PM122D [64]

El medidor PM100D se encarga de medir y mostrar la potencia o energía proveniente de fuentes monocromáticas empleando un sensor de fotodiodo, térmico o piroeléctrico. En nuestro caso, medirá la potencia obtenida por un sensor de fotodiodo.

Por otra parte, el sensor S122C será utilizado para absorber la luz del láser. Este detector de germanio trabaja en el rango de potencia comprendido entre 50 nW y 40 mW, pudiendo abarcar longitudes de onda de 700 nm a 1800 nm y cuyo pico de respuesta se encuentra en torno a 1550 nm, tal y como muestra la Figura 3.6 [64].

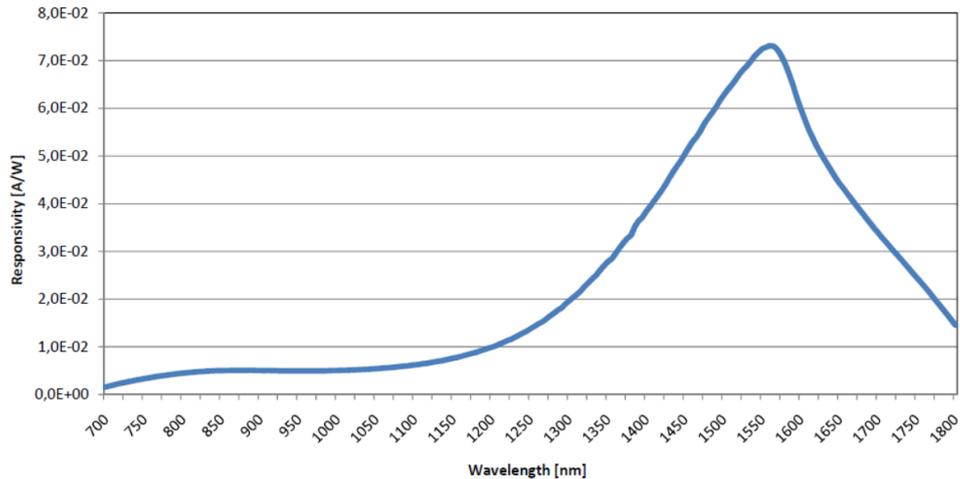


Figura 3.6: Respuesta del sensor S122C [64]

### 3.2.3 Fotorreceptor comercial

Para la visualización de la interferencia en el osciloscopio durante las primeras pruebas del interferómetro se ha utilizado el fotorreceptor comercial de Thorlabs PDA10CS2 (ilustrado en la Figura 3.7), formado por un fotodiodo PIN polarizado inversamente conectado a un TIA de ganancia conmutable, que se puede variar en pasos de 10 dB (hasta 70 dB) girando la perilla de control situada en uno de los laterales del detector [65].



Figura 3.7: Fotorreceptor PDA10CS2 [65]

Este fotorreceptor cuenta con un área activa cuyo diámetro es de 1 mm, permite una corriente máxima de 100 mA y un voltaje de salida de hasta 5 V y 10 V para cargas de 50  $\Omega$  y de alta impedancia, respectivamente. El ancho de banda (con 0 dB de ganancia) es de 13 MHz y el rango de longitudes de onda en el que se puede trabajar está comprendido entre 900 nm y 1700 nm, con el pico de respuesta en torno a 1550 nm (con un valor típico de 1,05 A/W) tal y como muestra la Figura 3.8.

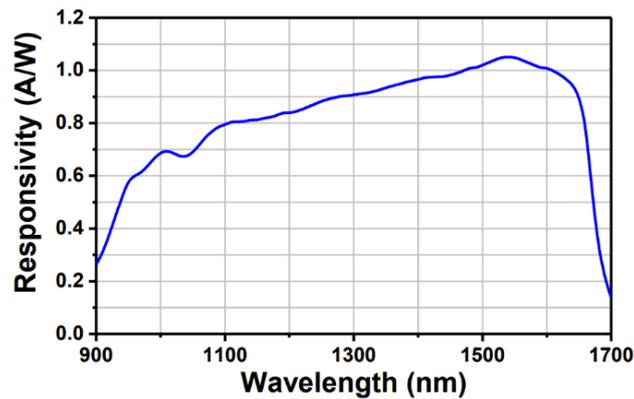


Figura 3.8: Respuesta del fotorreceptor PDA10CS2 [65]

### 3.2.4 Osciloscopio

La salida del fotorreceptor citado en el punto anterior se ha mostrado y analizado empleando el osciloscopio WaveRunner 6051 del fabricante LeCroy, ilustrado en la Figura 3.9. Este osciloscopio tiene un ancho de banda de 500 MHz y una tasa de muestreo de 5 GS/s (5000 millones de muestras por segundo), haciéndolo idóneo para capturar y mostrar señales de hasta esa frecuencia con alta precisión a través de dos canales diferentes, pudiendo ser posible visualizar dos señales simultáneamente [66].



Figura 3.9: Osciloscopio WaveRunner 6051

### 3.2.5 Tarjeta de detección

Para visualizar la luz infrarroja y calibrar adecuadamente el interferómetro, se ha empleado la tarjeta de detección VRC2 de Thorlabs, ilustrada en la Figura 3.10

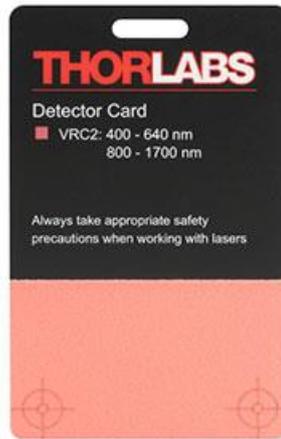


Figura 3.10: Tarjeta de detección VRC2 [67]

Esta tarjeta cuenta con una región fotosensible que absorbe la luz del espectro visible (400 nm – 640 nm) e infrarrojo (800 nm – 1700 nm), permitiendo la visualización de ésta última [67].

### 3.2.6 Optomecánica

Para el montaje idóneo del interferómetro, se han empleado diferentes elementos optomecánicos:

- **Placa:** La placa de aluminio MB3045/M de Thorlabs se ha utilizado como base del interferómetro. Sus dimensiones son de 300 mm x 450 mm; contando con 5 huecos de sujeción para fijar la placa si se desea y 216 para la fijación de elementos sobre ella [68].
- **Divisor:** Para dividir el haz principal, así como para unir posteriormente los haces de cada brazo del interferómetro en el fotorreceptor, se ha empleado un protector de cristal templado para teléfono móvil.
- **Raíles:** Fijados a la placa, se han empleado para desplazar sobre un único eje diferentes elementos (como el espejo móvil). El modelo elegido; del fabricante Thorlabs, es el RLA150/M y tiene una longitud de 150 mm con 5 huecos para su fijación [69].
- **Monturas para espejo:** Se han empleado dos monturas KS1T de Thorlabs para la fijación y alineación de los espejos. Para ello, cuentan con tres ajustadores que permiten el movimiento preciso en cada uno de los tres ejes, facilitando así la alineación de los haces de luz [70].

- Monturas para colimador: Para colimar la luz procedente de la fuente láser, se ha elegido el colimador F110APC-1550 del fabricante Thorlabs, que trabaja a una longitud de onda de 1550 nm y produce un haz de 1,21 mm de diámetro [71]. Este colimador se ha insertado en el adaptador cinemático KAD11F para ajustar y controlar el ángulo de inclinación hacia adelante y hacia atrás (pitch) y la rotación alrededor del eje central (yaw), para posteriormente acoplar el conjunto en la montura LM1XY con el fin de ajustar los ejes [72, 73]. Ambas monturas (del fabricante Thorlabs), así como el colimador, quedan ilustrados en la Figura 3.11.

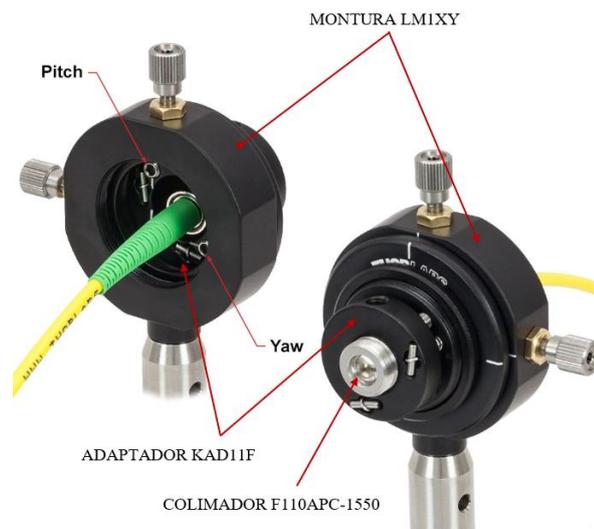


Figura 3.11: Montura y colimador empleados [74]

### 3.3 Balance de potencia

El objetivo del balance de potencia es el de obtener la potencia óptica en los brazos del interferómetro y a la entrada del fotorreceptor, así como las pérdidas y los porcentajes de la luz que se refleja en el divisor y la que lo atraviesa; para estimar teóricamente la visibilidad de los interferogramas obtenidos posteriormente. Además, este balance de potencia será útil para diseñar adecuadamente el fotorreceptor y elegir los componentes idóneos para ello.

Utilizando el medidor de potencia citado anteriormente, se sitúa el sensor en las posiciones especificadas en la Figura 3.12 (1, 2 y 3) con el fin de medir la potencia incidente inyectada por el láser y en ambas ramas del interferómetro tras la división del haz.

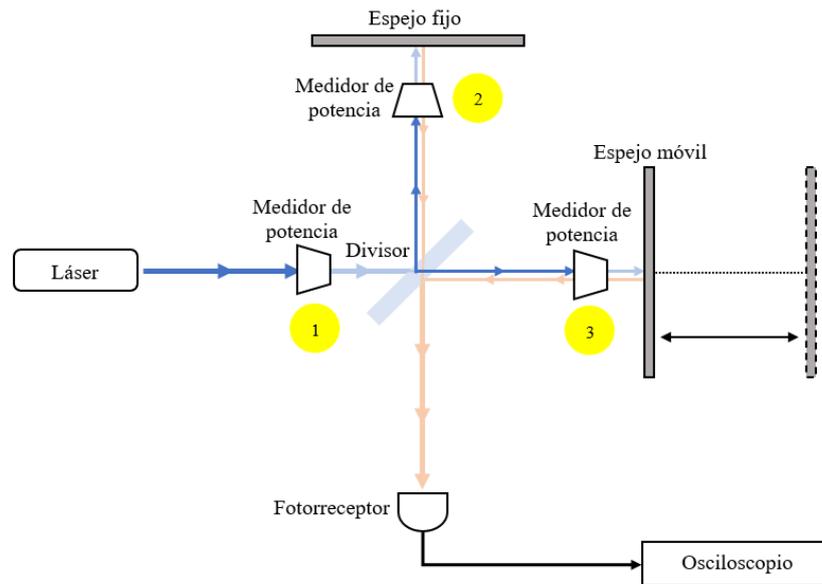


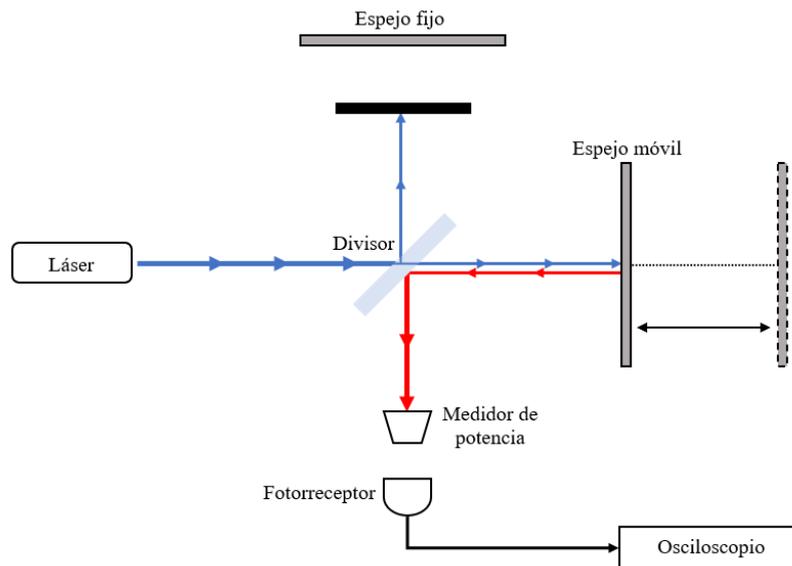
Figura 3.12: Posiciones del sensor para medir la potencia

En la Tabla 3.1 se recogen, tras 5 medidas consecutivas, los valores de potencia obtenidos en cada posición y las pérdidas provocadas por difusión y absorción en los componentes, así como el valor medio y la varianza en cada caso. Además, a partir de los valores medios obtenidos se calculan los porcentajes de potencia en cada brazo y de pérdidas.

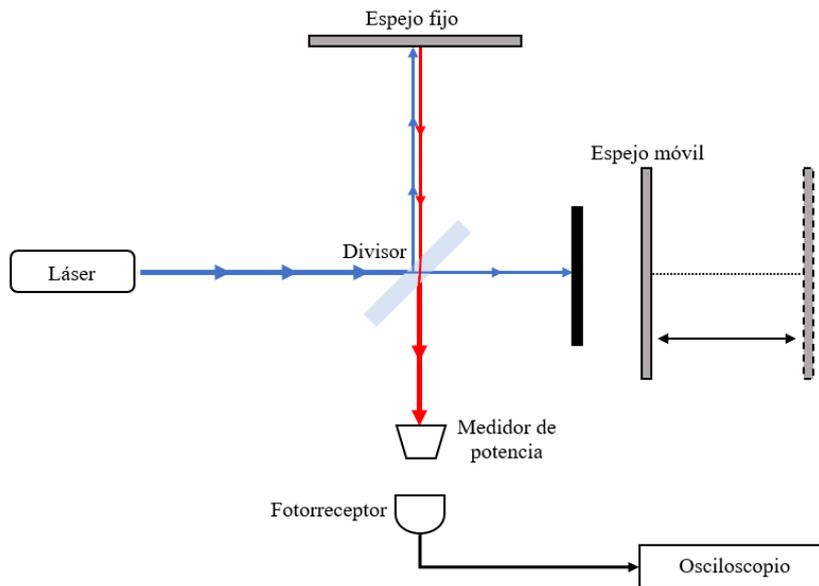
Medida	Posición			Pérdidas
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	
<b>Medida 1</b>	15,33 mW	0,563 mW	12,66 mW	2,107 mW
<b>Medida 2</b>	15,23 mW	0,523 mW	12,91 mW	1,797 mW
<b>Medida 3</b>	15,41 mW	0,518 mW	12,89 mW	2,002 mW
<b>Medida 4</b>	15,40 mW	0,491 mW	12,86 mW	2,049 mW
<b>Medida 5</b>	15,35 mW	0,503 mW	12,73 mW	2,117 mW
<b>Media</b>	15,344 mW	0,5196 mW	12,81 mW	2,0144 mW
<b>Varianza</b>	$4,14 \cdot 10^{-3} \text{ mW}^2$	$5,98 \cdot 10^{-4} \text{ mW}^2$	$9,56 \cdot 10^{-3} \text{ mW}^2$	$1,35 \cdot 10^{-2} \text{ mW}^2$
<b>Porcentaje</b>		3,39%	83,48%	13,13%

Tabla 3.1: Valores de potencia de salida y en cada brazo

El siguiente paso será obtener el valor medio de potencia que llega al fotorreceptor. En este caso, se ha medido la potencia óptica total que llega al fotorreceptor y la que llega individualmente de cada una de las ramas (bloqueando cada uno de los haces tal y como muestran las situaciones de la Figura 3.13(a) y la Figura 3.13(b)).



(a) Bloqueo del haz en el brazo con el espejo fijo



(b) Bloqueo del haz en el brazo con el espejo móvil

Figura 3.13: Situaciones de bloqueo en cada brazo

Al igual que en el caso anterior, se realizan 5 medidas diferentes y se recogen en la Tabla 3.2 los valores obtenidos en ambas posiciones y las pérdidas, el valor medio y la varianza; así como sus respectivos porcentajes.

Medida	Situación			Error
	Total	Caso (a)	Caso (b)	
<b>Medida 1</b>	1,55 mW	1,10 mW	0,295 mW	0,155 mW
<b>Medida 2</b>	1,37 mW	1,09 mW	0,276 mW	0,004 mW
<b>Medida 3</b>	1,39 mW	1,14 mW	0,275 mW	-0,025 mW
<b>Medida 4</b>	1,52 mW	1,12 mW	0,286 mW	0,114 mW
<b>Medida 5</b>	1,35 mW	1,08 mW	0,273 mW	-0.003 mW
<b>Media</b>	1,436 mW	1,106 mW	0,281 mW	0,049 mW
<b>Varianza</b>	$6,78 \cdot 10^{-3} \text{ mW}^2$	$4,64 \cdot 10^{-4} \text{ mW}^2$	$6,92 \cdot 10^{-5} \text{ mW}^2$	$5,13 \cdot 10^{-3} \text{ mW}^2$
<b>Porcentaje</b>		77,02%	19,57%	3,41%

Tabla 3.2: Valores de potencia a la entrada del fotorreceptor

A la vista de los resultados obtenidos, y asumiendo que los espejos de cada brazo reflejan por completo la luz, se puede afirmar que las pérdidas son ocasionadas por el divisor, y que gran parte de la luz incidente en él lo atraviesa mientras que una cantidad mucho menor es reflejada en su superficie.

### 3.4 Interferograma

Con el balance de potencia realizado en la sección anterior, es posible estimar de forma teórica la visibilidad del interferograma resultante y los valores de interferencia constructiva y destructiva utilizando el fotorreceptor comercial. Para ello, se analiza en primer lugar el nivel de potencia incidente en el fotorreceptor procedente de cada rama (cuyos valores medios se muestran en la Tabla 3.2) para obtener así los valores máximo y mínimo (sumando y restando dichos valores); es decir, el valor de potencia que se alcanza al producirse una interferencia constructiva y destructiva, respectivamente. Sin embargo, se debe tener en cuenta el área activa del fotorreceptor comercial, cuyo diámetro (1 mm) es menor que el del haz de luz láser (1,21 mm) y, por tanto, parte de la potencia óptica se perderá al incidir fuera de ésta. Para saber la potencia que incide sobre dicha área debemos obtener la densidad de potencia  $I$  (potencia por unidad de superficie del haz), que se calcula como

$$I \left[ \frac{\text{mW}}{\text{mm}^2} \right] = \frac{P_{in} [\text{mW}]}{S_{haz} [\text{mm}^2]} \quad (3.3)$$

siendo  $P_{in}$  la potencia completa del haz y teniendo en cuenta que el área  $S_{haz}$  es circular, por lo que podrá obtenerse con el valor del radio del haz láser.

Una vez obtenida dicha densidad de potencia, podremos obtener la potencia óptica recibida por el fotorreceptor  $P_r$  (asumiendo que el haz y el área activa del fotorreceptor están perfectamente alineados) a través de la fórmula

$$P_r [mW] = I \left[ \frac{mW}{mm^2} \right] \cdot S_{ef} [mm^2] \quad (3.4)$$

en la que  $S_{ef}$  es el área activa del fotorreceptor e  $I$  la densidad de potencia obtenida anteriormente. Esta será la potencia óptica que realmente utilizará el fotodiodo del fotorreceptor para producir una corriente proporcional.

Posteriormente se calcula el valor de la corriente eléctrica producida por el fotorreceptor para ambos valores a partir de su responsividad, cuyo valor (1,05 A/W) nos dan en su hoja de especificaciones. Finalmente, podemos obtener el valor del voltaje de salida, generado por el amplificador de transimpedancia del fotorreceptor, a partir de la hoja de especificaciones. En ella se indica que, para un ajuste de 20 dB, el factor de ganancia es de  $1,51 \cdot 10^4$  V/A para una carga de alta impedancia, obtenida por la configuración del osciloscopio al emplear el acoplamiento AC en él para bloquear la componente continua de la señal de entrada. Los valores máximos y mínimos de potencia, corriente y tensión quedan recogidos en la Tabla 3.3.

Valor	Parámetro				
	Potencia (mW)		Corriente (mA)	Tensión (V)	
	Incidente	Recibida		Sin AC	Con AC
<b>Máximo</b>	1,387	0,947	0,994	15,009	3,043
<b>Mínimo</b>	0,825	0,563	0,591	8,924	-3,043

Tabla 3.3: Parámetros del interferómetro con el fotorreceptor comercial

La diferencia de camino óptico  $\Delta d$  se produce cuando la trayectoria recorrida por cada uno de los haces es de diferente longitud. Este valor puede calcularse como

$$\Delta d = 2 \cdot |L_1 - L_2| = 2 \cdot \Delta L \quad (3.5)$$

siendo así el doble de la diferencia  $\Delta L$  entre las longitudes de cada brazo ( $L_1$  y  $L_2$ ), pudiéndose expresar como una cantidad determinada de longitudes de onda. En nuestro caso, dado que uno de los espejos está fijo y la longitud de su brazo no varía, el valor  $\Delta L$  representa la variación de la longitud del brazo con el espejo móvil (o lo que es lo mismo, el valor de la distancia que se ha movido el espejo).

A su vez, la fase  $\varphi$  está relacionada con la diferencia de camino óptico y la longitud de onda del haz  $\lambda$ , dada por

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot \Delta L = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta L \quad (3.6)$$

Cuando la onda de luz completa un número entero  $m$  de ciclos de oscilación, el valor de la fase es de  $2\pi m$  radianes, por lo que la diferencia de longitudes  $\Delta L$  asociada a dicha fase se calcula como

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta L = 2\pi m; \Delta L = \frac{\lambda}{2} m \quad (3.7)$$

por lo que, entre dos puntos iguales en la interferencia, equivalentes a un ciclo; esa será la distancia  $\Delta L$  recorrida por el espejo. Por lo tanto,  $\lambda/2$  será la distancia requerida para obtener dos interferencias constructivas (puntos máximos) o destructivas (puntos mínimos) consecutivas; siendo  $\lambda/4$  la distancia entre dos puntos que producen una interferencia constructiva y destructiva, respectivamente.

Empleando los datos teóricos calculados en la Tabla 3.3 y aplicando lo anterior, sabemos que los puntos con valores 3,043 V y -3,043 V (tras filtrar la componente continua) se corresponderán con interferencias constructivas y destructivas, respectivamente; y que el paso de un máximo a un mínimo equivale a un desplazamiento del espejo de  $\lambda/4$ . Por lo tanto, para un número  $n$  de máximos y mínimos en la interferencia, el espejo se habrá desplazado  $n\lambda/4$ .

No obstante, cabe la posibilidad de que el desplazamiento sea inferior a  $\lambda/4$  y, por tanto, no se alcance ningún punto de interferencia constructiva o destructiva, por lo que el desplazamiento del espejo  $\Delta L$  se obtiene como

$$\Delta L = \frac{x}{V} \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (3.8)$$

siendo  $x$  la amplitud en voltios para la interferencia observada, cuyo valor es inferior a la visibilidad  $V$ . Siendo esta última la diferencia entre los valores de los puntos de interferencia constructiva y destructiva (en este caso teórico, 6,086 V).

Para demostrar esto utilizando el interferómetro, se realizan dos vibraciones diferentes sobre uno de los espejos: en primer lugar, damos suaves toques al espejo para obtener un mayor desplazamiento y así la visibilidad del interferograma y; posteriormente, se analiza

la interferencia obtenida al hacer vibrar al espejo mediante un sonido. Para ello, se realiza el montaje ilustrado en la Figura 3.14, situando un altavoz cerca de uno de los espejos.

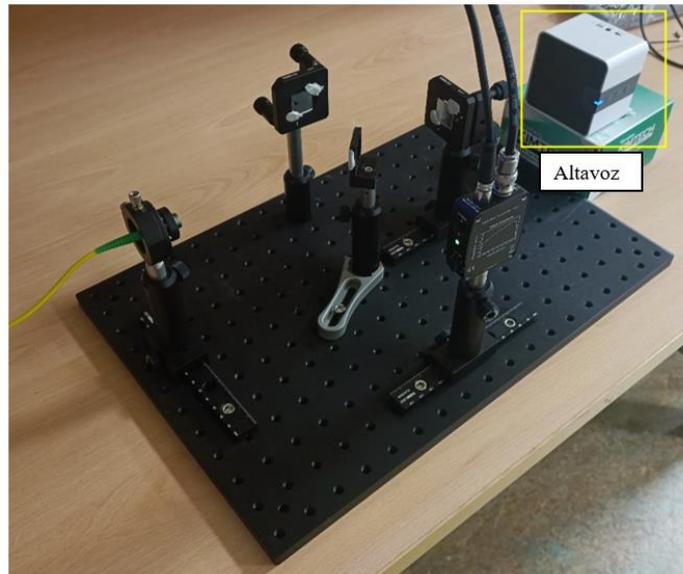


Figura 3.14: Incorporación del altavoz al interferómetro

Tras dar toques al espejo para comprobar la visibilidad de la interferencia obtenida, reproducimos por el altavoz un tono de 1 kHz. La Figura 3.15 muestra los interferogramas obtenidos a través del osciloscopio.

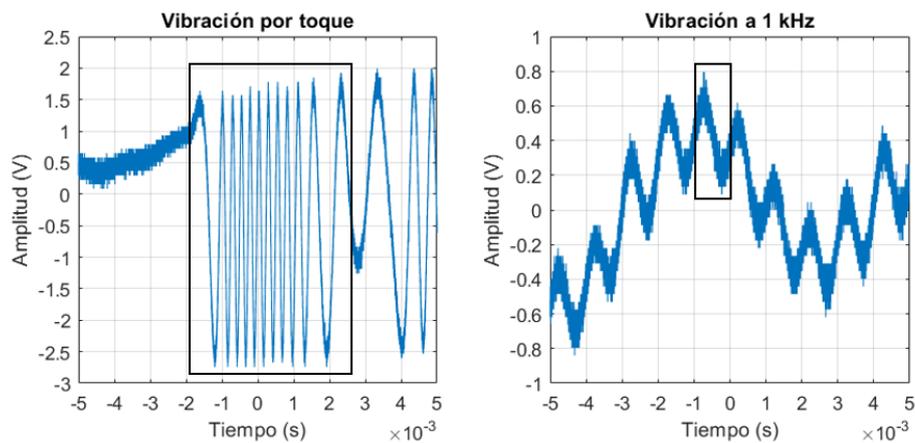


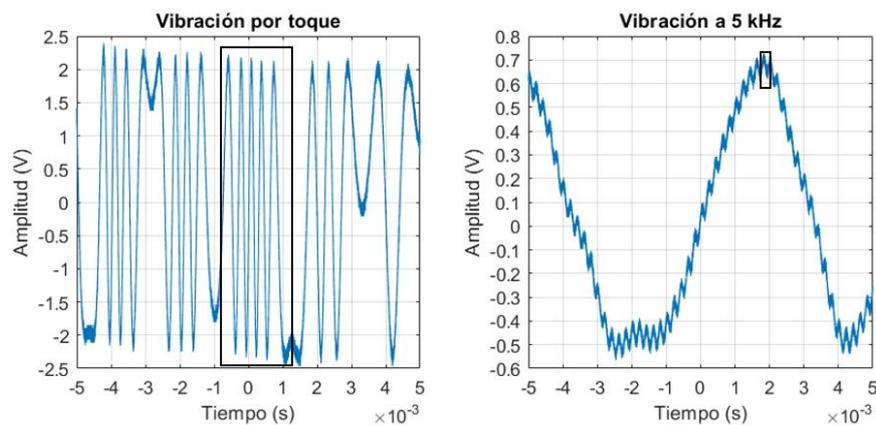
Figura 3.15: Interferogramas por toque y por vibración a 1 kHz

En el interferograma obtenido al dar toques al espejo, se observa que la señal pierde su estabilidad inicial y comienza a oscilar aproximadamente entre 1,75 V y -2,75 V (puntos de interferencia constructiva y destructiva, respectivamente) hasta que se alcanza un valle de mayor amplitud que el resto, que nos indica el final del desplazamiento en un sentido; para después volver a desplazarse en sentido contrario tal y como reflejan las oscilaciones posteriores a dicho instante. Por lo tanto, calculamos el desplazamiento del espejo

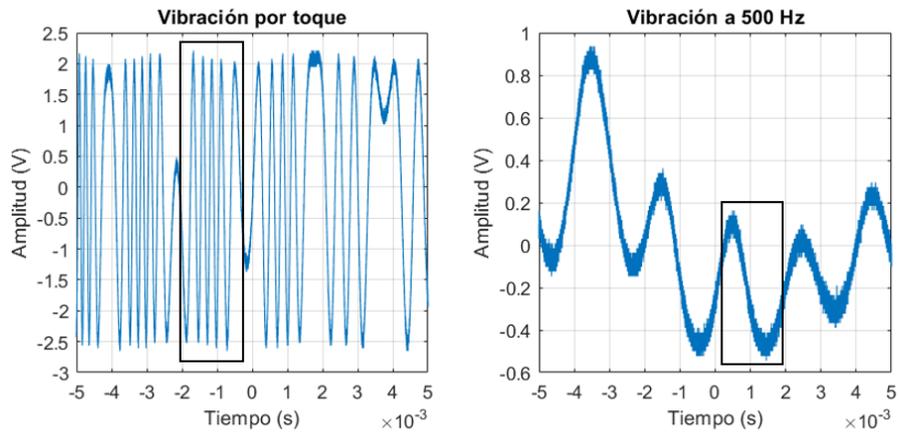
referente a la zona marcada contando los puntos máximos y mínimos (a partir del primer máximo), obteniendo un total de 22. Siguiendo las conclusiones obtenidas de la Ecuación 3.5 y teniendo en cuenta que la longitud de onda  $\lambda$  es de 1550 nm, obtenemos que la distancia que se mueve el espejo es de 8525 nm.

Ahora, calculamos el desplazamiento cuando la vibración es producida por un sonido de 1 kHz. Como vemos, la interferencia obtenida tiene una frecuencia de 1 kHz, aunque se encuentra superpuesta a otra interferencia ocasionada por vibraciones y ruido presentes en el sistema que producen variaciones en la amplitud. Sin embargo, podemos estimar que la distancia entre picos es de aproximadamente 0,6 V fijándonos en la zona indicada, por lo que, si escalamos esta medida a la visibilidad obtenida antes (4,5 V) siguiendo la Ecuación 3.6, obtenemos que el desplazamiento del espejo es de 51,67 nm.

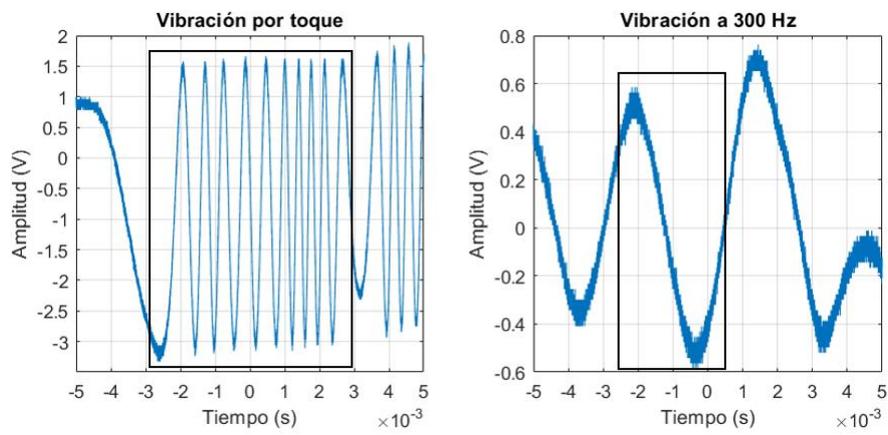
Siguiendo el mismo procedimiento, se vuelve a hacer vibrar el espejo mediante toques (para obtener la visibilidad) y sonidos cuatro veces más empleando diferentes frecuencias, obteniendo los interferogramas ilustrados en la Figura 3.16 y recogiendo los datos en la Tabla 3.4.



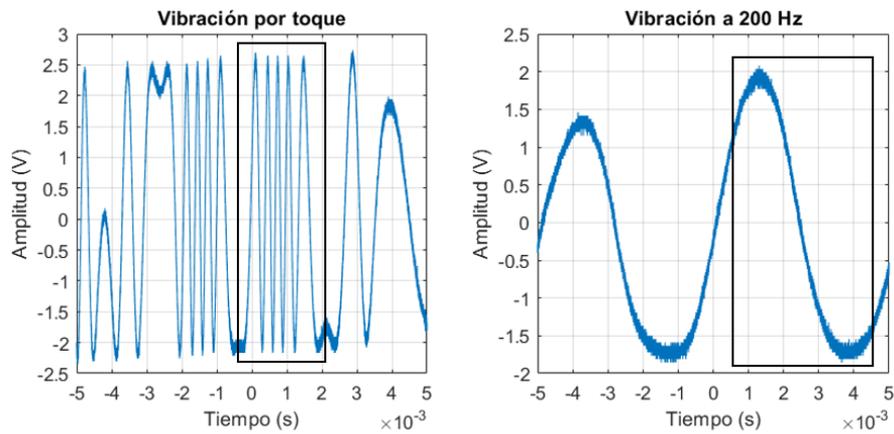
(a) Interferogramas por toque y por vibración a 5 kHz



(b) Interferogramas por toque y por vibración a 500 Hz



(c) Interferogramas por toque y por vibración a 300 Hz



(d) Interferogramas por toque y por vibración a 200 Hz

Figura 3.16: Interferogramas por toque y por vibración a diferentes frecuencias

Caso	Vibración	Parámetro		
		Franjas	Margen	Desplazamiento
(a)	Toque	9	4,5 V	3487,5 nm
	Frecuencia 5 kHz		0,1 V	8,61 nm
(b)	Toque	9	4,5 V	3487,5 nm
	Frecuencia 500 Hz		0,7 V	60,28 nm
(c)	Toque	19	4,75 V	7362,5 nm
	Frecuencia 300 Hz		1,1 V	89,74 nm
(d)	Toque	10	4,75 V	3875 nm
	Frecuencia 200 Hz		3,75 V	305,92 nm

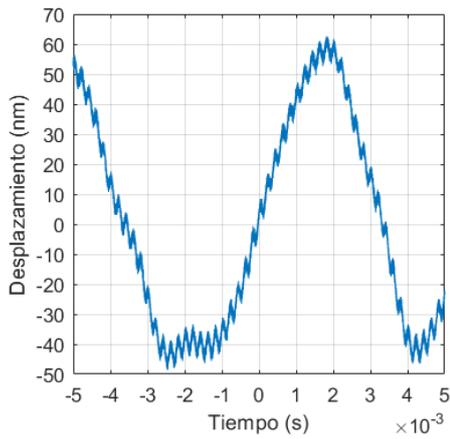
Tabla 3.4: Datos obtenidos de los interferogramas

Observando los datos recogidos, así como los relativos a la frecuencia de 1 kHz, vemos que las vibraciones causadas por toques provocan un desplazamiento mayor a  $\lambda/4$  (teniendo en cuenta que  $\lambda$  es 1550 nm) mientras que las provocadas por los tonos a diferentes frecuencias no alcanzan dicho valor. Del mismo modo, observando las interferencias producidas por sonido vemos que provocan mayores vibraciones en el espejo a medida que la frecuencia disminuye; además de ser menos notable el efecto de las vibraciones causadas por el ruido ambiente.

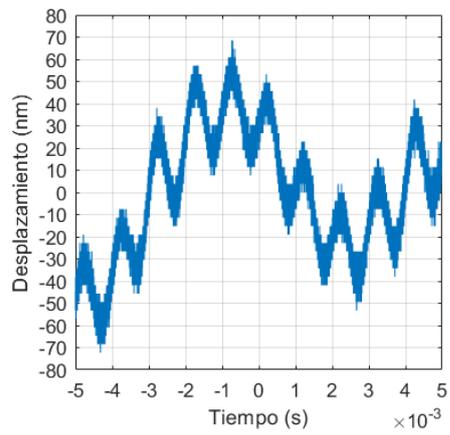
No obstante, es más adecuado obtener una representación del desplazamiento en función del tiempo. Para ello, se calcula el desplazamiento  $\Delta L$  producido equivalente a 1 V como

$$\Delta L = \frac{\lambda/4}{V} \quad (3.9)$$

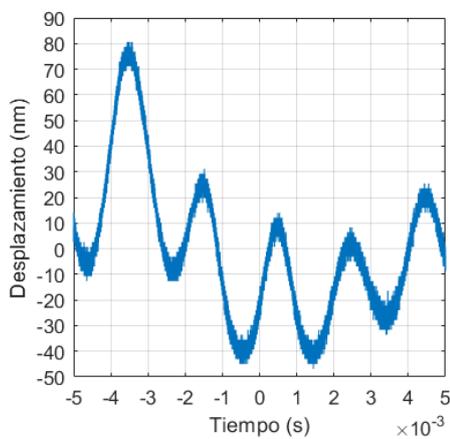
donde  $\lambda$  es la longitud de onda (1550 nm) y  $V$  la visibilidad de la interferencia en cada caso. Este factor se multiplicará por los valores de tensión de las interferencias producidas por las vibraciones de sonido a diferentes frecuencias, obteniendo así las gráficas de desplazamiento ilustradas en la Figura 3.17.



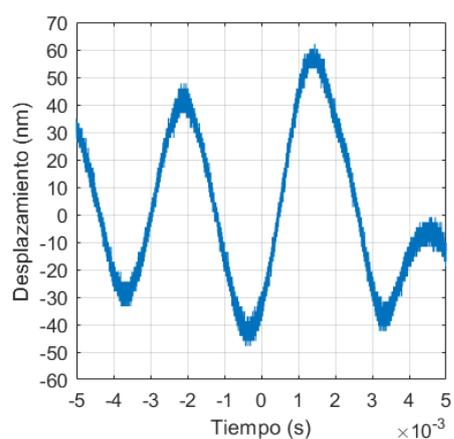
(a) Desplazamiento por vibración de 5 kHz



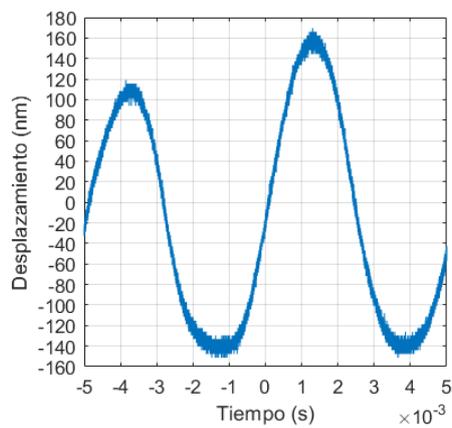
(b) Desplazamiento por vibración de 1 kHz



(c) Desplazamiento por vibración de 500 Hz



(d) Desplazamiento por vibración de 300 Hz



(e) Desplazamiento por vibración de 200 Hz

Figura 3.17: Desplazamiento del espejo por vibración a diferentes frecuencias

# Capítulo 4

## Diseño del fotorreceptor

En este capítulo se documenta el diseño y fabricación de un fotorreceptor y su posterior uso en el interferómetro para obtener datos del desplazamiento de uno de los espejos. Además, se llevará a cabo una simulación con LTSpice para decidir un diseño óptimo del fotorreceptor teniendo en cuenta los elementos empleados para ello, que serán descritos brevemente. El fotorreceptor será soldado en una placa PCB que será situada en un encapsulado fabricado con una impresora 3D, empleando para ello los programas Fusion 360 para su diseño y Ultimaker Cura para exportar los datos a un formato compatible con la impresora.

### 4.1 Captura de especificaciones

A partir de la potencia óptica incidente, se pretende diseñar un fotorreceptor de dos etapas de amplificación que garantice un ancho de banda elevado de entre 800 kHz y 1 MHz, y una salida que supere 1 V de pico. Teniendo en cuenta los niveles de potencia óptica incidentes en la rama del fotorreceptor (obtenidos de la Tabla 3.2), se calcula la potencia recibida empleando el área efectiva del fotodiodo (cuyo diámetro es de 150  $\mu\text{m}$ , como se especificará en la sección 3.2.1) a partir de la densidad de potencia del haz láser (de 1,21 mm de diámetro). La corriente generada por el fotodiodo a partir de dicha potencia se calcula empleando su responsividad (0,95 A/W) y se filtrará para eliminar la componente continua. Los resultados obtenidos se almacenan en la Tabla 4.1, a partir de los cuáles se llevará a cabo el diseño del fotorreceptor.

Valor	Parámetro			
	Potencia (mW)		Corriente (mA)	
	Incidente	Recibida	Sin filtrar	Filtrada
Máximo	1,387	0,021	0,02	0,004
Mínimo	0,825	0,013	0,012	-0,004

Tabla 4.1: Valores de potencia y corriente para el diseño del fotorreceptor

## 4.2 Selección de componentes

### 4.2.1 Fotodiodo

El fotodiodo FGA015 de Thorlabs (ilustrado en la Figura 4.1) ha sido el elegido para la implementación del fotorreceptor, cuya misión será generar una corriente eléctrica proporcional a la potencia óptica incidente (que no deberá exceder los 10 mW) sobre su área activa, cuyo diámetro es de 150  $\mu\text{m}$  [75].



Figura 4.1: Fotodiodo FGA015 [75]

Este fotodiodo tiene una capacitancia de 1,5 pF y trabaja dentro del espectro infrarrojo cercano cubriendo el rango de longitudes de onda comprendido entre 800 nm y 1700 nm, alcanzando el pico de respuesta con un valor de 0,95 A/W en los 1550 nm tal y como muestra la Figura 4.2.

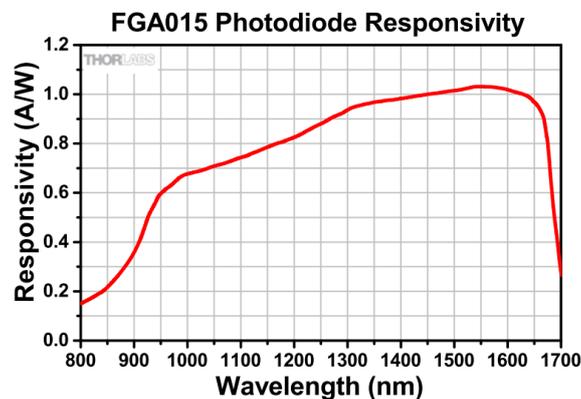


Figura 4.2: Responsividad del fotodiodo FGA015 [75]

### 4.2.2 Amplificador operacional

Para el diseño del amplificador de transimpedancia (detallado posteriormente) y alguna etapa posterior de amplificación, si fuera preciso; se ha optado por el modelo de amplificador operacional OP270 de Analog Devices mostrado en la Figura 4.3.

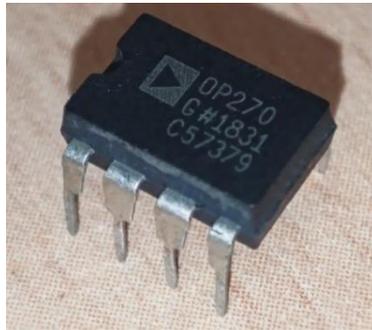


Figura 4.3: Amplificador operacional OP270

Este modelo de amplificador operacional es dual, es decir, el chip consta de dos amplificadores independientes e idénticos; por lo que se podrán tener dos circuitos amplificadores empleando una única fuente de alimentación para ambos. La Figura 4.4 muestra un esquemático del chip con la configuración de los 8 pines [76].

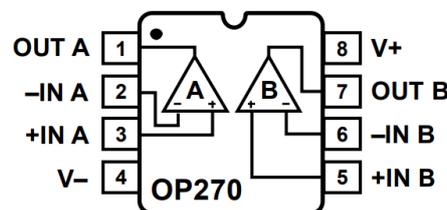


Figura 4.4: Configuración de los pines del amplificador operacional OP270 [76]

La densidad de ruido en este amplificador operacional es muy baja (de  $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  a  $1 \text{ kHz}$ ) y cuenta con un producto ganancia ancho de banda (GBP) de  $5 \text{ MHz}$  y una capacitancia interna de  $3 \text{ pF}$ , cuyos valores se necesitarán a la hora de diseñar el fotorreceptor. Otro parámetro que se debe tener en cuenta en este amplificador es su slew rate (SR), con un valor típico de  $2,4 \text{ V}/\mu\text{s}$ , que define el rango máximo de cambio de tensión.

### 4.2.3 Placa PCB

El fotorreceptor se fabricará soldando los componentes en una placa PCB, realizando las conexiones entre ellos con estaño. Para ello, se ha elegido un kit del fabricante Elegoo (ilustrado en la Figura 4.5) que incluye 32 placas de 5 tamaños diferentes.



Figura 4.5: Kit de placas [77]

Cada una de estas placas tiene un grosor de 1,6 mm y cuentan con huecos de 1 mm de diámetro para realizar las conexiones de los componentes del circuito, con una distancia de 2,54 mm entre cada uno de ellos [77].

#### 4.2.4 Impresora 3D

Para diseñar el encapsulado en el que se colocará la placa PCB con el fotorreceptor soldado se ha utilizado la impresora 3D Anet A8, ilustrada en la Figura 4.6.



Figura 4.6: Impresora 3D Anet A8 [78]

Esta impresora tiene un volumen de impresión de hasta 220 x 220 x 240 mm, con una precisión de  $\pm 0,1$  mm – 0,2 mm [78]. Cuenta con 5 botones de navegación para operar a través de una pantalla, que permite visualizar las opciones y los archivos de impresión, introducidos en la impresora mediante una tarjeta SD.

### 4.3 Diseño y simulación del fotorreceptor

Antes de fabricar el fotorreceptor, se realiza una simulación del circuito en cuestión utilizando el programa LTSpice, con el fin de decidir qué componentes se utilizarán en él

teniendo en cuenta el fotodiodo y el amplificador operacional citados anteriormente. Este fotorreceptor constará de dos etapas: un amplificador de transimpedancia (TIA) que convertirá la corriente generada por el fotodiodo en una tensión proporcional, y una etapa posterior de amplificación de voltaje.

Para simular el modelo OP270 de amplificador operacional, se descarga el modelo SPICE y se abre el fichero descargado en LTSpice para un nuevo elemento a partir del código [76]. La Figura 4.6 y la Figura 4.7 muestran la descarga del fichero y la creación del elemento, respectivamente.

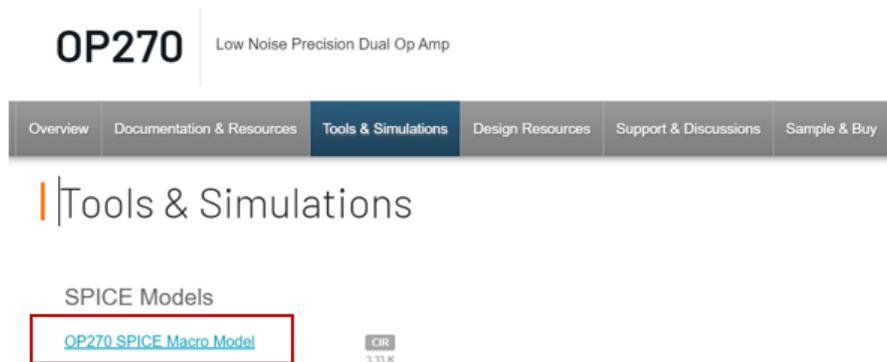


Figura 4.7: Descarga del modelo OP270 [76]

```

* OP270 SPICE Macro-model
* Description: Amplifier
* Generic Desc: 9/30V, BIP, OP, Low Noise, Precision, 2X
* Developed by: HH / ADSJ
* Revision History: 08/10/2012 - Updated to new header style
* 1.0 (01/2010)
* Copyright 2010, 2012 by Analog Devices, Inc.
*
* Refer to http://www.analog.com/Analog_Root/static/techSupport
* indicates your acceptance of the terms and provisions in th
*
* BEGIN Notes:
* Not Modeled:
*
* Parameters modeled include:
* This version of the OP-270 model simulates the typical
* parameters at 25C and +/-15V only.
*
* END Notes
*
* Node assignments
*      non-inverting input
*      | inverting input
*      | | positive supply
*      | | | negative supply
*      | | | | output
*      | | | | |
*
.SUBCKT OP270 1 2 99 50 39
*
* INPUT STAGE
*
R3 5 99 3.050E+04
R4 6 99 3.050E+04
CIN 1 2 3.2E-12
C2 5a 6 2.65E-13
RC2 5 5a 1.0E+03
IOS 1 2 5.0E-9
EOS 9 1 POLY(4) (31 98) (81 98) (83 98) (22 98) 100E-06 1 1 1 1

```

Figura 4.8: Creación del amplificador operacional OP270 en LTSpice

Posteriormente, se renombran los puertos del elemento creado (ilustrado en la Figura 4.8(a)) siguiendo las indicaciones del código que especifican qué puerto se corresponde a cada número (tal y como se ve en la Figura 4.7), obteniendo así el resultado que se muestra en la Figura 4.8(b).

Renombramos los nombres de cada puerto siguiendo las indicaciones del código que especifican qué puerto se corresponde a cada número. El resultado final queda como ilustra la Figura 4.10.



(a) Nombres de los puertos originales (b) Nombres de los puertos cambiados

Figura 4.9: Cambio del nombre de los puertos

### 4.3.1 Diseño del amplificador de transimpedancia

Para el diseño de esta etapa, se deben tener en cuenta el GBP del amplificador operacional y su capacitancia interna, así como la capacitancia del fotodiodo [79, 80]. En primer lugar, se obtiene el valor de la resistencia de realimentación  $R_F$  que relaciona la tensión de salida  $V_{out}$  con la corriente de entrada  $I_{in}$  como

$$R_F = \frac{V_{out}}{I_{in}} \quad (4.1)$$

A partir de este valor y del ancho de banda deseado  $BW$ , se obtiene el valor del condensador de realimentación  $C_F$  que mantiene la estabilidad, cuyo valor cumple

$$C_F \leq \frac{1}{2\pi \cdot R_F \cdot BW} \quad (4.2)$$

Finalmente, el GBP del amplificador operacional también debe garantizar estabilidad, por lo que debe cumplir

$$GBP > \frac{C_i + C_F}{2\pi \cdot R_F \cdot C_F^2} \quad (4.3)$$

donde el valor  $C_i$  es la capacitancia de entrada del amplificador, definida como

$$C_i = C_J + C_{IN} \quad (4.4)$$

Siendo  $C_J$  la capacitancia del fotodiodo (1,5 pF) y  $C_{IN}$  la capacitancia interna del amplificador operacional (3 pF).

Teniendo todo esto en cuenta, se trata de obtener en primer lugar 1 V de pico de salida garantizando 800 kHz de ancho de banda, pero no se cumplen los requisitos necesarios. Por tanto, se prueba a obtener una tensión de salida 100000 veces mayor a la corriente de entrada (es decir, 0,4 V de pico) manteniendo el ancho de banda, cumpliendo esta vez todos los requisitos necesarios para garantizar la estabilidad del amplificador. Los resultados obtenidos en cada prueba quedan recogidos en la Tabla 4.2.

Prueba	Parámetro			
	$V_{out}$	$R_F$	$C_F$	$\frac{C_i + C_F}{2\pi \cdot R_F \cdot C_F^2}$
<b>Prueba 1</b>	1 V	250 k $\Omega$	0,8 pF	5,27 MHz (no es válido)
<b>Prueba 2</b>	0,4 V	100 k $\Omega$	1,99 pF	2,61 MHz

Tabla 4.2: Parámetros de diseño de TIA

Puesto que no existen condensadores comerciales de 1,99 pF, se escoge para el diseño uno de 1,8 pF, siendo éste el valor comercial más cercano que cumple la desigualdad de la Ecuación 4.2.

Con estos valores, se simula en LTSpice un TIA empleando un modelo de fotodiodo formado por un generador de corriente y un condensador, siendo éste la capacitancia del fotodiodo [80]. El generador de corriente generará una corriente sinusoidal de 20 kHz, cuyos valores oscilarán entre los calculados en la sección 4.1 antes de eliminar la componente continua (reflejados en la Tabla 4.1), estableciendo los parámetros reflejados en la Figura 4.9.

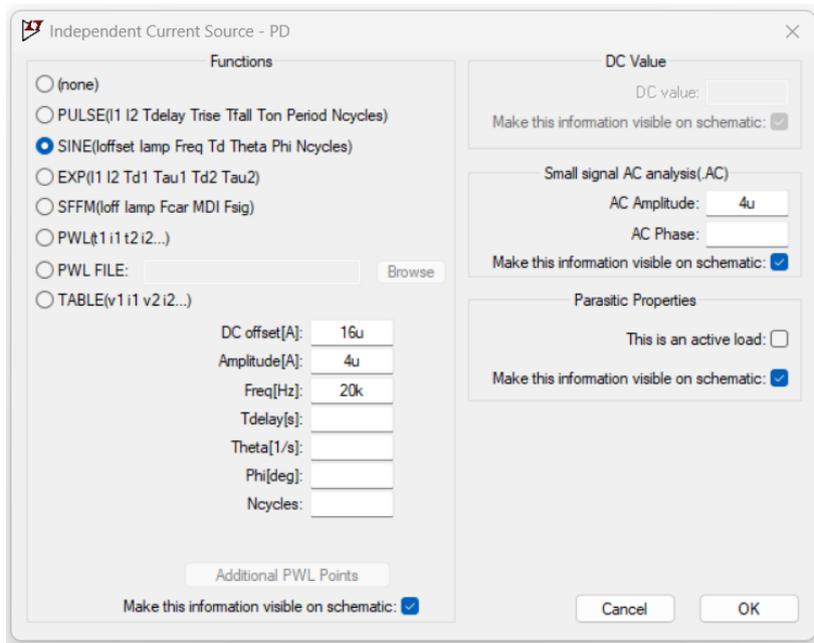


Figura 4.10: Parámetros de la corriente sinusoidal elegida

Para alimentar el amplificador operacional, se emplea una fuente de 10 V y -10 V en las entradas de alimentación positiva y negativa, respectivamente. El diseño del amplificador de transimpedancia se ilustra en la Figura 4.10.

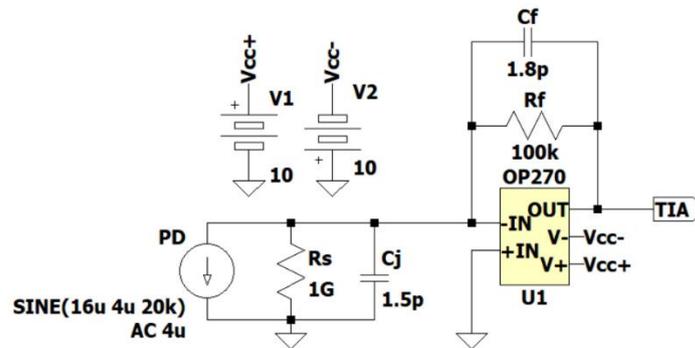


Figura 4.11: Simulación del TIA en LTSpice

Ahora, se realiza un análisis temporal con estos datos para comprobar que la salida obtenida coincide con la deseada tal y como ilustra la Figura 4.11(a), así como un análisis en frecuencia, reflejado en la Figura 4.11(b), para comprobar el ancho de banda del amplificador teniendo en cuenta que la ganancia  $G$  es el valor de la resistencia de realimentación  $R_F$  empleada, y cuyo valor en dB se calcula como

$$G = R_F \xrightarrow{\text{Pasar a dB}} G(dB) = 20 \cdot \log(R_F) \quad (4.5)$$

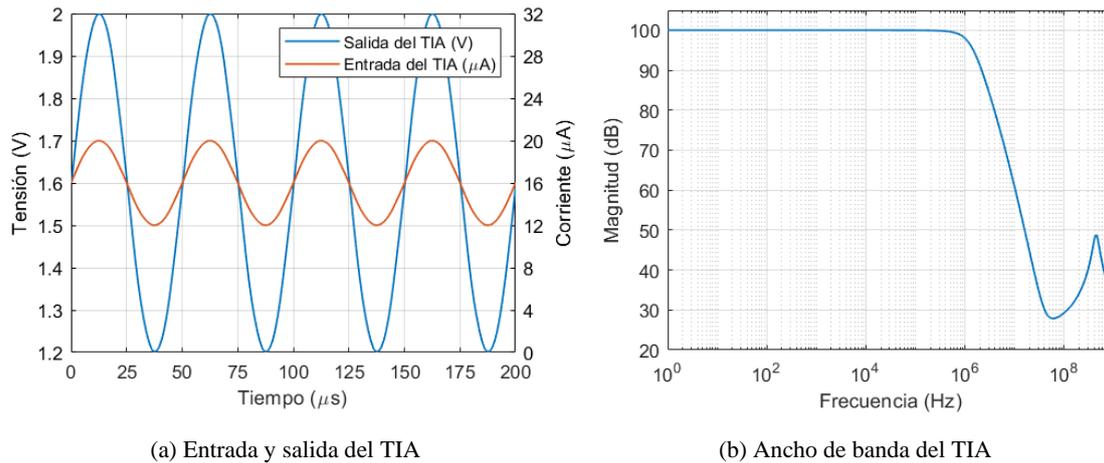


Figura 4.12: Gráficas del TIA sin filtro

Podemos ver que el ancho de banda del amplificador (observando el valor a -3 dB de la ganancia teórica) es aproximadamente de 1 MHz. Por tanto, con este diseño de amplificador se podrá trabajar con señales en un amplio rango de frecuencias.

Sin embargo, se debe tener en cuenta la componente continua de la corriente generada por el fotodiodo debido al efecto del interferómetro. Por lo tanto, se añade un filtro a la entrada del amplificador que elimine dicha componente continua antes de amplificar la señal y cuya frecuencia de corte queda definida por

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.6)$$

donde  $R$  y  $C$  son los valores de la resistencia y del condensador del filtro, respectivamente.

Teniendo en cuenta que la componente continua tendrá una frecuencia prácticamente nula, se busca atenuar solamente las frecuencias más bajas. Tras probar varios valores comerciales de resistencias y condensadores, se escogen una resistencia de 150 kΩ y un condensador de 0,22 μF, obteniendo así una frecuencia de corte de 4,82 Hz.

La Figura 4.12(a) y la Figura 4.12(b) muestran el análisis temporal y el análisis en frecuencia del amplificador tras añadir el filtro, respectivamente. Se observa como el ancho de banda del amplificador varía ligeramente con respecto al obtenido previamente. Por otra parte, la Figura 4.12(c) ilustra el ancho de banda de dicho filtro.

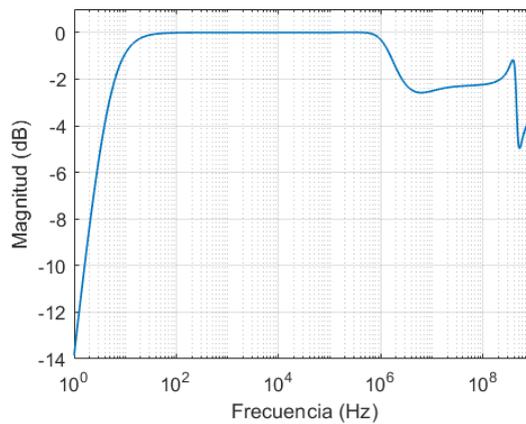
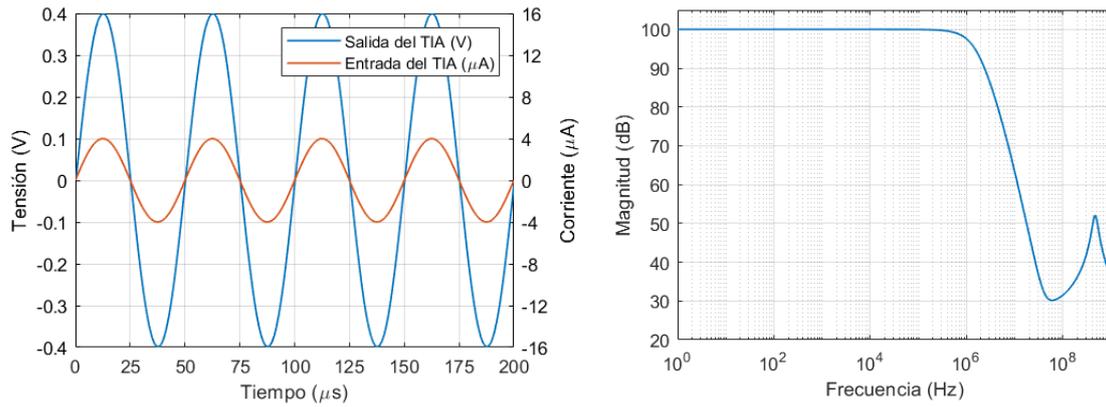


Figura 4.13: Gráficas del TIA con filtro de continua

La Figura 4.13 ilustra el circuito realizado hasta el momento. En esta etapa, se ha conseguido eliminar la componente continua y obtener una salida de 0,4 V de pico; sin embargo, será necesaria una segunda etapa de amplificación para obtener más de 1 V de pico como se pretendía hacer.

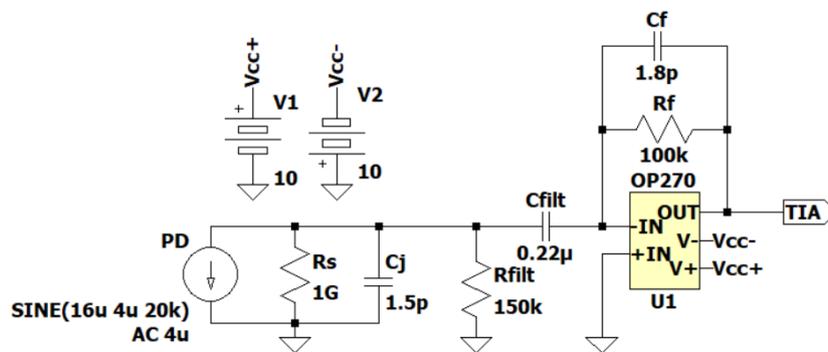


Figura 4.14: Circuito con filtro de continua a la entrada del TIA

### 4.3.2 Diseño de la segunda etapa amplificadora

Para conseguir un voltaje de pico más alto sin reducir el ancho de banda del amplificador de transimpedancia, se introduce una segunda etapa de amplificación a la salida de éste. Teniendo en cuenta el GBP del amplificador operacional (cuyo valor es 5 MHz), debemos buscar una relación entre ganancia y ancho de banda que cumpla dicha constante, estableciendo un ancho de banda de 1 MHz similar al obtenido en la primera etapa. Para ello, la ganancia del amplificador no debe ser superior a 5.

Para esta segunda etapa de amplificación se ha elegido una configuración de amplificador no inversor, ilustrada en la Figura 4.14, con el objetivo de obtener una salida en fase con la entrada.

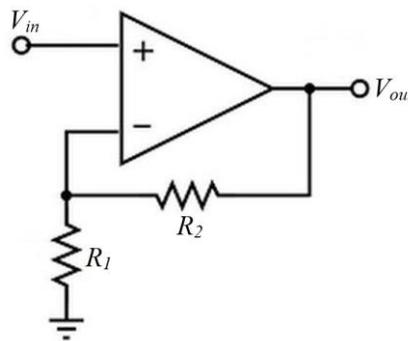


Figura 4.15: Esquema de configuración de un amplificador no inversor [81]

La ganancia  $G$  del amplificador se obtiene como la relación entre la tensión de salida  $V_{out}$  y la tensión de entrada  $V_{in}$ , definida como

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right); \frac{V_{out}}{V_{in}} = G = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4.7)$$

por lo que vemos que su valor queda definido por las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  y que siempre será mayor a 1.

Por lo tanto, se diseña la segunda etapa de amplificación en el simulador como se ve en la Figura 4.15, asignando los valores 1 k $\Omega$  y 4 k $\Omega$  a las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ , respectivamente; con el fin de obtener una ganancia de valor 5.

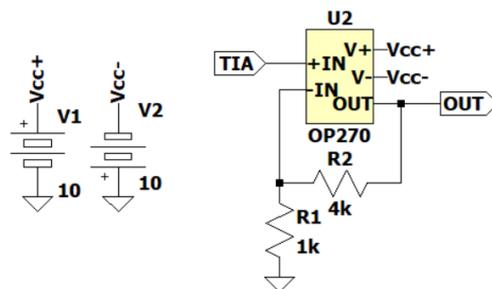
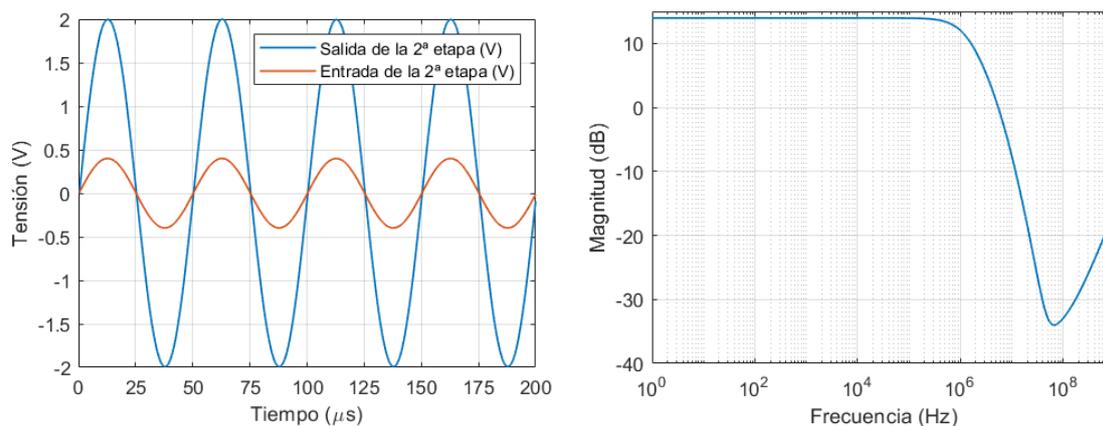


Figura 4.16: Segunda etapa de amplificación

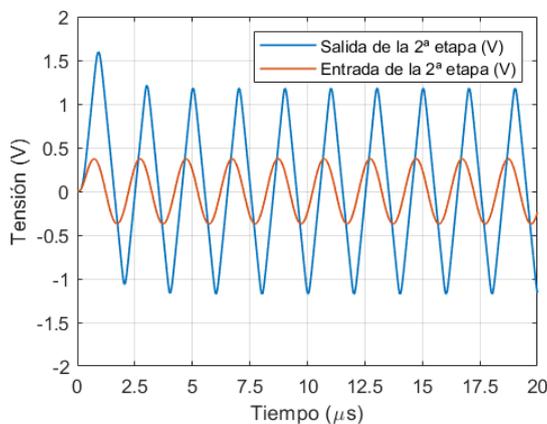
Establecidos dichos valores, se obtiene una salida de 2 V de pico en esta segunda etapa de amplificación, tal y como se ve en la Figura 4.16(a). Además, se realiza un análisis en frecuencia para comprobar que se garantiza 1 MHz de ancho de banda (ilustrado en la Figura 4.16(b)).

Sin embargo, debe tenerse en cuenta el valor del slew rate que se mencionó en la sección 4.2.2. La Figura 4.16(c) muestra la distorsión que se produce en la salida si se aumenta la frecuencia de la corriente de entrada a 500 kHz producida por este parámetro.



(a) Entrada y salida de la 2ª etapa

(b) Ancho de banda de la 2ª etapa



(c) Distorsión de la salida a 500 kHz

Figura 4.17: Gráficas de la 2ª etapa y efecto del slew rate

Este parámetro, medido en  $V/\mu s$ , representa la velocidad máxima a la que el amplificador operacional puede cambiar el voltaje de salida, limitando así la frecuencia máxima a la que se puede trabajar para un nivel de voltaje de salida específico.

El slew rate (SR) se calcula como el valor máximo de la derivada del voltaje de salida  $V_o$  del amplificador respecto al tiempo  $t$ , por lo que, si se trabaja con un seno, su fórmula sería

$$\begin{aligned} SR &= \max\left(\frac{dV_o(t)}{dt}\right) = \max\left(\frac{d(V_p \sin(2\pi f_{max}t))}{dt}\right) \\ &= \max(V_p 2\pi f_{max} \cos(2\pi f_{max}t)) \end{aligned} \quad (4.8)$$

en la que  $V_p$  es el valor del voltaje de pico de salida y  $f_{max}$  la frecuencia máxima de trabajo para dicho voltaje. El valor de la expresión será máximo cuando el coseno sea 1, por tanto

$$SR [V/\mu s] = 2\pi f_{max} [MHz] V_p [V] \quad (4.9)$$

La hoja de especificaciones del amplificador operacional indica que su SR tiene un valor típico de  $2,4 V/\mu s$ , por lo que, si la salida tiene un valor de  $2 V$  de pico, la frecuencia máxima a la que se puede trabajar es de unos  $191 kHz$ . Esto quiere decir que si se desea aumentar la frecuencia de trabajo será preciso disminuir el valor del voltaje de pico a la salida para evitar la distorsión.

Finalmente, la Figura 4.17 muestra el diseño final de nuestro receptor, formado por el fotodiodo FGA015, un filtro para eliminar la componente continua de la corriente, el TIA que convertirá la corriente filtrada en una tensión proporcional, y una segunda etapa de amplificación para obtener un mayor rango de valores de tensión.

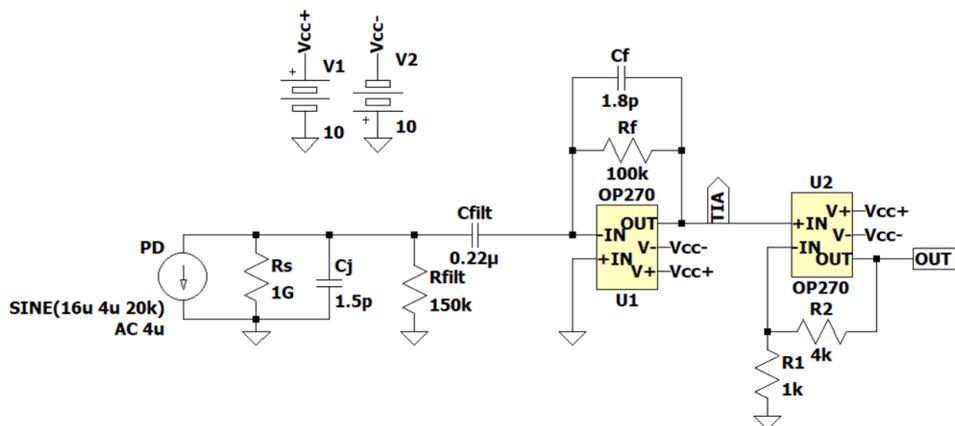


Figura 4.18: Diseño final del fotorreceptor

## 4.4 Integración del fotorreceptor en la placa

Una vez realizado el diseño del fotorreceptor mediante el simulador, procedemos a soldar los componentes especificados en una placa de 4 cm x 6 cm, siendo éste el tamaño más adecuado para ello. El resultado final se muestra en la Figura 4.21.

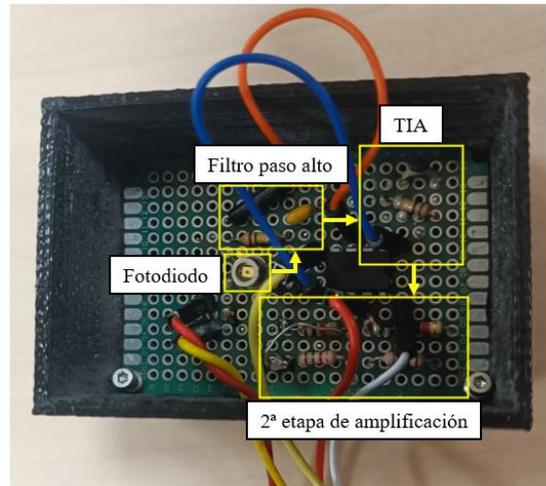


Figura 4.19: Fotorreceptor soldado en la placa

Dado que el chip consta de dos amplificadores operacionales independientes, el TIA y el amplificador no inversor se han colocado a ambos lados del chip, uniendo la salida del primero con la entrada del segundo y situando el fotodiodo en la posición más céntrica posible de la placa.

## 4.5 Diseño del encapsulado del fotorreceptor

La placa montada anteriormente será integrada en un encapsulado, que se fabricará utilizando la impresora 3D Anet A8. Su diseño se realiza empleando el software de modelado 3D Fusion 360, creando un archivo que se exportará posteriormente al programa Ultimaker Cura, donde es posible modificar los ajustes de impresión (como el porcentaje de relleno de la pieza durante su impresión) y seleccionar una impresora determinada para exportar los datos de impresión en un archivo compatible.

Este contenedor constará de dos piezas, ambas ilustradas en la Figura 4.19: una base que contendrá la placa y una tapa que limitará el acceso de la luz ambiente al fotodiodo.

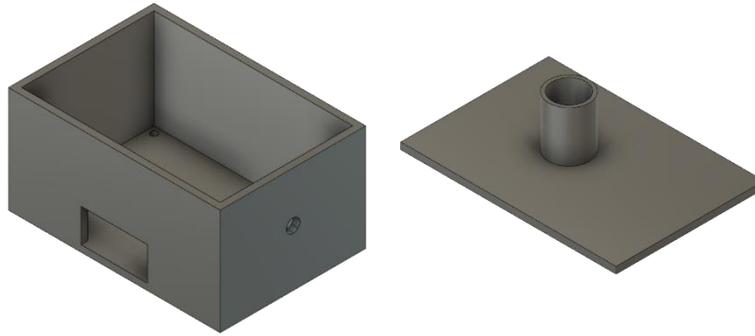


Figura 4.20: Diseño de las piezas del encapsulado del fotorreceptor

La base, con forma de caja, tendrá unas dimensiones internas de 4 cm x 6 cm (al igual que la placa donde se soldó el fotorreceptor), con unas paredes de 3 cm de altura. Consta de 4 agujeros en las esquinas interiores de 2 mm de diámetro, a través de los cuáles la placa quedará fijada. Se añade un agujero circular de 4 mm de diámetro en una de las paredes que servirá para sujetar el encapsulado a un poste, tal y como se hizo con el fotorreceptor comercial; y un agujero rectangular de 2 cm x 1 cm en otra pared para poder realizar las conexiones del fotorreceptor a otros componentes externos.

Por otra parte, la tapa (cuyas medidas coinciden con las de la base) cuenta con un cilindro hueco de 1,5 cm de altura, con 1,2 cm de diámetro externo y 1 cm de radio interno, cuyo centro coincide con la posición aproximada del fotodiodo en la placa con el fin de reducir la filtración de luz ambiente en éste.

## 4.6 Prueba de campo

Una vez integrado el fotorreceptor en la placa e introducida ésta en el encapsulado citado en el punto anterior, se reemplaza el fotorreceptor comercial con el que se realizaron las medidas mostradas en el punto 3.4 tal y como se ve en la Figura 4.20.

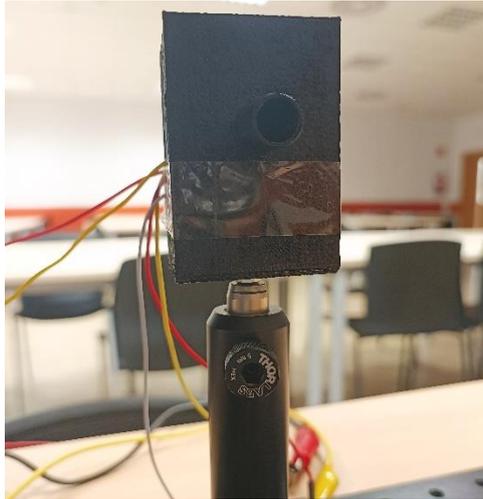


Figura 4.21: Fotorreceptor montado en el interferómetro

Utilizando la ranura en el encapsulado, se sacan los cables necesarios para el funcionamiento del fotorreceptor: los destinados a la alimentación del chip amplificador y el de salida del fotorreceptor, además de las conexiones a tierra pertinentes. La Figura 4.21 muestra como los cables de alimentación (positiva y negativa) se conectan a la fuente de alimentación mientras que el cable de salida es conectado al osciloscopio con el fin de visualizar la señal obtenida por el fotorreceptor.

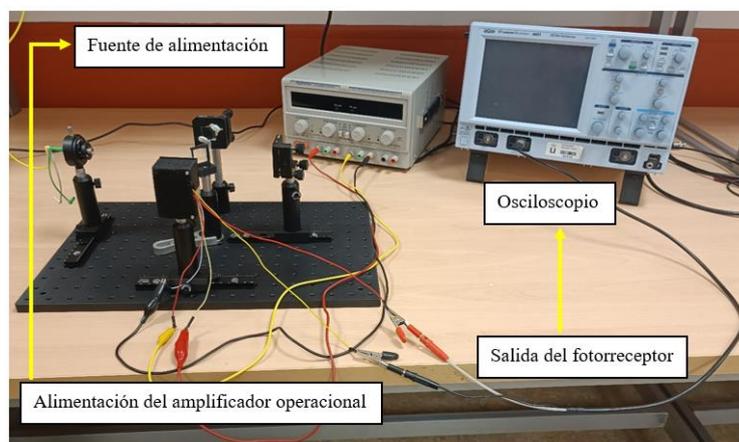


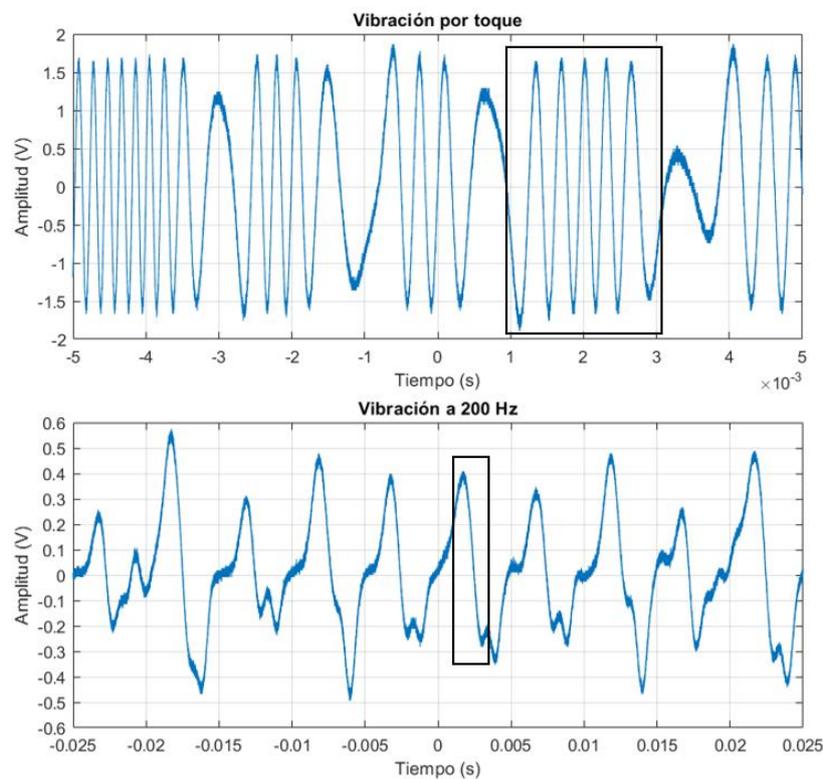
Figura 4.22: Conexiones del fotorreceptor

A partir de los datos de potencia y corriente (almacenados en la Tabla 4.1), y de los resultados obtenidos a partir de la simulación en LTSpice, se recogen todos los valores pertinentes en la Tabla 4.3.

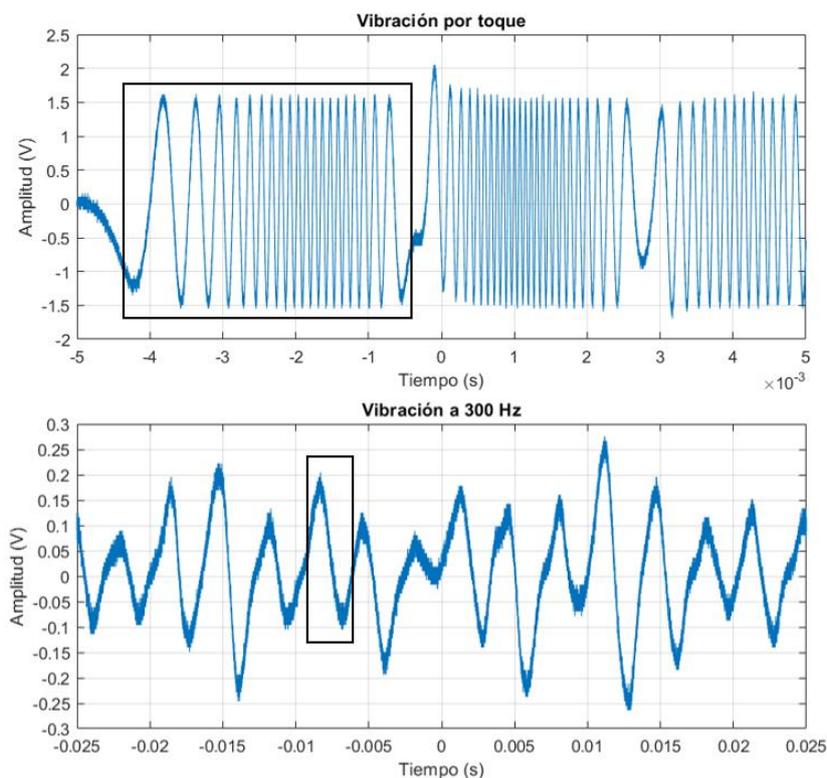
Valor	Parámetro					
	Potencia (mW)		Corriente (mA)		Tensión (V)	
	Incidente	Recibida	Sin filtro	Filtrada	TIA	2ª etapa
<b>Máximo</b>	1,387	0,021	0,02	0,004	0,4	2
<b>Mínimo</b>	0,825	0,013	0,012	-0,004	-0,4	-2

Tabla 4.3: Parámetros del interferómetro con nuestro fotorreceptor

De manera análoga a los cálculos realizados en el punto 3.4, se puede calcular el desplazamiento de uno de los espejos, teniendo en cuenta que el paso de interferencia constructiva a destructiva es de  $\lambda/4$ . Por lo tanto, los desplazamientos superiores a  $\lambda/4$  se calcularán contando puntos máximos y mínimos; mientras que desplazamientos inferiores serán calculados proporcionalmente. Considerando una longitud de onda de 1550 nm, los interferogramas obtenidos se ilustran en la Figura 4.22, tanto los producidos por toques como los ocasionados por sonido (empleando tonos de 200 Hz y 300 Hz); recogiendo sus datos en la Tabla 4.4.



(a) Interferogramas por toque y vibración a 200 Hz



(b) Interferogramas por toque y vibración a 300 Hz

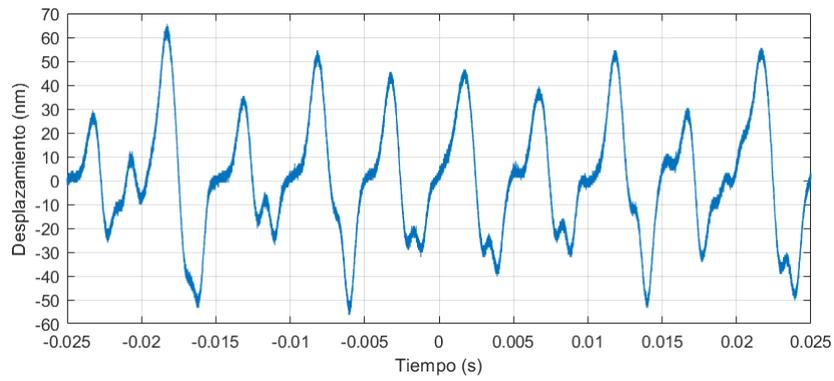
Figura 4.23: Interferogramas por toque y por vibración a diferentes frecuencias

Caso	Vibración	Parámetro		
		Franjas	Margen	Desplazamiento
(a)	Toque	10	3,4 V	3875 nm
	Frecuencia 200 Hz		0,7 V	79,78 nm
(b)	Toque	40	3,1 V	15500 nm
	Frecuencia 300 Hz		0,3 V	37,5 nm

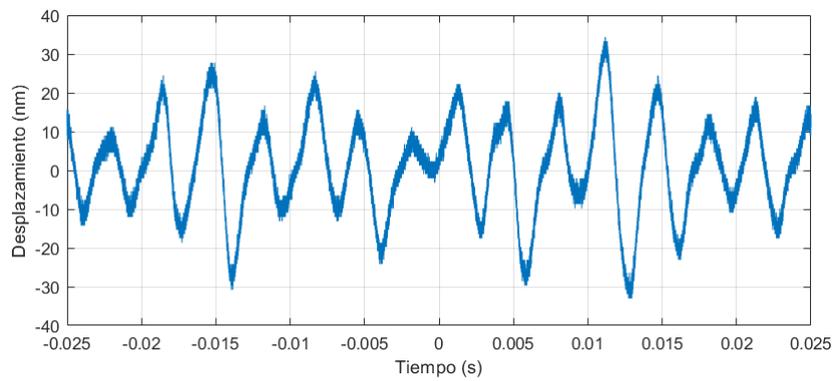
Tabla 4.4: Datos obtenidos de los interferogramas

Al igual que los datos obtenidos con el fotorreceptor comercial, se confirma también que los desplazamientos producidos por toques son mayores que  $\lambda/4$ , mientras que los debidos a vibraciones por sonido son menores. Además, también se observa que el desplazamiento disminuye cuando la frecuencia del tono reproducido aumenta.

Siguiendo el procedimiento realizado en el punto 3.4, se calcula el factor de escala en cada caso para obtener las gráficas desplazamiento reflejadas en la Figura 4.26.



(a) Desplazamiento por vibración de 200 Hz



(b) Desplazamiento por vibración de 300 Hz

Figura 4.24: Desplazamiento del espejo por vibración a diferentes frecuencias

# Capítulo 5

## Conclusiones

Este capítulo final se centra en las conclusiones obtenidas tras la realización de este proyecto, así como las derivadas de los objetivos planteados inicialmente. También se mencionan las bases teóricas aprendidas durante el Grado que han sido de utilidad en el desarrollo y la ejecución del trabajo, incluyendo los conocimientos adquiridos durante el mismo. Finalmente, se plantean algunas mejoras que podrían ser de utilidad en este proyecto para posibles líneas de investigación futuras.

### 5.1 Consecución de objetivos

A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo la fabricación desde cero de un fotorreceptor óptico con componentes de bajo coste para su implementación en un interferómetro, consiguiendo obtener medidas de desplazamiento micrométricas y nanométricas a partir de la interferencia entre haces de luz infrarroja (de 1550 nm de longitud de onda).

Teniendo en cuenta los objetivos propuestos inicialmente y a la vista de los resultados obtenidos, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Calibrando y ajustando correctamente los componentes del interferómetro para conseguir la superposición de ambos haces de luz al incidir sobre el área activa del fotodetector, es posible obtener una representación nítida en el osciloscopio de la interferencia producida.
- Utilizando componentes económicos y soldando las conexiones requeridas con estaño en una placa, es posible fabricar un fotorreceptor capaz de medir pequeños desplazamientos con bastante precisión al utilizarlo en el interferómetro mencionado previamente.

- Para predecir el comportamiento del fotorreceptor óptico y aprovechar las prestaciones de los componentes, ha sido necesario emplear el simulador de circuitos LTSpice con el fin de garantizar el funcionamiento deseado a la hora de su fabricación.
- Con el fin de limitar la cantidad de luz ambiente que incide en el fotodetector empleado, ha sido imprescindible aprender a utilizar una impresora 3D para fabricar un encapsulado que contenga la placa del fotorreceptor, empleando además los programas Fusion 360 y Ultimaker Cura para el modelado 3D y la exportación de los datos y parámetros de impresión, respectivamente.
- Se ha comprobado que las vibraciones ocasionadas por tonos de bajas frecuencias producen mayores desplazamientos que aquellas provocadas por tonos de frecuencias más altas. Además, las vibraciones producidas por el funcionamiento de los diferentes equipos del laboratorio también producen desplazamientos que se captan en el interferómetro debido a la corta longitud de onda de la luz empleada.

## **5.2 Aplicación de lo aprendido en el grado**

Para la realización de este proyecto, han sido de utilidad la asignatura “Sistemas de Telecomunicación”, estudiada durante el primer cuatrimestre del tercer curso, y las asignaturas “Ampliación de Sistemas de Telecomunicación” y “Comunicaciones de Banda Ancha”, impartidas el cuarto curso a lo largo del primer y segundo cuatrimestre, respectivamente. Durante el desarrollo de estas asignaturas se aprendieron las bases teóricas sobre la propagación de la luz, fibra óptica, láseres y fotodetectores; todas de utilidad para la realización del estado del arte del proyecto.

También destacan las asignaturas “Sistemas y Circuitos” y “Electrónica” (impartidas el segundo cuatrimestre del primer año, y el primer cuatrimestre del segundo año, respectivamente), donde se adquirieron los conocimientos sobre filtros y amplificadores que se utilizaron a la hora de realizar el diseño del fotorreceptor.

## **5.3 Lecciones aprendidas en el proyecto**

Durante el desarrollo de este proyecto, se han adquirido los siguientes conocimientos teóricos y prácticos que se citan a continuación:

- Bases teóricas sobre la propagación de la luz (tanto en espacio libre como en fibra óptica) y elementos empleados para guiarla en una dirección determinada.
- Fundamentos sobre materiales semiconductores, así como la teoría básica sobre láseres y fotodetectores fabricados con dichos materiales.
- Funcionamiento de sensores ópticos y diferentes aplicaciones, tanto en fibra óptica como en espacio libre.
- Principios y características sobre interferometría, así como algunas de sus aplicaciones y diferentes tipos de interferómetros.
- Conocimiento sobre la implementación y calibración de un interferómetro de Michelson, y sobre el uso y funcionamiento de los componentes empleados en ello tales como la fuente láser, el fotorreceptor comercial y diferentes elementos optomecánicos.
- Experiencia en el uso y funcionamiento del osciloscopio y de la fuente óptica láser, ambos empleados en el interferómetro para la obtención de resultados.
- Aprendizaje del software LTSpice para el diseño y simulación del fotorreceptor, así como su posterior fabricación soldando los componentes en una placa PCB para su incorporación en el interferómetro.
- Adquisición de habilidades con los programas Fusion 360 y Ultimaker Cura para realizar el modelado 3D del encapsulado del fotorreceptor y la exportación de los datos para su impresión, incluyendo la familiarización en el uso de la impresora 3D al imprimir el encapsulado mencionado previamente.
- Extracción de medidas de desplazamiento de uno de los espejos del interferómetro por toques y vibraciones provocadas por sonido, interpretando las señales de interferencia captadas por el osciloscopio.

## 5.4 Trabajo futuro

A partir del trabajo realizado en este proyecto, es posible continuar con futuras líneas de investigación con el fin de mejorar y optimizar los resultados, así como su uso para diferentes aplicaciones.

Una forma de obtener mejores resultados sería optimizar la selección de componentes para el fotorreceptor óptico, con el propósito de maximizar la calidad de la salida generada. Una opción sería seleccionar un fotodiodo con mayor responsividad para generar una mayor corriente a partir de la potencia óptica, incrementando así su eficiencia.

Además, teniendo en cuenta el diámetro del haz láser utilizado en el proyecto, también sería de utilidad emplear un fotodetector con una mayor área de región activa con el fin de aprovechar al máximo la potencia incidente y así obtener un mayor rango de valores de voltaje a la salida del TIA. Con el fin de aumentar el ancho de banda del amplificador para utilizar el fotorreceptor en un mayor rango de frecuencias, también sería posible escoger un amplificador operacional con un mayor GBP (teniendo en cuenta el compromiso existente entre el ancho de banda y la ganancia), así como un mayor slew rate que permita una mayor frecuencia máxima de trabajo para un voltaje específico sin sufrir distorsión en la salida. También se podrían añadir filtros o aislar al interferómetro para mitigar el efecto de vibraciones externas (como las producidas por los equipos de laboratorio), mejorando así la relación señal a ruido de la interferencia obtenida y obteniendo resultados más precisos.

Teniendo en cuenta estas mejoras, una posible aplicación futura de este Trabajo de Fin de Grado sería realizar un micrófono interferométrico. Para ello, el espejo utilizado para medir los desplazamientos sería reemplazado por una membrana o diafragma acústico que vibrara con las ondas sonoras de la voz y que reflejara gran parte de la luz incidente en él, produciendo así diferencias de camino óptico con respecto a la trayectoria recorrida por el otro haz (actuando como referencia). Las interferencias producidas por estas diferencias de camino formarían una señal tras su paso por el fotorreceptor que, tras ser amplificada y filtrada, podrá ser analizada y procesada a través de algún software de procesamiento de señales para extraer la onda de sonido como una señal eléctrica.

# Bibliografía

- [1] «SPIE,» [En línea]. Available: <https://spie.org/industry-resources/information/industry-report?SSO=1>. [Último acceso: 14 Octubre 2023].
- [2] P. Hariharan, Basics of Interferometry, Elsevier, 2007.
- [3] «Scholarly Community Encyclopedia,» [En línea]. Available: <https://encyclopedia.pub/entry/35042>. [Último acceso: 15 Octubre 2023].
- [4] M. Bhowmick, «IntechOpen,» [En línea]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/84670>. [Último acceso: 15 Octubre 2023].
- [5] J. Hecht, Understanding Lasers: An Entry-Level Guide, Wiley, 2018.
- [6] «FisicaLab,» [En línea]. Available: <https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-luz>. [Último acceso: 16 Septiembre 2023].
- [7] J. Haus, Optical Sensors: Basics and Applications, Wiley-VCH, 2010.
- [8] «Britannica,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/lens-optics>. [Último acceso: 17 Septiembre 2023].
- [9] «MeetOptics,» [En línea]. Available: <https://www.meetoptics.com/academy/focal-length#what-is-the-focal-length-of-a-mirror>. [Último acceso: 17 Septiembre 2023].
- [10] J. M. Senior, Optical Fiber Communications: Principles and Practice, Pearson-Prentice Hall, 2009.
- [11] «Dgtl Infra,» [En línea]. Available: <https://dgtlinfra.com/fiber-optics/>. [Último acceso: 17 Septiembre 2023].

- [12] D. Krohn, T. MacDougall y A. Mendez, *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*, SPIE, 2014.
- [13] «Thorlabs,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=14202](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14202). [Último acceso: 18 Septiembre 2023].
- [14] G. P. Agrawal, *Fiber-optic Communications Systems*, Wiley, 2010.
- [15] «HyperPhysics,» [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/dope.html>. [Último acceso: 31 Enero 2023].
- [16] «All About Circuits,» [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-2/the-p-n-junction/>. [Último acceso: 31 Enero 2023].
- [17] «Newport,» [En línea]. Available: <https://www.newport.com/n/semiconductor-optical-emission>. [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [18] «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-the-gain-curve-and-longitudinal-modes-of-a-semiconductor\\_fig2\\_322747165](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-the-gain-curve-and-longitudinal-modes-of-a-semiconductor_fig2_322747165). [Último acceso: 25 Enero 2023].
- [19] R. Arieli. [En línea]. Available: <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-6/F6s3p21.htm>. [Último acceso: 1 Febrero 2023].
- [20] «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-a-edge-emitting-laser-and-b-vertical-cavity-surface-emitting-laser\\_fig2\\_224597337](https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-a-edge-emitting-laser-and-b-vertical-cavity-surface-emitting-laser_fig2_224597337). [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [21] «Physics and Radio Electronics,» [En línea]. Available: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/photodiodesymboltypes.html>. [Último acceso: 5 Febrero 2023].

- [22] «SpringerOpen,» [En línea]. Available: <https://photonix.springeropen.com/articles/10.1186/s43074-022-00052-6>. [Último acceso: 5 Febrero 2023].
- [23] G. Rajan, *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*, CRC Press, 2015.
- [24] «MDPI,» [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/1898>. [Último acceso: 21 Febrero 2023].
- [25] Z. Fang, K. K. Chin, R. Qu y H. Cai, *Fundamentals of optical fiber sensors*, Wiley, 2012.
- [26] «FS community,» [En línea]. Available: <https://community.fs.com/blog/understanding-otdr-dead-zone-specifications.html>. [Último acceso: 22 Febrero 2023].
- [27] «Lodz University of Technology: Institute of Electronics,» [En línea]. Available: <http://www.eletel.p.lodz.pl/eng/index.php/nir-raman-scattering-system-for-distributed-temperature-sensing-with-low-power-long-distance-laser-excitations>. [Último acceso: 21 Febrero 2023].
- [28] C. Galíndez y J. López-Higuera, «Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications,» *Journal of Sensors*, vol. 2012, n° 204121, 2012.
- [29] «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/The-principle-of-operation-of-a-Raman-distributed-temperature-sensor-DTS-exploiting\\_fig5\\_319423622](https://www.researchgate.net/figure/The-principle-of-operation-of-a-Raman-distributed-temperature-sensor-DTS-exploiting_fig5_319423622). [Último acceso: 26 Septiembre 2023].
- [30] «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/A-typical-configuration-for-a-Brillouin-optical-time-domain-reflectometer-BOTDR\\_fig3\\_319423622](https://www.researchgate.net/figure/A-typical-configuration-for-a-Brillouin-optical-time-domain-reflectometer-BOTDR_fig3_319423622). [Último acceso: 26 Septiembre 2023].
- [31] «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/A-typical-configuration-for-a-Brillouin-optical-time-domain-analysis-BOTDA\\_fig2\\_319423622](https://www.researchgate.net/figure/A-typical-configuration-for-a-Brillouin-optical-time-domain-analysis-BOTDA_fig2_319423622). [Último acceso: 26 Septiembre 2023].

- [32] «ResearchGate,» [En línea]. Available: <https://www.keyence.com/ss/products/sensor/sensorbasics/photoelectric/info/>. [Último acceso: 28 Septiembre 2023].
- [33] «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Optical-rain-sensor-principle-4\\_fig2\\_330414562](https://www.researchgate.net/figure/Optical-rain-sensor-principle-4_fig2_330414562). [Último acceso: 28 Septiembre 2023].
- [34] Geospatial World, [En línea]. Available: <https://www.geospatialworld.net/prime/technology-and-innovation/what-is-lidar-technology-and-how-does-it-work/#:~:text=Airborne%20LiDAR%20is%20installed%20on,exact%20measurement%20of%20its%20distance..> [Último acceso: 4 Febrero 2023].
- [35] M. Müller, «Blickfeld Blog,» [En línea]. Available: <https://www.blickfeld.com/blog/time-of-flight-vs-fmcw/>. [Último acceso: 4 Febrero 2023].
- [36] «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-some-3D-ranging-techniques-a-stereo-vision-b-projection\\_fig1\\_352060245](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-some-3D-ranging-techniques-a-stereo-vision-b-projection_fig1_352060245). [Último acceso: 24 Septiembre 2023].
- [37] «Howthingswork.org,» [En línea]. Available: <https://howthingswork.org/electronics-how-an-optical-mouse-works/>. [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [38] «hp,» [En línea]. Available: <https://www.hp.com/us-en/shop/tech-takes/optical-vs-laser-mouse-for-gaming#:~:text=A%20laser%20is%20much%20more,bright%20for%20the%20CMOS%20sensor..> [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [39] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro\\_de\\_Rayleigh](https://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro_de_Rayleigh). [Último acceso: 30 Enero 2023].

- [40] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Michelson\\_Interferometer\\_scheme.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Michelson_Interferometer_scheme.png). [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [41] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sagnac\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Sagnac_effect). [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [42] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro\\_de\\_Mach-Zehnder](https://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro_de_Mach-Zehnder). [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [43] «Doing physics with Matlab,» [En línea]. Available: <https://d-arora.github.io/Doing-Physics-With-Matlab/mpDocs/op1010B.htm>. [Último acceso: 3 Marzo 2023].
- [44] L. Caltech. [En línea]. Available: <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligos-ifo>. [Último acceso: 24 Enero 2023].
- [45] L. Caltech. [En línea]. Available: <https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer>. [Último acceso: 24 Enero 2023].
- [46] «GeekWire,» [En línea]. Available: <https://www.geekwire.com/2016/hanford-ligo-scientists-spill-gravitational-wave-secrets/>. [Último acceso: 18 Febrero 2023].
- [47] «Physics Today,» [En línea]. Available: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.3.3123>. [Último acceso: 18 Febrero 2023].
- [48] A. G. Podoleanu, «Optical coherence tomography,» *Journal of microscopy*, vol. 247, n° 3, pp. 209-219, 2012.
- [49] D. P. Popescu, L.-P. Choo-Smith, C. Flueraru, Y. Mao, S. Chang, J. Disano, S. Sherif y M. G. Sowa, «Optical coherence tomography: fundamental principles, instrumental designs and biomedical applications,» *Biophysical reviews*, vol. 3, n° 3, p. 155, 2011.
- [50] «ResearchGate,» [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-time-domain-Stratus-R-OCT->

top-frame-with-spectral-domain-Cirrus-R\_fig22\_278704633. [Último acceso: 3 Marzo 2023].

- [51] J. F. de Boer, R. Leitgeb y M. Wojtkowski, «Twenty-five years of optical coherence tomography: the paradigm shift in sensitivity and speed provided by Fourier domain OCT,» *Biomedical optics express*, vol. 8, nº 7, pp. 3248-3280, 2017.
- [52] «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-different-OCT-modalities-OCT-systems-can-be-classified-into-time-domain\\_fig14\\_264389604](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-different-OCT-modalities-OCT-systems-can-be-classified-into-time-domain_fig14_264389604). [Último acceso: 18 Febrero 2023].
- [53] «TRE ALTAMIRA,» [En línea]. Available: <https://site.tre-altamira.com/insar/>. [Último acceso: 4 Marzo 2023].
- [54] X. Zhou, N.-B. Chang y S. Li, «Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research,» *Sensors (Basel)*, vol. 9, nº 3, pp. 1876-1912, 2009.
- [55] «COMET,» [En línea]. Available: <https://comet.nerc.ac.uk/earth-observation/insar/how-insar-works/>. [Último acceso: 5 Marzo 2023].
- [56] A. K. Maini, *Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications*, Wiley, 2013.
- [57] «Thorlabs,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4052](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4052). [Último acceso: 18 Marzo 2023].
- [58] «Laser Diode Control,» [En línea]. Available: <https://www.laserdiodecontrol.com/laser-diode-driver-basics-and-fundamentals>. [Último acceso: 18 Marzo 2023].
- [59] «Thorlabs,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=6686](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6686). [Último acceso: 18 Marzo 2023].

- [60] «ScienceDirect,» [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/optical-receiver>. [Último acceso: 16 Marzo 2023].
- [61] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Coherence\\_length](https://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_length). [Último acceso: 2 Junio 2023].
- [62] «RP Photonics,» [En línea]. Available: <https://www.rp-photonics.com/bandwidth.html>. [Último acceso: 2 Junio 2023].
- [63] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=TLX1>. [Último acceso: 23 Mayo 2023].
- [64] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PM122D>. [Último acceso: 30 Mayo 2023].
- [65] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA10CS2>. [Último acceso: 31 Mayo 2023].
- [66] «ValueTronics,» [En línea]. Available: <https://www.valuetronics.com/product/waverunner-6051a-lecroy-digital-oscilloscope-used>. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].
- [67] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=VRC2>. [Último acceso: 6 Junio 2023].
- [68] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MB3045/M>. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].
- [69] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=RLA150/M>. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].

- [70] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KS1T#ad-image-0>. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].
- [71] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=F110APC-1550>. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].
- [72] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KAD11F>. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].
- [73] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LM1XY>. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].
- [74] «Thorlabs,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1696](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1696). [Último acceso: 15 Julio 2023].
- [75] «Thorlabs,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FGA015>. [Último acceso: 17 Mayo 2023].
- [76] «Analog Devices,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/en/products/op270.html#product-overview>. [Último acceso: 18 Mayo 2023].
- [77] «Elegoo,» [En línea]. Available: <https://www.elegoo.com/en-es/products/elegoo-double-sided-pcb-board-kit>. [Último acceso: 30 Junio 2023].
- [78] «Anet,» [En línea]. Available: <https://shop.anet3d.com/products/official-anet-a8-3d-printer>. [Último acceso: 11 Octubre 2023].
- [79] «Texas Instruments,» [En línea]. Available: <https://www.ti.com/video/5751314142001>. [Último acceso: 3 Mayo 2023].

- [80] «Texas Instruments,» [En línea]. Available: <https://www.ti.com/video/6289331603001>. [Último acceso: 3 Mayo 2023].
- [81] «ViaSatelital,» [En línea]. Available: [https://viasatelital.com/proyectos\\_electronicos/amplificador\\_operacional.php](https://viasatelital.com/proyectos_electronicos/amplificador_operacional.php). [Último acceso: 16 Abril 2023].
- [82] «RP Photonics,» [En línea]. Available: <https://www.rp-photonics.com/photonics.html>. [Último acceso: 13 Octubre 2023].