



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**Facultad de Estudios Superiores Aragón**

**Implementación de un dispositivo-sensor  
basado en el interferómetro de Michelson  
en espacio abierto para detectar  
imperfecciones en superficies planas  
reflejantes**

**TESIS**

Para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico - Electrónico**

**P R E S E N T A**

Esteban Eduardo Morales Rojas

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero



**Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **Agradecimientos**

A mi director de tesis, Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero, quiero expresar mi profundo agradecimiento por brindarme la oportunidad de formar parte del grupo de Sensores en Fibra Óptica del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM. Su orientación y liderazgo han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

Al Dr. Abraham Pérez Alonzo, agradezco sinceramente su apoyo y guía, además de impartirme conocimientos fundamentales que han contribuido significativamente a la realización de esta tesis.

Al Mtro. Fernando Velázquez Carreón, quiero expresar mi reconocimiento por su paciencia, guía y apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y disposición para compartir conocimientos han sido de gran importancia en este proceso.

A la DGAPA-UNAM, por el apoyo brindado a través del financiamiento del proyecto PAPIIT IT104123.

A mi madre Noemi Rojas, por apoyarme en diversos aspectos de la vida; económico, moral y sobre todo por estar conmigo en todo momento a pesar de las dificultades de la vida.

## Objetivo

El objetivo fundamental de esta tesis consiste en diseñar e implementar un dispositivo-sensor óptico en espacio libre, conformado por un sistema de medición altamente sensible basado en el interferómetro de Michelson. Este dispositivo integrará un circuito para acoplar la señal y visualizar las franjas de interferencia generadas, un programa para contar y detectar estas franjas, una avanzada platina motorizada de seis ejes (New Focus 8095M), y un programa desarrollado en el lenguaje de programación Python para la visualización y almacenamiento de los datos obtenidos.

El propósito principal de este dispositivo-sensor es observar las imperfecciones depositadas al estilo de la rejilla Ronchi en un portaobjetos de vidrio tipo soda lime, que a su vez estará unido a la superficie plana reflejante siendo parte de éste, se espera que sea capaz de detectar aquellas imperfecciones que escapan a la capacidad perceptiva del ojo humano. Se plantea llevar a cabo diversos barridos en un área predeterminada con el fin de observar las imperfecciones proporcionadas por el dispositivo-sensor. Se contempla la ejecución de dos tipos de barridos sobre la superficie plana reflejante: uno en sentido horizontal y otro en sentido vertical sobre la misma área. Se espera lograr una clara distinción entre las superficies con imperfecciones y aquellas sin ellas. Se llevará a cabo una evaluación de la resolución del dispositivo, con la expectativa de obtener un sistema capaz de identificar imperfecciones en superficies planas reflejantes de manera confiable a escalas comparables con imperfecciones micrométricas.

## Resumen

En el presente trabajo, se detalla el desarrollo de un dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson en el laboratorio de sensores de fibra óptica en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM, diseñado para analizar superficies planas reflejantes con imperfecciones, tanto visibles como no visibles. El interferómetro de Michelson demuestra su capacidad para detectar pequeñas variaciones en la diferencia de camino óptico mediante el fenómeno de interferencia, que se manifiesta en dos formas: interferencia constructiva y destructiva. Estas manifestaciones generan franjas de interferencia cada vez que el camino óptico se ve alterado, facilitando así la detección de imperfecciones, incluso aquellas controladas como es el caso de este trabajo, en donde se depositó material de tinta seca (conocido como tóner) en un portaobjetos de vidrio soda lime, este material fue depositado para fabricar una rejilla Ronchi, la cual consiste en una serie de líneas claras que significan ausencia de material y oscuras con material depositado (tóner) que se alternan durante toda el área del portaobjetos y esta rejilla está colocada sobre una superficie reflejante que conforma el espejo de uno de los brazos del interferómetro de Michelson.

Como parte del desarrollo de este dispositivo-sensor se usó un fotodetector de silicio el cual desempeña un papel importante, al convertir la cantidad de luz en un nivel de corriente, que varía según diversos factores, como la intensidad luminosa percibida, el área de detección del fotodetector y el ruido ambiental. Para analizar la señal obtenida por el fotodetector, se diseñó un circuito con varios filtros. Además, se desarrolló un programa en Python para llevar a cabo el análisis en tiempo real de los datos y almacenarlos en un archivo en formato CSV.

Se llevaron a cabo diversos experimentos, y en uno de los espejos del interferómetro se colocó la muestra con imperfecciones, es decir el vidrio que contiene el material depositado implementando una rejilla Ronchi, se realizaron diversos experimentos y se tomaron los datos de éstos. Inicialmente, estas imperfecciones se dispusieron de manera vertical, y posteriormente, la muestra se giró noventa grados, colocando las imperfecciones en posición horizontal. En cada posición, se aplicó un desplazamiento de ida y regreso, utilizando una platina micrométrica motorizada (Newport 8095M), en algunos experimentos se añadió un lente convergente para reducir el diámetro del ancho de cintura del haz láser, y se analizaron los resultados obtenidos. Con los resultados obtenidos se analizó con precisión la resolución del dispositivo, se identificó la diferencia al reducir el diámetro del haz láser y al no hacerlo, además se identificaron posibles mejoras para futuras implementaciones de este proyecto.

La tesis se estructura en cuatro capítulos. El primero aborda los fundamentos de óptica implementados en este trabajo, el segundo se centra en la parte electrónica implementada para el desarrollo del dispositivo-sensor, el tercero expone detalladamente la metodología utilizada para la experimentación, y el cuarto capítulo analiza los resultados obtenidos y presenta las conclusiones derivadas de la investigación.

# Índice

Agradecimientos.....	1
Objetivo .....	2
Resumen.....	3
Índice.....	5
Índice de Figuras.....	7
Introducción .....	10
I. FUNDAMENTOS DE ÓPTICA.....	11
1.1 Definición de la luz .....	12
1.2. Representación matemática de una onda luminosa.....	12
1.3 Coherencia de un haz luminoso .....	16
1.4 Ley de Snell.....	17
1.5 Láser .....	19
1.5.1 Tipos de láser, de gas, sólidos y líquidos.....	20
1.6. Interferencia de la luz.....	21
1.7. Tipos de Interferómetros .....	23
1.7.1 Interferómetro de Fabry-Perot .....	24
1.7.2 Interferómetro de Sagnac .....	25
1.7.3 Interferómetro de Mach-Zehnder.....	27
1.7.4 Interferómetro de Michelson.....	28
1.7.5. Requisitos de coherencia .....	31
1.7.6 Patrón de interferencia .....	32
II. FUNDAMENTOS DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.....	34
2.1. Filtros electrónicos .....	35
2.1.1. Filtro pasa bajas.....	36
2.1.2. Filtro pasa altas.....	38
2.1.3. Filtro pasa bandas.....	39
2.5. Propiedades del ruido .....	41
2.6. Valor RMS .....	42

2.7 El amplificador operacional.....	44
2.8. Ruido en amplificadores operacionales .....	45
2.9 Amplificador de instrumentación.....	46
2.9.1 Circuito amplificador de transimpedancia .....	47
2.9.2 Preamplificador de bajo ruido SR560.....	48
2.9.3 Calculo de la incertidumbre de medida .....	49
2.9.4 Fotodetector de silicio (dispositivos receptores) .....	50
III. DESARROLLO .....	51
3.1. Potencia óptica de reflexión y transmisión. ....	73
IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	78
Conclusiones.....	97
Referencias .....	100
Anexo.....	102

## Índice de Figuras

Figura 1. Perfil de una función armónica. Es como perfil de una onda armónica. Una longitud de onda corresponde a un cambio de fase $\Psi$ de $2\pi$ radianes [3].	14
Figura 1.1. Onda armónica a través del tiempo [3].	15
Figura 1.2. Diagrama. Ilustra ondas coherentes planas, monocromáticas y polarizadas que emergen de una fuente de luz láser [4].	16
Figura 1.3. Línea espectral. Comparación de la anchura natural de una línea espectral con su anchura Doppler (variación de la frecuencia) [4].	16
Figura 1.4. Representación gráfica de la ley de Snell [5].	18
Figura 1.5. Proceso de emisión estimulada [6].	19
Figura 1.6. Representación del espectro electromagnético [2].	20
Figura 1.7. Fenómeno de interferencia de dos fuentes de luz [8].	23
Figura 1.8. a) Interferómetro de Fabry-Perot; b) etalón de Fabry-Perot [2].	24
Figura 1.9. Patrón de interferencia del interferómetro de Fabry-Perot [2].	25
Figura 1.10. Interferómetro de Sagnac de forma cuadrada [2].	26
Figura 1.11. Interferómetro de Mach-Zehnder [2].	28
Figura 1.12. Interferómetro de Michelson compensado [2].	29
Figura 1.13. Franjas circulares del interferómetro de Michelson utilizando una fuente de luz láser [3].	29
Figura 1.14. Vista superior del interferómetro de Michelson compensado en donde se aprecia el camino que recorre el haz de luz [3].	30
Figura 1.15. Dos patrones de interferencia complementarios en el interferómetro de Michelson [2].	33
Figura 2. Circuito RC [10].	36
Figura 2.1. Diagrama de Bode del circuito RC [10].	37
Figura 2.2. Circuito RC [10].	38
Figura 2.3. Diagrama de Bode del circuito RC [10].	39
Figura 2.4. Esquema básico de un filtro pasa banda pasivo [10].	40
Figura 2.5. Valor RMS, Valor medio y Valor pico pico [11].	43
Figura 2.6. Símbolo de un amplificador operacional [10].	44
Figura 2.7. Amplificador operacional con una tensión de DC [10].	45
Figura 2.8. Amplificador de instrumentación [10].	46
Figura 2.9. Amplificador de transimpedancia [10].	48
Figura 2.10. Preamplificador de bajo ruido SR560 en el laboratorio de sensores en fibra óptica del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología UNAM.	49
Figura 3. Esquema simple de la configuración desarrollada del interferómetro de Michelson.	52
Figura 3.1. Simulación del número de franjas transcurridas en un micrómetro.	54
Figura 3.2. Simulación del número de franjas transcurridas en dos micrómetros.	55
Figura 3.3. Simulación del número de franjas transcurridas en tres micrómetros.	56
Figura 3.4. Circuito diseñado para acoplar y analizar la señal obtenida del fotodetector.	57

Figura 3.5. Modelo 3D del circuito diseñado. ....	61
Figura 3.6. Señal mostrada en el osciloscopio obtenida a través del circuito diseñado, con bajo ruido.....	62
Figura 3.7. Diagrama de flujo programa de adquisición de datos y graficar en tiempo real. ....	64
Figura 3.8. Diagrama de flujo programa de lectura de archivos CSV. ....	65
Figura 3.9. Modelo 3D proporcionado por Newport de la platina motorizada de seis ejes, señalando el movimiento angular de tres ejes.....	66
Figura 3.10. Modelo 3D proporcionado por Newport de la platina motorizada de seis ejes, señalando el movimiento lineal de los tres ejes.....	66
Figura 3.11. Portaobjetos de vidrio con material depositado (tónér). ....	67
Figura 3.12. Medidas reales del portaobjetos de vidrio con material depositado usando el software IC Measure.....	68
Figura 3.13. Diversas distancias entre cada barra de material depositado y la ausencia de este. ....	69
Figura 3.14. Esquema del dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson. ....	70
Figura 3.15. Dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson (las líneas rojas representan la trayectoria del haz láser). ....	70
Figura 3.16. Fotografía del procedimiento utilizado para medir la potencia óptica mientras se va descubriendo el área sensitiva del fotodetector utilizando la navaja. ....	71
Figura 3.17. Grafica del aumento de la potencia óptica conforme se va descubriendo con la navaja la parte sensitiva del fotodetector del multímetro óptico. ....	72
Figura 3.18. Cuatro promedios de las distintas distancias del tamaño del haz láser con la técnica de la navaja y la regresión lineal. ....	73
Figura 3.19. Potencia óptica de la transmisión y reflexión del divisor de haz. ....	74
Figura 3.20. Software New Focus PicoMotor en donde se puede aplicar la configuración más apropiada a la platina motorizada.....	75
Figura 4. Representación de la metodología del barrido, y del cambio de posición de las franjas de material depositado.....	78
Figura 4.1. Esquema del dispositivo-Sensor basado en el interferómetro de Michelson para medir imperfecciones en superficies planas reflejantes. ....	79
Figura 4.2. Dispositivo-Sensor basado en el interferómetro de Michelson para medir imperfecciones en superficies planas reflejantes. ....	79
Figura 4.3. Desplazamiento de 2 milímetros en X con el lente convexo insertado mientras el material depositado está en disposición vertical. ....	81
Figura 4.4. Desplazamiento de 2 milímetros en $-X$ con el lente convexo insertado mientras el material depositado está en disposición vertical. ....	82
Figura 4.5. Desplazamiento de dos milímetros en X mientras el material depositado está en disposición vertical. ....	84
Figura 4.6. Desplazamiento de dos milímetros en $-X$ mientras el material depositado está en disposición vertical. ....	86
Figura 4.7. Franjas de interferencia después de aplicar un acercamiento en la zona señalada. ....	87

Figura 4.8. Desplazamiento de dos milímetros en X mientras el material depositado está en disposición horizontal. .... 88

Figura 4.9. Desplazamiento de dos milímetros en  $-X$  mientras el material depositado está en disposición horizontal. .... 90

Figura 4.10. Desplazamiento de dos milímetros en X mientras el material depositado está en disposición horizontal. .... 92

Figura 4.11. Desplazamiento de dos milímetros en  $-X$  mientras el material depositado está en disposición vertical. .... 94

## Introducción

En la actualidad, el uso de superficies reflejantes, como los espejos planos, es de gran relevancia en el estudio de la luz (óptica). Estas superficies desempeñan un papel esencial en experimentos, el diseño de dispositivos interferométricos, instrumentos microscópicos y otras aplicaciones para su uso tanto en la industria como en la academia. Sin embargo, estas superficies están expuestas a desgastes, partículas ambientales diminutas, daños potenciales durante la manipulación o posibles defectos de fábrica. En situaciones donde se requiera una superficie reflejante lo suficientemente limpia, será crucial identificar imperfecciones o defectos que puedan afectar los resultados de las mediciones en la experimentación o aplicación que se requiera.

Para abordar este desafío, se propone utilizar un método existente de detección de imperfecciones en superficies planas reflectantes mediante un dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson en espacio libre. En el desarrollo de este trabajo, se añadió un objeto transparente (portaobjetos) de vidrio del tipo soda lime, con material depositado en una de sus superficies, simulando una rejilla Ronchi [1], al brazo del interferómetro, adyacente a un espejo para añadir imperfecciones “controladas” o visualmente detectables en la superficie reflectante, lo anterior para tener la certeza de la detección adecuada por parte del dispositivo-sensor de imperfecciones visualmente localizables.

Este dispositivo-sensor óptico en espacio libre está implementado con un sistema de medición altamente sensible basado en el interferómetro de Michelson, un circuito para acoplar la señal, un programa para almacenar y visualizar en tiempo real los datos obtenidos, una platina motorizada de seis ejes Newfocus 8095(M). El trabajo experimental consta de dos partes, la primera, en busca de detectar las imperfecciones depositadas en el vidrio soda lime con el diámetro del haz láser sin modificar su tamaño. Se harán diversos barridos sobre un área determinada en la misma zona, en los resultados, se espera obtener una clara diferencia de cuando está el material depositado y cuando hay ausencia de éste. La segunda parte, consta de añadir un lente convergente para reducir el diámetro de la cintura del haz láser y realizar barridos, de esta manera observar el comportamiento de los resultados obtenidos cuando se cambia de tamaño el diámetro de la cintura del haz láser y detectar imperfecciones con una resolución distinta. Finalmente comprobar las ventajas de utilizar un dispositivo tan sensible como el interferómetro de Michelson para mediciones en escalas nanométricas.

## **I. FUNDAMENTOS DE ÓPTICA**

En este capítulo, se explorarán los conceptos fundamentales utilizados en este trabajo y su desarrollo teórico. El objetivo principal es proporcionar una explicación detallada de los fenómenos que se producen durante el proceso experimental, tales como la interferencia constructiva y destructiva, la ley de Snell, los diversos tipos de interferómetros y el patrón de interferencia observado. Estos fenómenos se abordarán utilizando expresiones matemáticas con el propósito de facilitar una comprensión más clara y profunda.

## 1.1 Definición de la luz

La óptica es una parte de la ciencia que estudia los orígenes, la propagación, y la detección de la luz que rodea al mundo que conocemos. Es importante mencionar que se entiende por luz a la radiación electromagnética percibida por el ojo humano y a la que no, por lo que el concepto abarca la luz no visible y visible [2].

Para el propósito de este trabajo se definirá a la luz como una onda electromagnética, también se puede describir como una onda de radio con la diferencia de que su frecuencia es mayor y por lo tanto su longitud de onda es considerablemente menor [2], en general puede ser descrita como una onda. Para este trabajo se usó una fuente de luz monocromática roja de  $633 \times 10^{-9}$  m, o también llamado 633 nanómetros (nm) como fuente de luz principal para el interferómetro de Michelson. El rayo de luz es un fenómeno complicado de explicar sin embargo se puede entender como una representación de la dirección en al que se propaga la energía de una onda de luz [2].

Hablando de una onda de luz específicamente, hay diversas áreas donde la perturbación de la onda alcanza su punto máximo, estas áreas llevan por nombre frentes de onda, que en términos simples se describen como las crestas de las ondas luminosas. Otra manera en la que se puede definir un frente de onda es considerarlo como una superficie imaginaria donde la fase de la onda de luz no tiene perturbación alguna, es decir permanece constante. La separación entre dos frentes de onda sucesivos que comparten la misma fase se conoce como longitud de onda, aplica a cualquier tipo de onda, sin embargo, en este trabajo de tesis se enfocara principalmente en ondas luminosas [2].

## 1.2. Representación matemática de una onda luminosa

Una onda en cualquier tema de estudio relevante suele tener características muy similares, ya sea una onda luminosa, una onda producida por una fuerza aplicada horizontal o verticalmente, o una onda acústica por mencionar algunos ejemplos.

En cualquiera de los casos, la representación matemática suele ser muy similar, por lo que generalmente una onda está compuesta por una perturbación  $\Psi$  (proveniente de cualquier fuente eso no es relevante por ahora) que se desplazara a una unidad  $x_m$ , y viéndola desde el punto de vista de una función estará dada como  $f(x_m)$ , sin embargo otro factor importante a considerar es el tiempo  $t_m$ , por lo tanto se puede expresar una onda simple unidimensional como  $f(x_m, t_m)$  [3], por lo que:

$$\Psi = f(x_m, t_m) \quad (1)$$

Donde:

$\Psi$  = Perturbación o amplitud de la onda.

$x_m$  = Representa la posición de la onda en el espacio.

$t_m$  = Se refiere al tiempo, indica el momento en el que se observa la onda.

La Ec.1 representa la información completa de una onda simple unidimensional, combinando la información sobre la posición  $x_m$  y el tiempo  $t_m$ . Describe como cambia alguna perturbación a lo largo del tiempo y el espacio. Ahora, es importante tomar en cuenta la representación más simple de una onda, aquella que su perfil es una curva sinusoidal o cosenoidal también conocidas como ondas armónicas y que son representadas como:

$$\Psi(x_m, t_m)_{t_m=0} = \Psi(x_m) = A \text{ sen } kx_m = f(x_m) \quad (2)$$

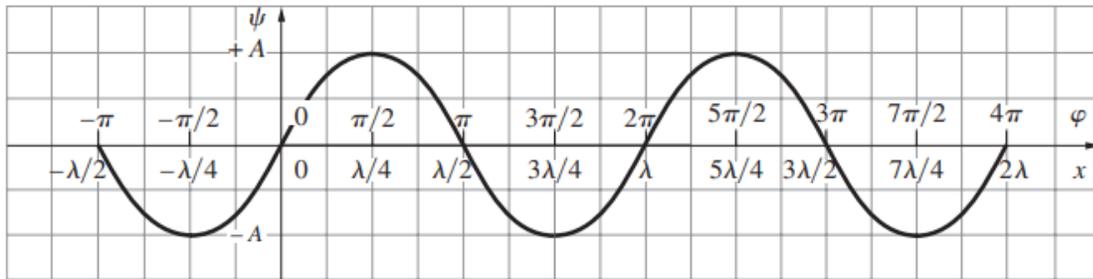
Donde:

$\Psi(x_m, t_m)_{t_m=0}$  = Representa la perturbación de la onda en un punto en el espacio y en un instante en el tiempo, en este caso un tiempo inicial cero (momento en el que comienza a propagarse).

A = Es la amplitud de la onda.

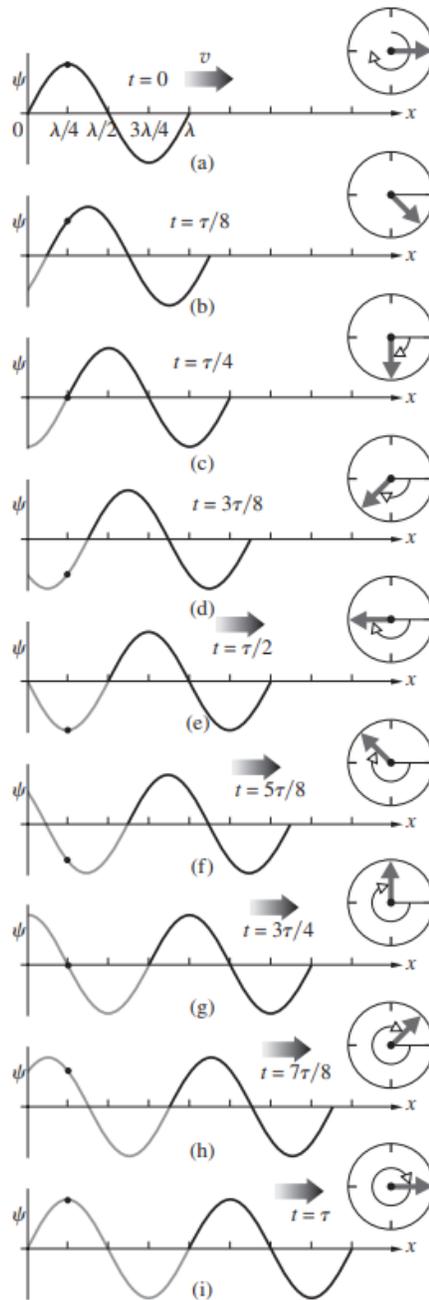
k = Indica el número de oscilaciones que se producen en una unidad de longitud.

La variable  $k$  es conocida como una constante positiva, como un número de propagación y es usada simplemente porque no se puede tomar el seno como una cantidad de unidades físicas [3]. La Fig. 1 representa la forma geométrica de una onda de luz, aunque no está estrictamente limitada a la luz, la representación geométrica puede ser aplicable a cualquier tipo de onda, sin embargo, para el desarrollo de este trabajo de tesis se hará énfasis en ondas luminosas.



**Figura 1.** Perfil de una función armónica. Es como el perfil de una onda armónica. Una longitud de onda corresponde a un cambio de fase  $\psi$  de  $2\pi$  radianes [3].

Otra forma de representar una onda armónica es a través del tiempo, como se muestra en la Fig. 1.1 [3].

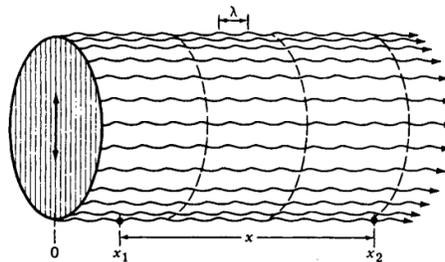


**Figura 1.1.** Onda armónica a través del tiempo [3].

Por lo mencionado anteriormente esa será la forma natural de cualquier tipo de onda sin importar su naturaleza, ya que todas cumplen las mismas condiciones, cuando se habla estrictamente de una onda unidimensional.

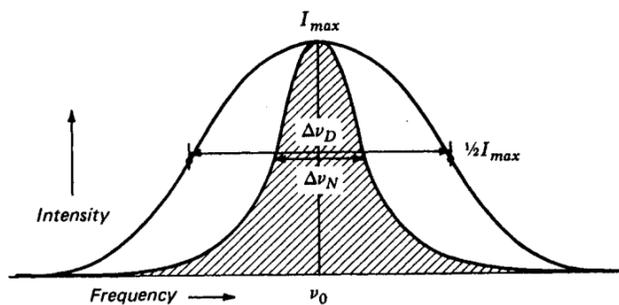
### 1.3 Coherencia de un haz luminoso

La coherencia de un haz luminoso es una propiedad que indica la relación de fase entre diferentes puntos de una onda luminosa. Considerando que se tiene una fuente puntual de luz que emite un tren de ondas monocromático infinitamente largo con diferentes frentes de onda como esféricos o planos. Tal y como se representa en la Fig. 1.2 [4].



**Figura 1.2.** Ilustra ondas coherentes planas, monocromáticas y polarizadas que emergen de una fuente de luz láser [4].

Tomando en cuenta que la fuente de luz monocromática (láser) tiene condiciones ideales, la diferencia de fase entre los puntos  $x_1$  y  $x_2$ , separados a cualquier distancia a lo largo de cualquier rayo, es independiente del tiempo. De manera similar, la diferencia de fase medida en un único punto del espacio al principio y al final de un intervalo de tiempo fijo no se ve afectado con el tiempo. Lo antes descrito se refiere a la coherencia temporal perfecta. Por otro lado, la diferencia de fase para dos puntos fijos cualesquiera en un plano normal a la dirección de un rayo son independientes del tiempo, por lo que se trata de la coherencia espacial o lateral perfecta [4].



**Figura 1.3.** Línea espectral. Comparación de la anchura natural de una línea espectral con su anchura Doppler (variación de la frecuencia) [4].

Puesto que las fuentes luminosas reales emiten trenes de ondas de longitud finita y esta longitud es importante para la producción de fenómenos de interferencia de todo tipo, se

deben determinar valores prácticos para la longitud de coherencia. La vida media de un átomo en el estado de radiación es de aproximadamente  $1.6 \cdot 10^{-8}$  segundos. Viajando a la velocidad de la luz, cada tren de ondas tiene una longitud de unos 3 m. Tanto si estas ondas están amortiguadas como si son de amplitud constante, un análisis de Fourier de las ondas conduce a una distribución de frecuencias llamada amplitud natural de una línea espectral como lo muestra la Fig. 1.3. Las fuentes de luz térmicas están compuestas por átomos que emiten aleatoriamente trenes de ondas en momentos aleatorios, y sus frecuencias se ven alteradas por los movimientos térmicos y por los campos eléctricos y magnéticos locales eléctricos y magnéticos locales. La suma de todos estos efectos ensancha enormemente cada línea del espectro y le da un ancho de banda. El ensanchamiento de la mayoría de las líneas del espectro se debe al efecto Doppler y se denomina ensanchamiento Doppler [4].

Por lo tanto, la anchura de una línea espectral es una medida de la longitud de coherencia, y la longitud de coherencia es inversamente proporcional al ancho de banda de una línea espectral [4].

## 1.4 Ley de Snell

Cuando un haz de luz incide sobre una superficie de cualquier material y este cambia su trayectoria ocurre el fenómeno conocido como refracción, en otras palabras, esto ocurre cuando la luz sufre un cambio de dirección al pasar de un medio a otro. La refracción se produce debido a que la velocidad de la luz depende del índice de refracción del medio, y por lo tanto cambia al atravesar la superficie de separación [5]. La Ec. 3 expresa lo antes descrito sobre la ley de Snell:

$$n_s = \frac{v_s}{c_s} \quad (3)$$

Donde:

$n_s$  = Índice de refracción.

$c_s$  = Velocidad de la luz en el aire.

$v_s$  = Velocidad de la luz dentro del material.

La ley de Snell relaciona el índice de refracción de dos medios diferentes con el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción, también es posible calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar una superficie que separa dos medios con índice de refracción distinto.

Esto fue posible gracias al descubrimiento de Snell, que en el año de 1621 encontró la relación correcta entre el ángulo de incidencia y el de refracción [5]:

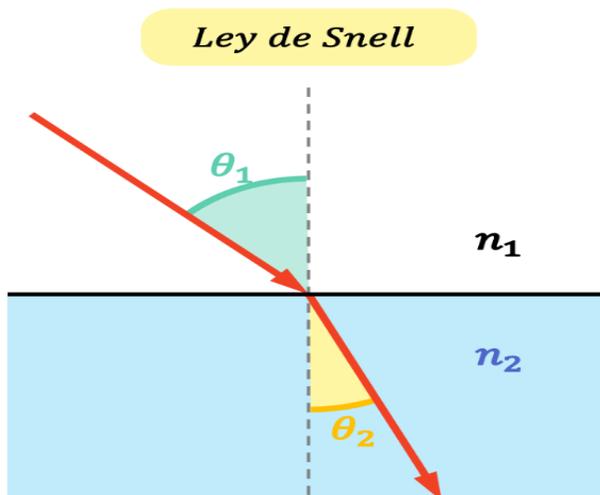
$$\frac{\text{sen}(\phi_1)}{\text{sen}(\phi_2)} = \text{Constante} \quad (4)$$

Posteriormente en el año de 1678, Huygens derivó el resultado de Snell a [5]:

$$\frac{\text{sen}(\phi_1)}{\text{sen}(\phi_2)} = \frac{v_{1s}}{v_{2s}} \quad (5)$$

Donde  $v_{1s}$ ,  $v_{2s}$  se refiere a velocidades de la luz en dos medios diferentes. Sin embargo, esta la forma moderna de esta expresión:

$$n_1 \text{sen}(\phi_1) = n_2 \text{sen}(\phi_2) \quad (6)$$



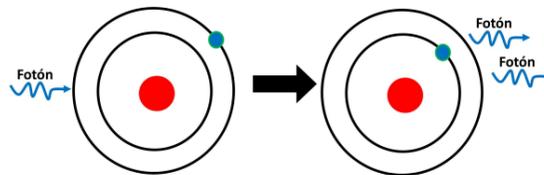
**Figura 1.4.** Representación gráfica de la ley de Snell [5].

Donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción en dos medios diferentes, así como  $\phi_1$  y  $\phi_2$  representan los ángulos de incidencia y de refracción respectivamente [5].

## 1.5 Láser

En la actualidad, los láseres son dispositivos sumamente relevantes para aplicaciones tanto industriales como para la vida cotidiana de las personas. Este invento fue el resultado de más de cuarenta años de investigaciones. La palabra LÁSER (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación, por sus siglas en inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Para lograr este descubrimiento, es crucial destacar la necesidad de amplificar la luz, lo cual se logra gracias a dos contribuciones fundamentales; la primera es la de sumergir una población de fotones en un entorno activo y la otra contribución es la disposición precisa de una cavidad resonante que produce un haz de fotones monocromáticos y altamente coherentes. [6].

Las contribuciones más significativas al descubrimiento del láser se atribuyen a Joseph Weber, Prokhorov y Basov. Los dos últimos autores mencionados colaboraron en Rusia, mientras que Weber lo hizo en la Universidad de Maryland. Todos fueron laureados con el Premio Nobel en 1964 por su contribución al principio del MASER-LÁSER. MASER (Amplificación de Microondas por Emisión Estimulada de Radiación, por sus siglas en inglés Microwaves Amplification by Stimulated Emission of Radiation), el cual fue un precursor importante para el descubrimiento del láser [6].

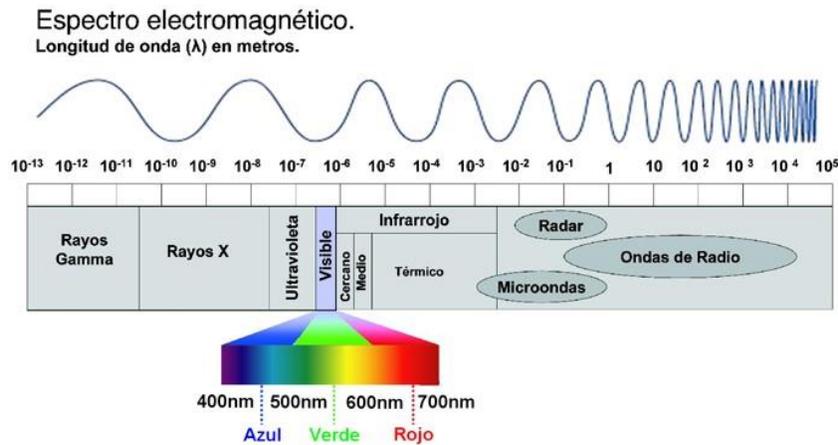


**Figura 1.5.** Proceso de emisión estimulada [6].

Para describir de manera general el funcionamiento de un láser, es importante analizar la emisión estimulada, que implica la interacción de un átomo en un estado excitado con un fotón, el cual se define como la partícula elemental que compone la luz, cada una de estas partículas constituyen la luz y en general la radiación electromagnética. El fotón induce una transición radiante del átomo a un estado de energía más bajo, dando lugar a la generación de un nuevo fotón coherente con características idénticas al incidente. Esto implica que el nuevo fotón tendrá la misma dirección, fase, energía y polarización [6], como se ilustra en la Fig. 1.5 [6].

### 1.5.1 Tipos de láser, de gas, sólidos y líquidos

Históricamente, uno de los primeros prototipos conocidos que se implementó con un gas como medio de amplificación fue el láser de Helio-Neón, desarrollado en el año de 1961 por el físico iraní Javan. El funcionamiento del láser He-Ne implica que, mediante el bombeo óptico a través de descargas eléctricas, el helio se ioniza, y muchos de sus átomos excitados colisionan inelásticamente con los átomos de neón en el estado fundamental. Este proceso transfiere suficiente energía para iniciar la inmersión de la población en el neón. Con el tiempo y el progreso de las investigaciones, se han desarrollado diversos tipos de láseres con distintas longitudes de onda, abarcando desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano [7]. El espectro electromagnético completo y el espectro electromagnético visible para los humanos está representado en la Fig. 1.6.



**Figura 1.6.** Representación del espectro electromagnético [2].

Otro tipo de láseres ampliamente utilizados en la actualidad son el láser de rubí y los láseres de fibra óptica, que se clasifican dentro de la categoría de láseres de estado sólido. Estos láseres emplean, como medio de amplificación, barras de vidrio o cristales dopados con iones, permitiendo la existencia de inversión de población en un sistema de tres o cuatro niveles de energía. Se caracterizan por su alta potencia. Posteriormente a la invención del láser de rubí, surgieron los láseres de líquido, también conocidos como láseres orgánicos, donde un colorante orgánico diluido en una solución se implementa como medio de amplificación [7].

## 1.6. Interferencia de la luz

El fenómeno de interferencia de la luz se manifiesta cuando dos ondas mutuamente coherentes se superponen en algún punto del espacio. Para que las ondas cumplan con la condición de ser mutuamente coherentes, existen dos casos posibles: si ambas tienen el mismo origen en una fuente luminosa o si son monocromáticas y poseen exactamente la misma frecuencia, como ocurre en algunos láseres del mismo modelo. El fenómeno de la superposición de la luz ocurre cuando dos haces de luz parten de la misma fuente luminosa, es decir deben ser iguales, y para lograrlo es necesario dividir el haz de luz original de la fuente luminosa (es posible utilizar un divisor de haz para obtener esta división) ambos haces recorren una distancia y posteriormente volverán a coincidir. Tomando como ejemplo la configuración óptica del interferómetro de Michelson, después de que el haz de luz de la fuente luminosa pase por el divisor de haz, dos espejos reflejan cada haz luminoso, volverán y posteriormente se superpondrán, de esta manera se obtiene el patrón de interferencia, a consecuencia de lo anterior se pueden observar las franjas de interferencia del interferómetro de Michelson.

La fase de cada una de las ondas al llegar al punto de visualización o detección se expresa de la siguiente manera [2]:

$$\Delta\Phi = \int_1^2 k dx \quad (7)$$

Donde:

$\Delta\Phi$  = Es la diferencia de fase entre dos ondas de luz.

$k$  = Es el número de onda (número de oscilaciones completas de la onda de luz, que ocurren en una distancia dada).

$dx$  = Elemento diferencial de longitud a lo largo del camino de propagación de la luz entre los puntos 1 y 2 definidos en la integral.

Suponiendo que el índice de refracción  $n$ , y el valor de  $k$ , está en función del punto  $x$  de la trayectoria. Si se sustituye el valor de  $k$  dado por [2]:

$$k = n k_0 \quad (8)$$

Donde  $k_0$  es el valor de  $k$  en el vacío, y si se usa la definición del camino óptico como  $CO$  se obtiene la siguiente expresión [2]:

$$\Delta\Phi = k_0(CO) \quad (9)$$

Por lo que si una de las ondas recorre un camino óptico  $CO_1$  y la otra recorre un camino óptico  $CO_2$  de la fuente al punto de observación, las fases de ellas en este punto entonces serán [2]:

$$\Delta\Phi_1 = k_0(CO_1) \quad (10)$$

$$\Delta\Phi_2 = k_0(CO_2) \quad (11)$$

Entonces la diferencia de fase va a estar dada por [2]:

$$\Delta\Phi_{21} = \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 = k_0(DCO) \quad (12)$$

Donde  $DCO$  es la diferencia del camino óptico entre los dos haces. Entonces la irradiancia  $I_p$  que es la potencia incidente sobre algún fotodetector queda dada por [3]:

$$I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos [k_0(DCO)] \quad (13)$$

Donde  $I_1$  e  $I_2$  son las irradiancias de cada haz de manera independiente. Entonces se puede determinar que la máxima irradiancia se obtiene para valores de la diferencia del camino óptico dados por [3]:

$$DCO = m_i \cdot \lambda_i \quad (14)$$

Donde:

$m_i$ = Orden de interferencia, si es un numero entero representa la interferencia constructiva; si es un valor medio, la interferencia será destructiva.

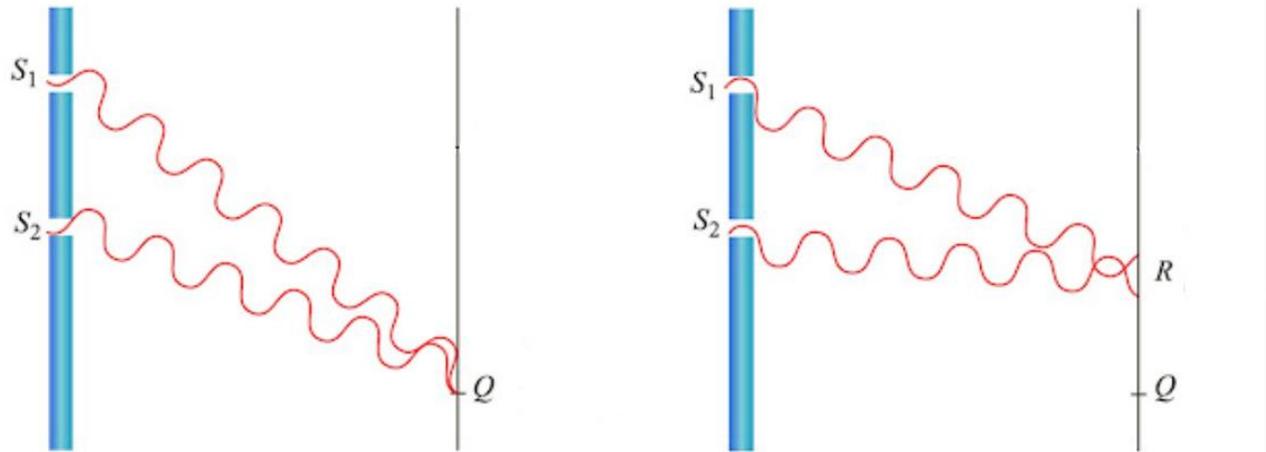
$\lambda_i$ = Longitud de onda de cada uno de los haces.

La amplitud mínima, que siempre es cero, se obtiene cuando [3]:

$$DCO = n \cdot \frac{\lambda_i}{2} \quad (15)$$

Donde  $n$  es un entero impar. Esta expresión es un precursor para una ecuación que será utilizada en este trabajo específicamente para el interferómetro de Michelson en espacio abierto. En la Ec. 14  $m_i$  se determinará el orden de interferencia, es decir si la interferencia es constructiva y destructiva, no se limita únicamente al valor medio y al valor entero, es

posible obtener casos en el que la interferencia no será completamente constructiva ni destructiva, es decir, se tendrán valores distintos a los mencionados [3].



**Figura 1.7.** Fenómeno de interferencia de dos fuentes de luz [8].

Una vez que se logra la interferencia, se manifiestan dos fenómenos: la interferencia constructiva y la destructiva. En la Fig. 1.7 se observan dos fuentes de luz que son S1 y S2, y se superponen en dos pantallas lejanas Q y R. La pantalla Q es una representación del fenómeno de interferencia constructiva, esto sucede cuando dos ondas de luz se superponen y están en fase, mientras que en R se observa el fenómeno de interferencia es destructiva, es decir, cuando las ondas se superponen y no están en fase provocando una onda de menor amplitud o nula.

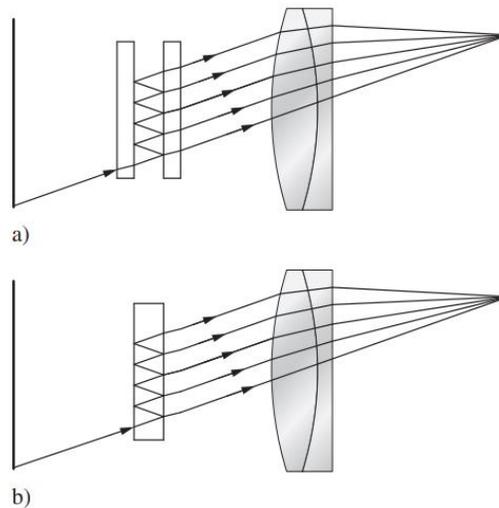
### 1.7. Tipos de Interferómetros

Como se ha mencionado previamente, para que se presente el fenómeno de interferencia, las fuentes de luz deben ser coherentes. Sin embargo, el principal desafío radica en que ambas fuentes de luz deben ser exactamente iguales. Lograr esto con dos fuentes diferentes, por más que sean similares, puede presentar pequeñas diferencias. Thomas Young resolvió este dilema en su clásico experimento del doble haz, donde logró tomar un solo frente de onda, separando dos porciones coherentes y luego haciendo que interfirieran. El principio de Young es el precursor de la mayoría de los interferómetros contemporáneos, ya que fue el primero en dividir su luz coherente y hacerla coincidir nuevamente en otro punto visible [3].

En la actualidad, existe una amplia variedad de interferómetros que emplean diferentes configuraciones ópticas para dividir y recombinar los haces de luz, así como diversos principios para generar el patrón de interferencia. Sin embargo, todos estos interferómetros se basan en el principio fundamental de superposición de ondas.

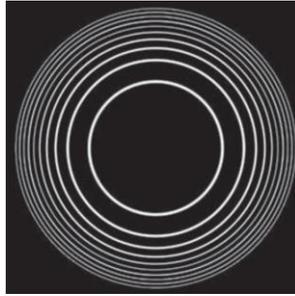
### 1.7.1 Interferómetro de Fabry-Perot

Este dispositivo interferométrico crea patrones de interferencia al realizar múltiples reflexiones en dos superficies que son planas y paralelas. Esta técnica expande la interferencia más allá de solo dos frentes de onda, involucrando un mayor número de ellas. Para promover múltiples reflexiones, las superficies están revestidas con una capa reflectante, la cual puede ser de naturaleza metálica o dieléctrica. Con la interferencia múltiple, los patrones ya no siguen una forma sinusoidal, típica cuando hay solo dos frentes de onda, sino que adoptan un perfil más estrecho. Esta modificación incrementa la precisión para la medición de la forma y la posición de los patrones [2]. El interferómetro y etalón de Fabry-Perot están representados en la Fig. 1.8.



**Figura 1.8.** a) Interferómetro de Fabry-Perot; b) etalón de Fabry-Perot [2].

En este interferómetro en particular, las franjas presentan una inclinación uniforme, como se observa en la Fig. 1.9, además utilizan una fuente extendida, como se ilustra en la Fig. 1.8, donde se presentan dos configuraciones posibles del interferómetro. La presencia de una lente facilita la observación de las franjas de inclinación uniforme en la pantalla [2].

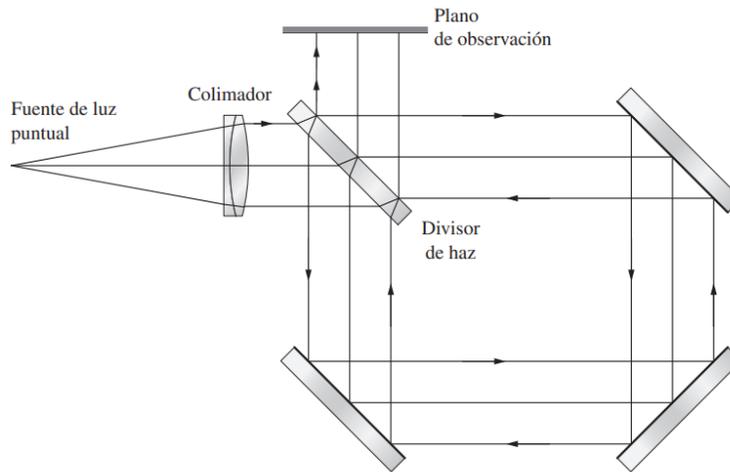


**Figura 1.9.** Patrón de interferencia del interferómetro de Fabry-Perot [2].

Este interferómetro presenta aplicaciones sumamente interesantes. Puede utilizarse como un filtro sintonizable, actuando de manera similar a un filtro óptico que transmite únicamente ciertas longitudes de onda. Otra aplicación relevante es su uso en el análisis espectral, permitiendo examinar las propiedades espectrales de una fuente de luz. Es destacable mencionar que, al igual que muchos otros interferómetros, este dispositivo puede emplearse en aplicaciones de interferometría para medir desplazamientos, vibraciones e índices de refracción.

### **1.7.2 Interferómetro de Sagnac**

El interferómetro de Sagnac también propaga un haz de luz proveniente de una fuente coherente. Este haz atraviesa un divisor de haz que lo separa en dos haces, ambos con las mismas características en términos de longitud de onda y amplitud. Posteriormente, estos haces recorren un bucle formado por espejos, que pueden adoptar una configuración cuadrada, o circular y/o también construida con fibra óptica. Ambos haces siguen una trayectoria cerrada, encerrando un área que varía según el tamaño del camino óptico. Aunque las trayectorias de los haces son similares, se desplazan en direcciones opuestas, culminando finalmente en el mismo punto donde fueron originalmente divididos [9].



**Figura 1.10.** Interferómetro de Sagnac de forma cuadrada [2].

Una de las aplicaciones más comunes de este interferómetro es como un giroscopio óptico que sirve para determinar rotaciones sumamente lentas. El efecto Sagnac fue inicialmente observado por el físico proveniente de Francia, Georges Sagnac en el año de 1913. Este fenómeno se desarrolla utilizando una fuente de luz coherente producida comúnmente por un láser, el cual será dividido en términos de amplitud, estos haces son capaces de viajar en un espacio cerrado (no importa la forma, mientras el espacio sea cerrado es posible desarrollar dicho fenómeno) con espejos, finalmente ambos haces se reencuentran en el punto inicial. Los haces divididos recorren el camino óptico, en direcciones opuestas, mientras están en una plataforma giratoria, a consecuencia de esto, se obtiene el efecto Sagnac. La Fig. 1.10 muestra la configuración óptica para obtener dicho efecto con la posición de los espejos de manera que se forme una trayectoria del camino óptico de forma cuadrada.

Si la plataforma o base en la que se encuentra el sistema no está rotando, los dos haces de luz se recombinarán sin ningún cambio en la fase, en cambio cuando está en movimiento habrá una diferencia en el tiempo de tránsito y en la distancia recorrida por uno de los haces, como consecuencia cuando los haces se recombinen se produce una interferencia que dependerá de la velocidad angular del sistema  $\Omega_{gn}$ .

La diferencia de fase de los haces en contra propagación del interferómetro de Sagnac se expresa de la siguiente manera [9]:

$$\Delta\phi_{Rgn} = \frac{8\pi A_{gn}}{C_{gn}\lambda_{gn}}\Omega_{gn} \quad (16)$$

Donde:

$\Delta\phi_{Rgn}$  = Representa el cambio de fase debido al efecto Sagnac.

$\lambda_{gn}$  = Es la longitud de onda.

$\Omega_{gn}$  = Es la velocidad angular del sistema.

$C_{gn}$  = Es la velocidad de la luz en el aire

$A_{gn}$  = Es el área sobre el cual pasan los haces.

$\pi$  = Constante pi.

La diferencia de tiempo de llegada de los haces al divisor de haz está dada por la Ec. 17 [9]:

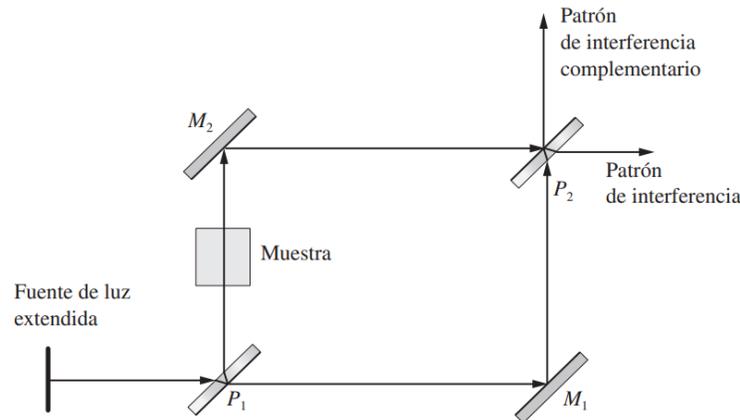
$$\Delta t_{vgn} = \frac{4A_{gn}\Omega_{gn}}{C^2_{gn}} \quad (17)$$

### 1.7.3 Interferómetro de Mach-Zehnder

El interferómetro de Mach-Zehnder, Fig. 1.11, puede considerarse como una variante o modificación del interferómetro de Michelson. La diferencia principal está en el uso de dos divisores de haz, a diferencia del interferómetro de Michelson, donde la luz vuelve a pasar por el mismo divisor de haz. Este diseño tiene como objetivo garantizar que la luz solo atraviese la muestra que está siendo examinada.

Una ventaja destacada de este interferómetro es su compensación, ya que ambos haces atraviesan la misma cantidad de vidrio. Este interferómetro puede ser empleado con luz blanca debido a que permite ajustar con precisión la igualdad de los caminos ópticos, usando una célula de compensación del mismo material que la muestra que se quiere estudiar. Es importante mencionar que los divisores de haz y los espejos se orientan de tal forma que los dos haces atraviesen la misma cantidad de vidrio y tengan el mismo número de reflexiones. Al igual que la mayoría de los interferómetros, sus usos más

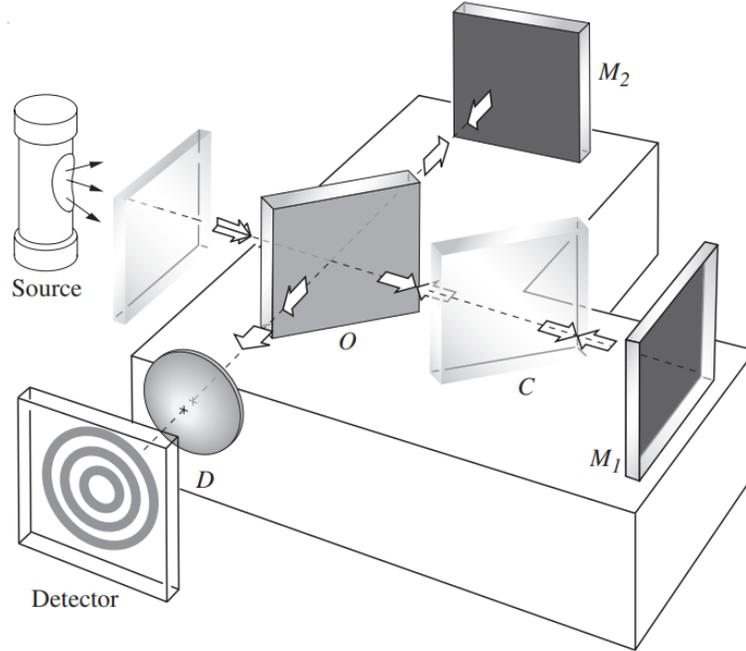
comunes incluyen la observación de pequeñas variaciones en el índice de refracción de ciertos materiales [2].



**Figura 1.11.** Interferómetro de Mach-Zehnder [2].

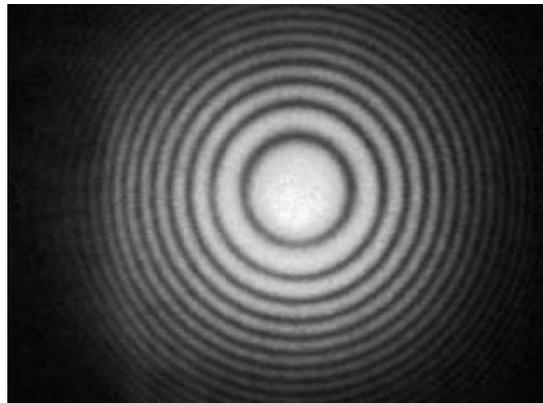
#### 1.7.4 Interferómetro de Michelson

Este trabajo de tesis se centra en el interferómetro de Michelson, Fig. 1.12. Este dispositivo utiliza una fuente de luz monocromática que se dirige hacia una placa divisora de haz  $O$  que divide el haz en amplitud, generando así dos haces: uno transmitido y otro reflejado. Estos haces se dirigen hacia dos espejos, ( $M_1$ ) fijo y ( $M_2$ ) movable para la experimentación, y ambos reflejan la luz de vuelta hacia la placa reflectora. En este punto, los haces transmitido y reflejado se combinan nuevamente y finalmente, el patrón de interferencia resultante puede ser visto en una pantalla de observación  $D$  o por un fotodetector.



**Figura 1.12.** Interferómetro de Michelson compensado [2].

Los dos haces que se superponen en la pantalla o en el caso de este trabajo de tesis en un fotodetector provienen de una sola fuente de luz ya que se hace uso de un divisor de haz, lo que garantiza que la disparidad de fase permanezca constante y se base exclusivamente en la diferencia en la distancia óptica recorrida por cada haz. Esto sugiere que las franjas, Fig. 1.13, producidas por el interferómetro pueden ser más nítidas si se inserta una lente convergente de distancia focal corta entre el láser y el divisor de haz, a consecuencia de lo anterior el fotodetector utilizado será capaz de distinguir con mayor claridad entre franjas claras y oscuras [3].

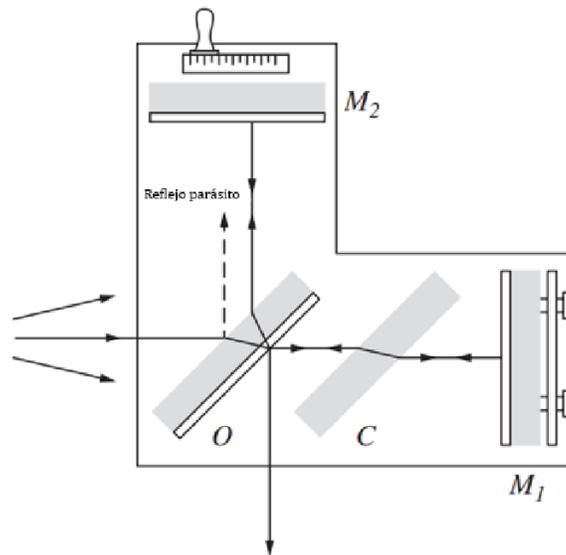


**Figura 1.13.** Franjas circulares del interferómetro de Michelson utilizando una fuente de luz láser [3].

El camino óptico de uno de los haces se puede variar aumentando o disminuyendo la distancia entre alguno de los espejos (en este caso  $M_2$ ) y el divisor de haz. Si el espejo se desplaza en  $\frac{\pi}{4}$  alejándose de la placa divisora de haz, el camino óptico de ese haz aumentara en  $\frac{\lambda_{mi}}{2}$ . Esto resultará en un cambio en las franjas de interferencia, donde el radio de los máximos se incrementará y ocupará la posición de los mínimos iniciales. Si el espejo movable se desplaza en una distancia adicional de  $\frac{\lambda_{mi}}{4}$  el nuevo sistema de franjas producido será totalmente diferente a la inicial. La Fig. 1.14 representa el interferómetro de Michelson compensado.

Si se desplaza lentamente el espejo en una distancia  $d_{mi}$  y se lleva un conteo del número  $m_{mi}$  de franjas de interferencia que pasan sobre un punto fijo, la longitud de onda de la luz se puede calcular como [3]:

$$\lambda_{mi} = \frac{2d_{mi}}{m_{mi}} \quad (18)$$



**Figura 1.14.** Vista superior del interferómetro de Michelson compensado en donde se aprecia el camino que recorre el haz de luz [3].

El interferómetro de Michelson, como cualquier interferómetro, es un dispositivo altamente sensible con la capacidad de detectar aumentos o disminuciones en la diferencia del camino óptico entre ambos brazos del interferómetro. Esta sensibilidad le permite detectar cambios en escalas nanométricas. La cantidad de cambio o alteración en el camino óptico se determina mediante el patrón de interferencia, que consiste en las franjas circulares de

interferencia, Fig. 1.13. Si se cuenta el número de franjas de interferencia que pasan sobre un punto fijo, es posible determinar la distancia a la cual el camino óptico en alguno de los espejos fue alterado. Despejando la distancia en la Ec. 18 se obtiene:

$$d_{mi} = \frac{\lambda_{mi} m_{mi}}{2} \quad (19)$$

A través de esta ecuación, es posible determinar la distancia recorrida en función del número de franjas de interferencia que han transcurrido debido a algún movimiento o alteración.

Contar visualmente el número de franjas de interferencia en una pantalla puede resultar complicado. La opción más recomendable es emplear un dispositivo de detección, como un fotodetector. Este dispositivo, al estar en un punto fijo, interpreta las franjas de interferencia como cambios entre luz y oscuridad. Dado que el fotodetector convierte la luz máxima en una cantidad de corriente, interpreta gráficamente un máximo y un mínimo (cuando hay luz y cuando no la hay) a medida que transcurren las franjas. La señal interpretada se asemeja a una señal senoidal cuando hay un transcurso de franjas de interferencia, y cuando no hay paso de estas, sólo se visualiza una señal constante.

### 1.7.5. Requisitos de coherencia

A medida que la disparidad en el trayecto óptico aumenta, los requisitos para la coherencia temporal de la fuente de luz se vuelven más estrictos, especialmente cuando el interferómetro no está compensado (cuenta con un solo divisor de haz) y la distancia de ambos brazos no es la misma o no se tiene un control sobre éstas. La diferencia de trayecto óptico entre los dos haces interferentes debe ser menor o igual a una cuarta parte de la longitud de onda de la luz para cada longitud de onda presente en el haz luminoso. Este criterio asegura que la interferencia no cambie de constructiva a destructiva, o viceversa, para algunas longitudes de onda mientras permanece inalterada para otras [2].

Específicamente lo anterior aplica si está trabajando con luz blanca, la cual es una mezcla de todas las longitudes de onda, entonces es necesario que el interferómetro este correctamente compensado para poder distinguir las franjas de interferencia, esto se debe a que la luz blanca tiene un ancho de banda de frecuencias mucho más amplio en comparación con la luz monocromática [2].

Para compensar el interferómetro de Michelson, es necesario ajustar la longitud de los caminos ópticos de los brazos del interferómetro de Michelson o al menos tener un control

de ambas distancias, opcionalmente también es una buena opción añadir un segundo divisor de haz para compensar el recorrido de ambos haces, esas condiciones son únicamente necesarias si se utiliza una fuente de luz blanca [2].

Para que dos rayos de luz interfieran y produzcan un patrón de interferencia estable, es necesario que tengan la misma frecuencia o se propaguen con la misma ley. Esto se cumple cuando ambos rayos provienen de la misma fuente de luz o de fuentes lo más similares posible. Se pueden utilizar fuentes de luz monocromática o de luz blanca, donde la frecuencia es importante para que los componentes rojos interfieran con los rojos y los componentes azules con los azules [2].

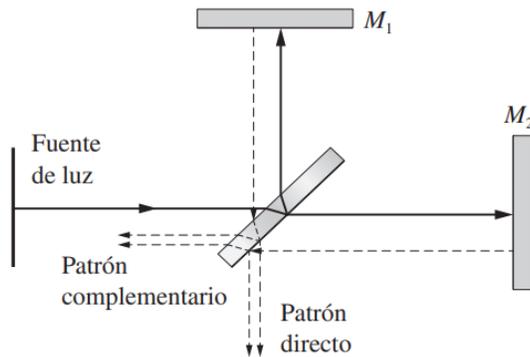
La nitidez de los patrones es más evidente cuando las ondas de interferencia tienen amplitudes iguales o casi iguales. Las regiones centrales de las franjas oscuras y claras corresponden a interferencia completa destructiva y constructiva, respectivamente [2].

En el momento en el que se observa el patrón de interferencia, lo importante es que los haces de luz coincidan en un punto en el espacio al mismo tiempo, es decir que se mantenga una relación constante en términos de fase. Es posible que los haces tengan diferencias iniciales en su fase; la posición de cada una de las crestas y valles de las ondas de luz, siempre y cuando esas diferencias se mantengan constantes, aún se producirá un patrón de interferencia consistente [2].

Entonces las ondas de ambas fuentes de luz tienen que estar en fase (con sus crestas y valles coincidiendo), para que se presente el fenómeno de interferencia el cual puede ser de carácter constructivo o destructivo [2].

### **1.7.6 Patrón de interferencia**

En el interferómetro de Michelson, Fig. 1.15, se forman dos patrones de interferencia de manera simultánea. Uno de estos patrones es el directo, el cual es el objeto de estudio, mientras que el otro puede ser apreciado colocando una pantalla o alguna superficie justo al lado de la fuente luminosa. Esto se debe a que en ese lugar se pueden ver dos imágenes de dicha fuente reflejadas desde ambos espejos  $M_1$  y  $M_2$ , lo que da lugar a la observación de un patrón de interferencia complementario. Es posible notar que la diferencia en el camino óptico para ambos patrones de interferencia siempre es igual. Por lo tanto, si alguno de los dos se anula debido a la interferencia destructiva, el otro también lo hará [2].



**Figura 1.15.** Dos patrones de interferencia complementarios en el interferómetro de Michelson [2].

Entonces, se puede afirmar que los patrones de interferencia son complementarios, de manera que una franja brillante en un patrón será oscura en el otro. Esta complementariedad de los dos patrones de interferencia ocurre únicamente cuando la superficie de los espejos  $M_1$  y  $M_2$  es dieléctrica, es decir, una superficie que separa dos medios con diferentes propiedades eléctricas, como puede ser el aire y el vidrio. Si la superficie es metálica, en general, no serán complementarios debido a la presencia de un fenómeno en el cual parte de la energía se queda en el metal en forma de calor [2].

## II. FUNDAMENTOS DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

En este capítulo, se abordarán los temas más importantes relacionados con la parte electrónica para el desarrollo de este trabajo de tesis. Es fundamental destacar que los fundamentos de la electrónica desempeñaron un papel crucial en la realización de esta tesis.

Después de la configuración óptica, fue necesario diseñar un circuito específico para captar la señal proveniente de un fotodetector en forma de corriente y convertirla a un equivalente de voltaje. Posteriormente, se utilizaron diversos filtros electrónicos para acoplar la señal de la mejor manera posible, permitiendo su estudio y análisis con la menor cantidad de ruido posible, lo cual implica comprender diversos temas de electrónica que son fundamentales para obtener buenos resultados de la señal acoplada.

Debido a la necesidad de realizar múltiples repeticiones experimentales, fue crucial diseñar un circuito que facilitara la adquisición de datos de manera cómoda. También se llevó a cabo un análisis del equipo utilizado en el laboratorio con sensores de fibra óptica del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), destacando el preamplificador de bajo ruido modelo SR560 proveniente del fabricante Stanford Research Systems, y el detector de las franjas de interferencia, que es un fotodetector de silicio diseñado para un rango de longitud de onda que abarca los 633 nm de la fuente de luz monocromática.

## 2.1. Filtros electrónicos

Los filtros electrónicos son circuitos diseñados para permitir el paso de ciertas frecuencias de una señal, así como para atenuar o eliminar señales según las necesidades del usuario. El funcionamiento de un filtro puede variar según los objetivos específicos, permitiendo la modificación de la amplitud y/o fase de la señal. Estos filtros pueden clasificarse de acuerdo con varios factores, entre ellos su composición.

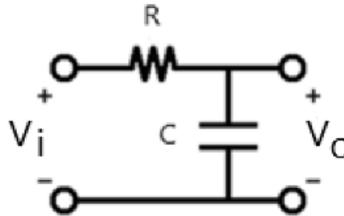
Existen filtros pasivos, que están conformados solo por resistencias, inductores y condensadores y también existen los filtros activos, que incluyen componentes que aportan ganancia, como transistores o amplificadores operacionales. La elección entre filtros pasivos y activos depende de los requisitos y las especificaciones del sistema en el que se estén aplicando.

Otra forma de clasificar a los filtros es según su función. Pueden ser filtros pasa-bajas, que permiten el paso de frecuencias inferiores a una frecuencia de corte. Los filtros pasa-altas, por otro lado, posibilitan el paso de frecuencias superiores a la frecuencia de corte. Otro tipo es el filtro pasa-bandas, el cual permite pasar un rango de frecuencias entre dos frecuencias de corte. Por el contrario, está el rechaza-banda, que, como su nombre lo indica, rechaza un cierto rango de frecuencias entre dos frecuencias de corte. También existe la opción de utilizar un filtro que no altere la señal de entrada. La elección entre estos tipos de filtros dependerá de los objetivos y requisitos específicos de la aplicación que se requiera.

La electrónica puede ser un factor determinante, ya que existen dos tipos principales de filtros: analógicos y digitales. Los filtros analógicos, que son la mayoría de los mencionados anteriormente, procesan señales analógicas, es decir, señales continuas en el tiempo y con amplitud variable. Estos son los más comúnmente utilizados en diversas aplicaciones. Por otro lado, los filtros digitales procesan señales discretas y su funcionamiento se basa normalmente en algoritmos matemáticos. La elección entre filtros analógicos y digitales dependerá de las características específicas de la señal y de los requisitos del sistema en el que se aplicarán [10].

### 2.1.1. Filtro pasa bajas

Este filtro permite el paso de frecuencias inferiores a la frecuencia de corte. A modo de ejemplo, se puede evaluar la función de transferencia de tensión de la Fig. 2, expresada en la Ec. 20, en términos de la transformada de Laplace [10].



**Figura 2.** Circuito RC [10].

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{R + \frac{1}{sC}} \rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + RSC} \quad (20)$$

Donde:

$V_o$  = Tensión de salida del filtro.

$V_i$  = Tensión de entrada del filtro.

$R$  = Es la resistencia.

$C$  = Es la capacitancia

$S$  = Es la frecuencia compleja (en radianes por segundo).

La frecuencia compleja  $S$  se relaciona directamente con la frecuencia de corte del filtro, que es el punto en el que la ganancia del filtro disminuye a 0.707 veces la ganancia máxima, siendo equivalente a -3dB, cuando la frecuencia compleja se acerca a la frecuencia de corte, la atenuación de las señales de alta frecuencia aumenta, como consecuencia el filtro bloquea eficazmente las señales no deseadas [10]. El capacitor  $C$  introduce un cero en el infinito (donde se puede anular la función de transferencia) con un valor determinado por  $(\frac{1}{RC})$ . La respuesta en frecuencia Fig. 2 se puede obtener a partir de la función de transferencia expresada en la transformada de Fourier, como se describe en la Ec. 21 [10].

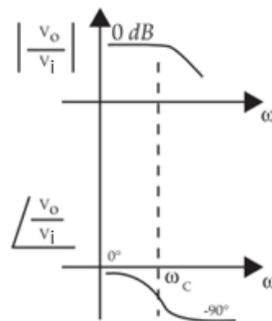
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (21)$$

Donde:

$j$  = Es la unidad imaginaria equivalente a  $\sqrt{-1}$

$\omega$  = Es la frecuencia angular en radianes por segundo.

Es importante mencionar que  $j$  permite a la expresión relacionarse con números complejos y  $\omega$  representa la frecuencia angular. Los números complejos son fundamentales para describir señales sinusoidales, impedancia y otras propiedades en el dominio de la frecuencia especialmente cuando se relaciona con filtros [10]. En la Fig. 2.1 se muestra la gráfica del diagrama de bode, en el cual se expresa la ganancia o atenuación y la variación del circuito RC respecto a la frecuencia. El diagrama de bode está constituido por dos aspectos fundamentales para analizar, primeramente, la magnitud, que muestra como la ganancia de tensión del circuito cambia respecto a la frecuencia. El segundo aspecto para considerar es la fase, la cual indica como la fase de la señal de salida se desplaza en relación con la señal de entrada a diferentes frecuencias.



**Figura 2.1.** Diagrama de Bode del circuito RC [10].

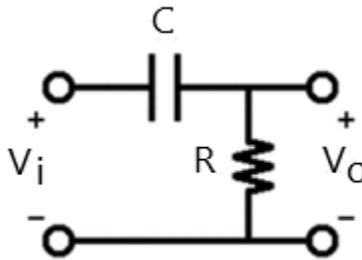
$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (22)$$

Se puede observar que hay una ganancia constante y otra de ganancia variable (atenuada), lo que permite mantener la zona de ganancia constante hasta un cierto valor

de frecuencia. Este valor corresponde a la frecuencia de corte superior de este circuito. En consecuencia, este circuito permite el paso de frecuencias bajas, siendo denominado un filtro pasa-bajas [10].

### 2.1.2. Filtro pasa altas

Los filtros pasa-altas permiten el paso de las frecuencias superiores a la frecuencia de corte. Al igual que en los filtros pasa-bajas, se utilizará un circuito resistencia-condensador para ejemplificar el concepto [10]:



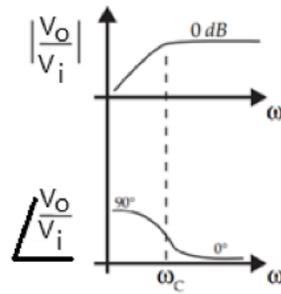
**Figura 2.2.** Circuito RC [10].

Evaluando la función de transferencia en la Fig. 2.2 en términos de transformada de Laplace, se tiene como resultado la Ec. 23 [10]:

$$\frac{V_o}{R} = \frac{V_i}{R + \frac{1}{sC}} \rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{R s C}{1 + R s C} \quad (23)$$

El capacitor  $C$  da resultado como origen un valor 0 y un valor de polo de  $(\frac{1}{RC})$ . Con esto se obtiene la respuesta en la frecuencia, observar Fig. 2.2, que parte de la función de transferencia expresada en la transformada de Fourier de la ecuación 23 [10].

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \quad (24)$$

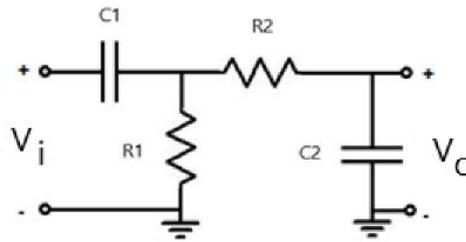


**Figura 2.3.** Diagrama de Bode del circuito RC [10].

La Fig. 2.3 muestra el diagrama de bode del filtro pasa altas. Es posible observar que en una zona de la respuesta en frecuencia se presenta una ganancia constante, mientras que en otra zona la ganancia es variable. La presencia de un capacitor en el circuito puede determinar una frecuencia mínima a partir de la cual se obtiene la característica deseada. En este caso, esta frecuencia recibe el nombre de frecuencia de corte inferior. Por lo tanto, el circuito permite el paso de frecuencias altas, siendo denominado un filtro pasa altas.

### 2.1.3. Filtro pasa bandas

El filtro pasa bandas permite el paso de señales que se encuentran dentro de un rango de frecuencias específico, mientras que las señales fuera de este rango son eliminadas o atenuadas. Este filtro es de gran relevancia en este trabajo de tesis, ya que se utilizó para evitar el ruido no deseado. Como se mencionó en párrafos anteriores, las franjas de interferencia son detectadas por un fotodetector y, mediante un circuito de transimpedancia se convierte la corriente obtenida a través de la señal de la luz de las franjas del interferómetro de Michelson en una señal de voltaje. Sin embargo, el problema surge con la velocidad a la que pasan dichas franjas de interferencia; es decir, pueden pasar muchas franjas en un segundo que no necesariamente son franjas de interferencia, sino ruido generado por algún movimiento (por más sutil que sea, el dispositivo lo detecta). Por lo tanto, utilizar un filtro para eliminar cierto rango de frecuencias fue fundamental para el desarrollo de la tesis [10].



**Figura 2.4.** Esquema básico de un filtro pasa banda pasivo [10].

Este tipo de filtro se clasifica en dos tipos: el activo y el pasivo. Los filtros activos utilizan amplificadores operacionales para aumentar la ganancia de la señal, mientras que los filtros pasivos no requieren componentes adicionales [10]. Entre sus principales características, como se ha mencionado, se destaca la capacidad de filtrar solo un rango de frecuencia específico. La ganancia, que representa la relación entre la amplitud de la señal de salida y la amplitud de la señal de entrada dentro de la banda de paso, es un parámetro clave. El ancho de banda, definido como la diferencia entre la frecuencia de corte superior y la frecuencia de corte inferior, también es crucial. Además, la fase, que describe el desfase entre la señal de entrada y la señal de salida dentro de la banda de paso, es otro aspecto importante para considerar [10].

Las frecuencias de corte del filtro pasa banda se determinan mediante las siguientes expresiones [10]:

$$FC1 = \frac{1}{2\pi R2C2} \quad (25)$$

$$FC2 = \frac{1}{2\pi R1C1} \quad (26)$$

La frecuencia de corte inferior (FC1) estará determinada por la por la Ec. 25 y la frecuencia de corte superior (FC2) se puede determinar por la Ec. 26.

## 2.5. Propiedades del ruido

El ruido está presente en todas partes, en la vida cotidiana de las personas, en una señal eléctrica, en una señal acústica, en una señal luminosa y otras señales más. Normalmente, se define el ruido como la perturbación de una señal indeseada provocada por alguna condición no controlada del medio, sobre otra, provocando la distorsión del entendimiento o de la señal original. Es imposible eliminar por completo el ruido en cualquier ámbito; sin embargo, si es posible reducirlo a niveles imperceptibles que no afecten la medición.

En el desarrollo de este proyecto de tesis, el ruido fue un aspecto difícil de reducir debido a la misma naturaleza sensible del dispositivo. En primer lugar, el ruido electrónico, que podría surgir durante el diseño y la soldadura de los componentes en una tarjeta impresa. Errores en el procedimiento de diseño podrían haber provocado ruido en la obtención de la señal que se pretendía analizar. El ruido térmico en el circuito impreso, el cual es provocado por el movimiento aleatorio de los electrones en las resistencias y los demás componentes debido al cambio de temperatura. En la obtención de resultados de este trabajo de tesis, se midió la temperatura del entorno en donde se encontraba el dispositivo cada vez que se realizaba una medición, sin embargo, el circuito pudo haber tenido variaciones de temperatura no percibidas que provocaran una cantidad de ruido.

Además es importante mencionar las variaciones de temperatura no solo en el circuito, sino también en el interferómetro de Michelson, las personas irradiamos un calor corporal que puede ser fácilmente transmitido en un entorno cercano, entonces, si una persona se mantiene cerca de un dispositivo tan sensible como el que se diseñó en este trabajo de tesis, puede ocasionar un cambio en la temperatura del ambiente provocando un cambio en el índice de refracción del aire por lo que es importante llevar un control de temperatura y como consecuencia un paso de franjas de interferencia indeseado que se traduce finalmente en ruido.

También es importante considerar el ruido provocado por la misma fuente de luz, se utilizó una fuente de luz monocromática de la marca Melles Griot de 633nm del tipo He-Ne (Helio-Neón), con el paso del tiempo, es normal que cualquier fuente de luz se comporte distinto a cuando estaba nueva, en el caso específico de las fuentes de luz monocromáticas de He-Ne es posible visualizar una fluctuación en la intensidad lo cual puede provocar una alteración en la medición, entonces, el ruido también proviene de la misma fuente de luz monocromática.

Es importante mencionar que otra fuente de ruido es provocada al manipular incorrectamente el equipo óptico usado en el dispositivo-sensor, por ejemplo, tocar los espejos, el divisor de haz, y la muestra con los dedos sin la protección necesaria,

ocasionando que se contamine de partículas que para el ojo humano no son visibles, pero para el dispositivo sensor son perceptibles.

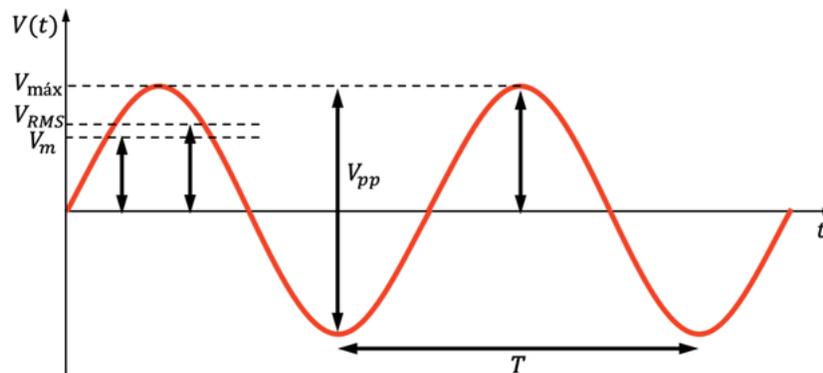
Otra forma de contaminar el equipo óptico es mediante las partículas que pueden salir de la nariz y boca, por lo que es importante tener los cuidados necesarios al momento de manipular el equipo óptico en el laboratorio y evitar contaminarlo. En este trabajo a pesar de manipular el equipo con cautela, es posible que este tipo de ruido esté presente en el dispositivo-sensor.

El interferómetro de Michelson, por su naturaleza de fabricación es capaz de percibir pequeñas vibraciones, como resultado de su exposición al ruido mecánico y vibraciones del entorno un ejemplo es la vibración mecánica producida al caminar una persona, muy cerca de la mesa óptica en donde se encuentra montado el interferómetro, los pasos provocan una vibración mecánica que el interferómetro es capaz de percibir con facilidad y provoca un paso de franjas de interferencia. La luz del entorno, que contiene todas las longitudes de onda a pesar de que el fotodetector está diseñado para un rango de longitud de onda específica, puede haber causado alteraciones en la medición, ya que el interferómetro se utilizó en espacio abierto. Se realizaron ajustes ambientales y mediciones constantes de la temperatura durante la experimentación para minimizar estos efectos.

En cuanto al ruido electrónico, se colocó el circuito en una cubierta diseñada en impresión 3D con material de PLA (Ácido poliláctico, por sus siglas en inglés Polylactic Acid) y se implementó una conexión a tierra física, por lo que se hizo lo posible para reducir el ruido lo máximo posible.

## **2.6. Valor RMS**

Es importante analizar las formas de las ondas periódicas. El valor RMS (Raíz Cuadrada de la Media del Cuadrado, por sus siglas en inglés Root Mean Square) es una medida estadística que se utiliza para calcular el valor eficaz de una señal eléctrica, que se refiere al valor cuadrático medio de una señal eléctrica. Este término es equivalente al valor eficaz y no se limita únicamente al análisis de una señal eléctrica, sino que también se aplica a otros tipos de señales con características similares. En términos generales, es un concepto matemático utilizado en electrónica y en diversas disciplinas para medir el nivel de potencia de una señal. La Fig. 2.5 muestra la representación del valor medio, valor RMS y valor pico a pico de una señal sinusoidal.



**Figura 2.5.** Valor RMS, Valor medio y Valor pico pico [11].

Siguiendo la definición, el valor eficaz de una señal  $f(t)$  de periodo  $T$  se calcula mediante la Ec. 27 [12]:

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (27)$$

Donde:

$F$ = Representa el valor medio de la función  $f(t)$  durante un periodo de tiempo completo  $T$ .

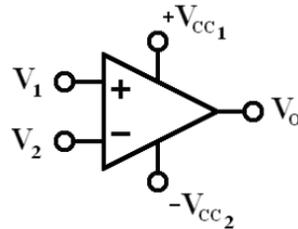
$T$ = Es el periodo de la señal.

$f(t)$ = Es la función de onda que se está evaluando

La integral está en función sobre un periodo de tiempo  $T$  por lo cual se puede obtener su valor medio durante un ciclo completo.

## 2.7 El amplificador operacional

Los amplificadores operacionales, especialmente los de uso comercial son dispositivos electrónicos que constan de varios componentes electrónicos integrados en uno solo y que tienen características específicas para aplicaciones particulares. El símbolo de un amplificador operacional se muestra en la Fig. 2.6 [10].



**Figura 2.6.** Símbolo de un amplificador operacional [10].

Tienen características muy interesantes, como ser de entrada diferencial, ya que se establece como la diferencia de potencial (voltaje) entre las dos terminales de entrada. También poseen una resistencia de entrada muy elevada y una impedancia baja en la salida. La ganancia diferencial es significativamente alta, y, por supuesto, un amplificador operacional casi siempre se alimenta con dos tensiones de corriente directa (DC)  $+V_{CC1}$  y  $-V_{CC2}$  por lo que se requieren de dos fuentes de alimentación.

El amplificador operacional pasa por distintas etapas, en la entrada se alimenta con dos fuentes de alimentación, pasa por la etapa de amplificador diferencial, después por una etapa de ganancia y finalmente por una sola salida.

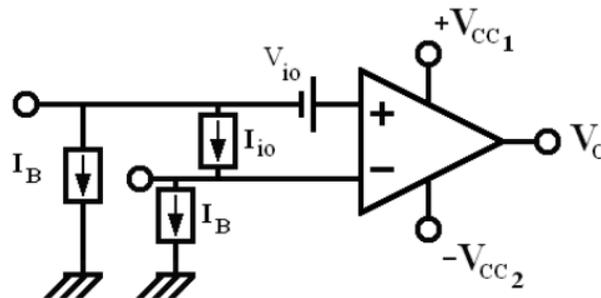
La tensión de salida de este amplificador estará definida con respecto a las tensiones de entrada, por lo que existen dos casos. En el primero, la ganancia en modo común se expresa en la Ec. 28 [10].

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (28)$$

La ganancia en modo diferencial  $V_d$  va a estar dada por la relación entre la tensión de salida  $V_1$  y el valor diferencial de las tensiones de entrada  $V_2$

$$V_d = V_1 - V_2 \quad (29)$$

Otro aspecto muy importante en los amplificadores operacionales es la tensión de voltaje establecido, que es una tensión diferencial de polarización originada por la naturaleza del mismo circuito señalada con  $V_{i0}$  en la Fig. 2.7.



**Figura 2.7.** Amplificador operacional con una tensión de DC [10].

Existen muchas configuraciones más y una variedad de aplicaciones que se pueden mencionar sobre los amplificadores operacionales. Se puede estudiar su comportamiento en lazo abierto y en lazo cerrado, así como el tipo de realimentación. No existe un amplificador operacional ideal, ya que depende específicamente de las necesidades del usuario y del camino que sea más productivo para el proyecto que se desea realizar.

## 2.8. Ruido en amplificadores operacionales

Los amplificadores operacionales son dispositivos electrónicos bastante sensibles, y si no se hace un uso adecuado, pueden presentar muchos inconvenientes al realizar una medición. Es muy importante diseñar un circuito apropiado para el uso de los amplificadores operacionales, ya que son altamente sensibles al ruido y pueden dañarse fácilmente. Se puede utilizar un capacitor para filtrar cualquier ruido pequeño que pueda dirigirse hacia el amplificador operacional. Este capacitor cumple la función de almacenar energía y evitar que llegue a la señal que se desea estudiar.

Es importante prestar atención a la capacitancia parásita que podría generarse entre los pines del amplificador operacional. En el diseño del circuito, siempre se recomienda realizar un trabajo cuidadoso al soldar los componentes al circuito impreso, aplicando la cantidad adecuada de soldadura para evitar posibles puentes con otros pines del amplificador operacional.

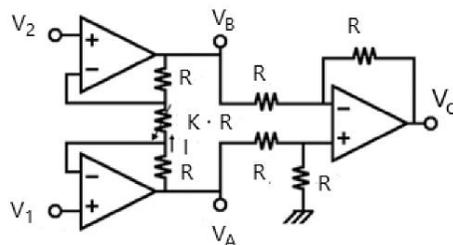
Un aspecto fundamental que se debe analizar es la temperatura del amplificador operacional. Esta debe monitorearse constantemente, y en caso de encontrar un sobrecalentamiento, es necesario identificar y solucionar el problema lo antes posible. Si

se trabaja con altas cantidades de corriente, se puede colocar un disipador de calor al amplificador operacional, siempre y cuando se esté seguro de que el calentamiento no es un error de diseño o de fabricación del mismo dispositivo.

Otro aspecto a resaltar es el diseño del circuito impreso, es conveniente dejar una separación adecuada entre los componentes. Por ejemplo, se debe asignar una sección exclusiva para colocar la fuente de voltaje del circuito (parte de potencia), la parte de electrónica digital y la parte de instrumentación. Esto favorecerá que el circuito funcione correctamente y no tenga interferencias indeseadas.

## 2.9 Amplificador de instrumentación

El amplificador de instrumentación, Fig. 2.8, es un dispositivo electrónico compuesto por amplificadores operacionales diseñados para amplificar señales diferenciales con una impedancia alta a la entrada. Se utiliza comúnmente para sensores, ya que amplifica señales de entrada muy bajas o débiles. Este amplificador consta de dos etapas: la primera es la preamplificación y la segunda es de amplificación diferencial. Es relevante destacar este amplificador, ya que se empleó en este trabajo de tesis, en el desarrollo del circuito que acopla la señal proveniente del fotodetector colocado en la pantalla del interferómetro de Michelson [10].



**Figura 2.8.** Amplificador de instrumentación [10].

Tomando en cuenta que todas las resistencias en la Fig. 2.8 son del mismo valor, la ganancia del amplificador de instrumentación va a estar dada por la siguiente expresión [10]:

$$V_o = V_A - V_B = I \cdot R \cdot (2 + K) \quad (30)$$

$$I = \frac{V_1 - V_2}{K \cdot R} \quad (31)$$

$$V_o = \frac{V_1 - V_2}{K \cdot R} \cdot (2 + K) \cdot R = (V_1 - V_2) \cdot \frac{2 + K}{K} \quad (32)$$

La impedancia se define como la propiedad eléctrica que mide la oposición total que presenta un circuito a la corriente, combinando la parte real (resistencia) y la parte imaginaria (reactancia), tanto a la entrada como a la salida del amplificador de instrumentación [10]:

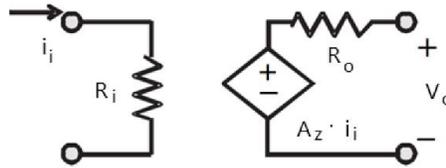
$$Z_{i1} = \infty \quad Z_{i2} = \infty \quad Z_o = 0 \quad (33)$$

La Ec. 33 expresa las impedancias del circuito de transimpedancia, donde  $Z_{i1}$  y  $Z_{i2}$  son las resistencias eléctricas de ambas entradas de voltaje  $V_1$  y  $V_2$  que intentan entrar en el circuito, es decir, las impedancias de entrada. Ambas impedancias están igualadas a infinito porque idealmente el circuito no debe ninguna carga en la señal de entrada, lo que es benéfico ya que evita distorsiones y pérdidas en la señal. En el caso de la impedancia  $Z_o$  es conocida también como la impedancia de salida nula, ya que idealmente la impedancia de salida del amplificador de instrumentación debe ser igual a cero. Las tres impedancias representadas en la Ec. 33 son ideales para garantizar la alta fidelidad de la señal y un rendimiento adecuado del circuito.

La ganancia diferencial es controlable con una resistencia ajustable o potenciómetro, la ganancia puede llegar a ser muy alta, por eso este amplificador operacional es excelente para ser usado en sensores que proporcionan señales muy pequeñas o débiles.

### 2.9.1 Circuito amplificador de transimpedancia

Este circuito es fundamental para el presente trabajo de tesis, ya que se encarga de analizar la señal proveniente de un sensor. Para facilitar un análisis más conveniente, se requiere una conversión de la corriente eléctrica a un equivalente en voltaje. Además, este circuito puede ser utilizado para amplificar la mencionada señal. En términos generales, existe una relación directa entre la tensión de salida y la corriente de entrada. Por ende, las magnitudes de la ganancia en este caso coinciden con las de una impedancia, lo cual explica el nombre del circuito [10].



**Figura 2.9.** Amplificador de transimpedancia [10]

Observando la Fig. 2.9, se representa un amplificador de transimpedancia, en este circuito es común encontrar resistencias tanto en la entrada  $R_i$  como en la salida del circuito. La resistencia de salida  $R_o$  estará conectada en serie con la fuente de tensión dependiente de la corriente, y su valor cambia en función de la corriente de entrada  $i_i$ . La ganancia de transimpedancia es el cambio en el voltaje de salida  $V_o$  dividido por la corriente de entrada  $i_i$ . El término  $A_z \cdot i_i$  corresponde a la ganancia de transimpedancia [10].

### 2.9.2 Preamplificador de bajo ruido SR560

Este preamplificador de bajo ruido tiene diversas aplicaciones, siendo una opción destacada la de acoplar la señal de un sensor, especialmente en aplicaciones ópticas debido a su respuesta rápida. Observar Fig. 2.10. Su diseño está específicamente orientado a minimizar el ruido, y es excelente para proporcionar una ganancia ajustable a la señal de entrada, permitiendo aumentar o disminuir según los requisitos de la aplicación. Para la reducción de ruido, el preamplificador de bajo ruido incorpora filtros  $RC$  de primer orden, cuya frecuencia de corte se puede configurar mediante los botones del panel frontal [13].

Se puede aplicar un filtro pasa bajas, pasa altas o pasa bandas y su respectiva atenuación que también se puede variar en el panel frontal, este preamplificador garantiza un ruido muy bajo debido a que el microprocesador solo se activa al hacer los respectivos cambios de filtro o ganancia, después permanece sin activar para evitar cualquier tipo de ruido digital, todo esto mencionado por la página oficial de Stanford Research Systems que es el fabricante.

Este preamplificador fue usado en este trabajo de tesis para eliminar la máxima cantidad de ruido posible y ajustar la señal obtenida para tener una clara visualización de los datos.



**Figura 2.10.** Preamplificador de bajo ruido SR560 en el laboratorio de sensores en fibra óptica del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología UNAM.

### 2.9.3 Cálculo de la incertidumbre de medida

Es esencial comprender estos conceptos no sólo en este trabajo, sino en cualquier campo de conocimiento donde se midan magnitudes físicas, el análisis de datos es crucial para tener un buen entendimiento de los datos, solamente que en ocasiones se carece de la interpretación adecuada. El término error está estrechamente relacionado con la incertidumbre de la medida. El error de medición se describe como la discrepancia entre un valor medido de una cantidad y un valor de referencia, que puede ser convencional o considerado como verdadero. Por otro lado, la incertidumbre de la medición se define como un parámetro que no puede ser negativo y que cuantifica la dispersión de los valores del mensurando en función de la información empleada [14].

Otros conceptos sumamente importantes al realizar mediciones y obtener resultados son precisión y exactitud. La exactitud de la medida se refiere a la proximidad existente entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando, por lo que una medición se vuelve más exacta a medida que el error de medida disminuye. La precisión de la medida, por otro lado, se relaciona con la proximidad existente entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto bajo condiciones específicas.

Finalmente, otro concepto estadístico utilizado en este trabajo de tesis es la regresión lineal, la cual se define como un modelo matemático utilizado para aproximar la relación de dependencia entre una variable dependiente y variables independientes, normalmente se implementa para predecir comportamientos de una variable en función de las otras.

#### **2.9.4 Fotodetector de silicio (dispositivos receptores)**

El silicio es un material ampliamente utilizado en la fabricación de diversos componentes y dispositivos debido a su disponibilidad y bajo costo. En este trabajo de tesis, se empleó un fotodetector de silicio para captar la luz roja con una longitud de onda de 633 nm. De acuerdo con la hoja de datos, el dispositivo receptor funciona con normalidad en un rango de temperatura de operación de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ , así como un tiempo de subida de 8 nano segundos, que se refiere al tiempo que le toma cambiar de un valor bajo a un valor alto de una señal incidente en el área sensitiva. La responsividad es de 0.65 (A/W) y se refiere al ratio entre la corriente fotogenerada y la potencia óptica incidente, es decir, mide la salida eléctrica por unidad de entrada óptica. El voltaje de ruptura máximo es de 30 V, esto significa que este será el valor máximo que se puede aplicar al fotodetector antes de que colapse y se vuelva conductivo. En general este modelo es de respuesta normal, para la aplicación implementada en este trabajo de tesis y las especificaciones son adecuadas.

El principio de funcionamiento de un fotodetector es similar al de una celda solar, donde su principal función es convertir la luz recibida en una corriente eléctrica mediante la absorción de fotones, se entiende como fotón a la partícula elemental que forma parte de la luz y otras formas de radiación electromagnética, los fotones no cuentan con masa en reposo y se mueven a la velocidad de la luz, además son los portadores de la interacción electromagnética. Cuando un fotón incide en el fotodetector, genera una cuasipartícula compuesta por un electrón con carga negativa y una carga positiva.

La calidad y rendimiento de un fotodetector se evalúan mediante una característica específica conocida como ganancia del ancho de banda, que mide su velocidad potencial y sensibilidad en GHz. Por lo general, un fotodetector común opera con una ganancia del ancho de banda de aproximadamente 120 GHz [15].

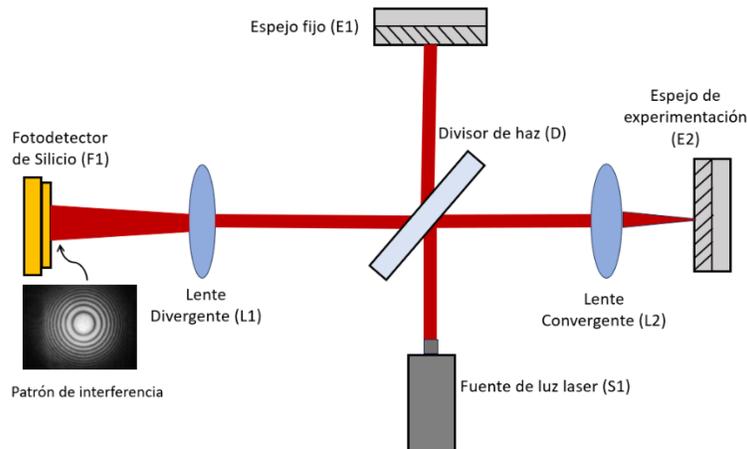
La velocidad de respuesta de un fotodetector es de gran relevancia en aplicaciones que requieren una rápida detección de cambios en la intensidad de luz incidente. Un ejemplo de esto es la configuración desarrollada en esta tesis, donde el patrón de interferencia generado por el interferómetro de Michelson es altamente sensible y puede experimentar cambios rápidos. Por lo tanto, se necesita un fotodetector eficiente capaz de detectar estos cambios a la mayor velocidad posible. Por lo que, en este trabajo se empleó un fotodetector de silicio común con un rango de detección adecuado para la fuente de luz monocromática de 633 nm y con la velocidad de respuesta adecuada para detectar los cambios de un estado con luz a uno con la ausencia de esta.

### III. DESARROLLO

Se desarrollo un dispositivo sensor basado en el interferómetro de Michelson para detectar imperfecciones de tamaño comparable a escalas micrométricas en superficies planas o reflejantes. En primer lugar, se configuró el interferómetro de Michelson en una mesa óptica, llevando a cabo esta tarea en el laboratorio de Sensores en Fibra Óptica del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

La configuración del interferómetro de Michelson incluyó el uso de dos espejos, siendo uno de ellos empleado como muestra para constituir una superficie analizable. También se empleó un divisor de haz, se asignó un espacio específico para utilizar como pantalla y visualizar las franjas de interferencia dadas por el interferómetro de Michelson, y se utilizó una fuente de luz monocromática, en este caso, un láser Melles Griot de 633 nm He-Ne (Helio-Neón). Cada componente fue montado sobre bases adecuadas para sujeción y ajuste de altura según se requiriera.

La configuración del interferómetro de Michelson permitió la observación del patrón de interferencia formado al superponer dos haces de luz provenientes de la misma fuente monocromática. Así, se hicieron visibles las franjas de interferencia, las cuales pueden cambiar en caso de que se produzca una alteración en la diferencia de camino óptico entre ambos brazos del interferómetro, el brazo del interferómetro es la distancia entre el divisor de haz y cada uno de los espejos. Existen dos formas de provocar dicho cambio en la diferencia de camino óptico: la primera y más simple es alterar la distancia de cualquiera de los dos espejos, ya sea alejándolo o acercándolo al divisor de haz; la segunda es mediante el índice de refracción. En el caso de utilizar el interferómetro en espacio abierto, este puede estar sujeto a cambios de temperatura, como corrientes de aire, calor proveniente de personas cercanas a la configuración y/o fluctuaciones del láser debido a su naturaleza. Estos factores pueden dar lugar a observar cambios en el paso de las franjas de interferencia.



**Figura 3.** Esquema simple de la configuración desarrollada del interferómetro de Michelson.

Observar el patrón de interferencia del interferómetro de Michelson es sencillo. En este caso, se utilizó un lente divergente que, al colocarse a cierta distancia, modifica el tamaño de la cintura del haz de una fuente de luz monocromática, haciéndolo más grande o pequeño en función de la distancia focal. En este experimento, se usó el lente para ampliar el tamaño de la cintura del haz láser y visualizar de manera más clara las franjas de interferencia del interferómetro de Michelson. De igual manera en la Fig. 3 se añade un lente convergente el cual reduce el diámetro de la cintura del haz láser, esta configuración se utilizará para realizar barridos y comparar la diferencia de los resultados cuando no se modifica el diámetro de la cintura del haz láser.

Utilizando la Ec. 19, es posible determinar la distancia unidireccional por la cual se alteró el camino óptico de uno de los espejos (en este trabajo de tesis, se considerará el espejo de experimentación,  $E2$ , como el único espejo móvil). Con la Ec. 19, y conociendo la longitud de onda de la fuente de luz monocromática y el número de franjas que transcurrieron durante la alteración del camino óptico, se puede calcular la distancia de dicho movimiento o alteración.

Se desarrolló un programa en el software Matlab de MathWorks con el objetivo de procesar y analizar datos complejos. En este caso, el programa fue diseñado para simular el número de franjas de interferencia que transcurrirían al desplazar el espejo  $E2$  a una cierta distancia. La gráfica proporcionada por el programa simula las franjas de interferencia, es decir, de un máximo a un mínimo constituye una franja de interferencia. Se comprobó la validez de los resultados despejando la Ec. 19.

En Matlab, para graficar la simulación del número de franjas de interferencia transcurridas, en una distancia determinada se empleó la expresión Ec. 34, derivada de las expresiones

de Fresnel, la cual se obtuvo como consecuencia de desarrollos algebraicos [3], y puede ser utilizada para calcular el número de franjas de interferencia transcurridas y graficarlas.

$$I(x) = I_l + 2I_c \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi x}{\lambda_1} + \pi \right) \right] \quad (34)$$

En donde:

$I_l$  = Luz ambiente

$I_c$  = Intensidad cero

$\lambda_1$  = Longitud de onda de la fuente de luz monocromática

$x$  = Representa la posición de la onda de luz

El funcionamiento del programa mencionado solicita al usuario los siguientes datos:  $I_l$  que será equivalente a intensidad de luz incidente o luz ambiente, en el contexto de la expresión y como solo se necesita para realizar la simulación se le asignará el valor de uno al igual que la intensidad cero  $I_c$ . La longitud de onda de la fuente de luz monocromática  $\lambda_1$  que se esté utilizando, por último, se necesita proporcionar la distancia en metros  $x$ . El usuario los introduce, posteriormente, el programa se ejecuta y muestra la gráfica. A continuación, se presentan ejemplos con sus respectivas comprobaciones utilizando la Ec. 19.

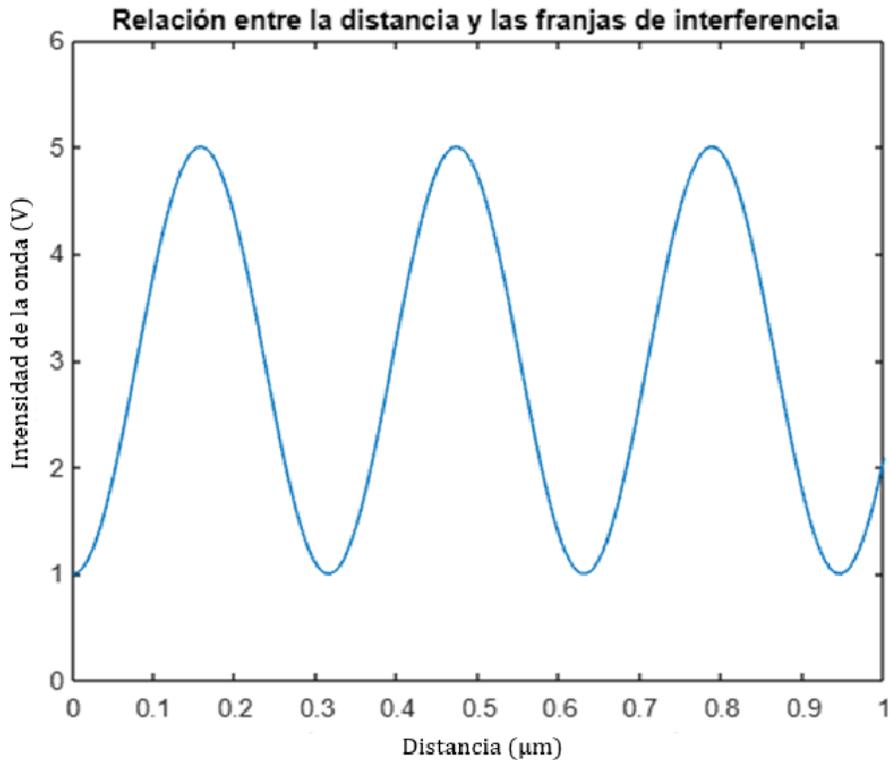
Usando la Ec. 19 y despejando " $m_{mi}$ " para obtener el número de franjas de interferencia transcurridas, se obtiene:

$$m_{mi} = \frac{2d_{mi}}{\lambda_{mi}} \quad (35)$$

En todos los ejemplos se simuló el uso de una fuente de luz monocromática con una longitud de onda de 633 nm, una luz ambiente de uno e intensidad cero con valor de uno. Para la distancia de 1  $\mu\text{m}$ .

$$m_{mi} = \frac{2(1\mu m)}{633nm} = 3 \quad (36)$$

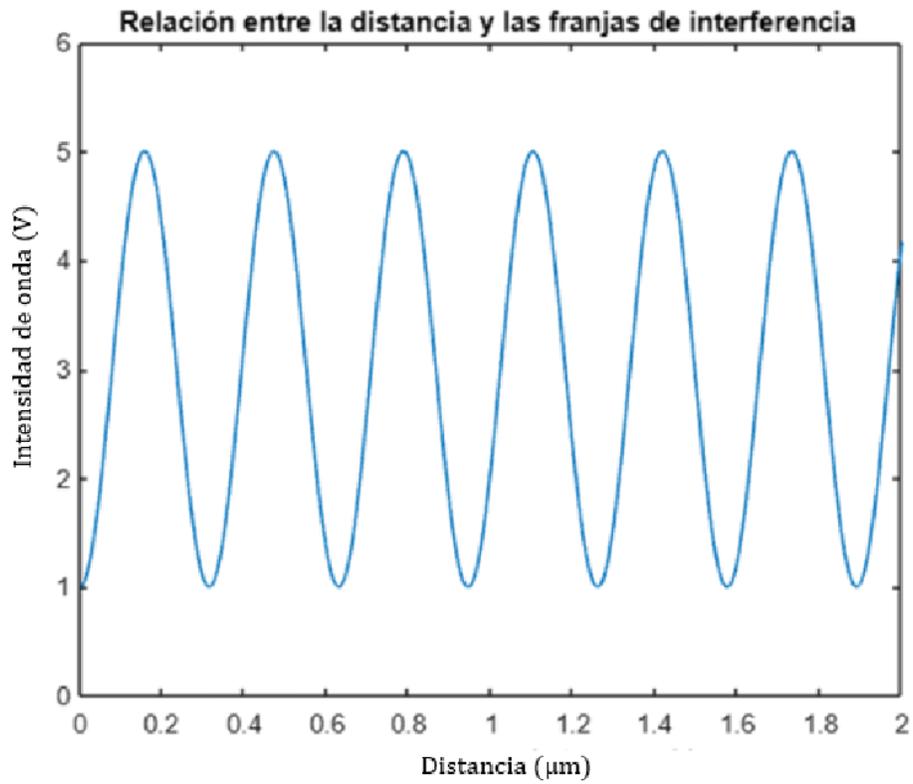
Por lo que en un desplazamiento de un micrómetro en el espejo  $E2$  deben observarse 3 franjas de interferencia. Se sabe que es una franja entera porque su recorrido viene de un mínimo, pasa por el valor máximo y vuelve al valor mínimo, entonces es equivalente a una franja de interferencia. Observar Fig. 3.1.



**Figura 3.1.** Simulación del número de franjas transcurridas en un micrómetro.

Para la distancia de  $2 \mu m$ , siguiendo la expresión anterior debe ser el doble de franjas de interferencia. Observar Fig. 3.2.

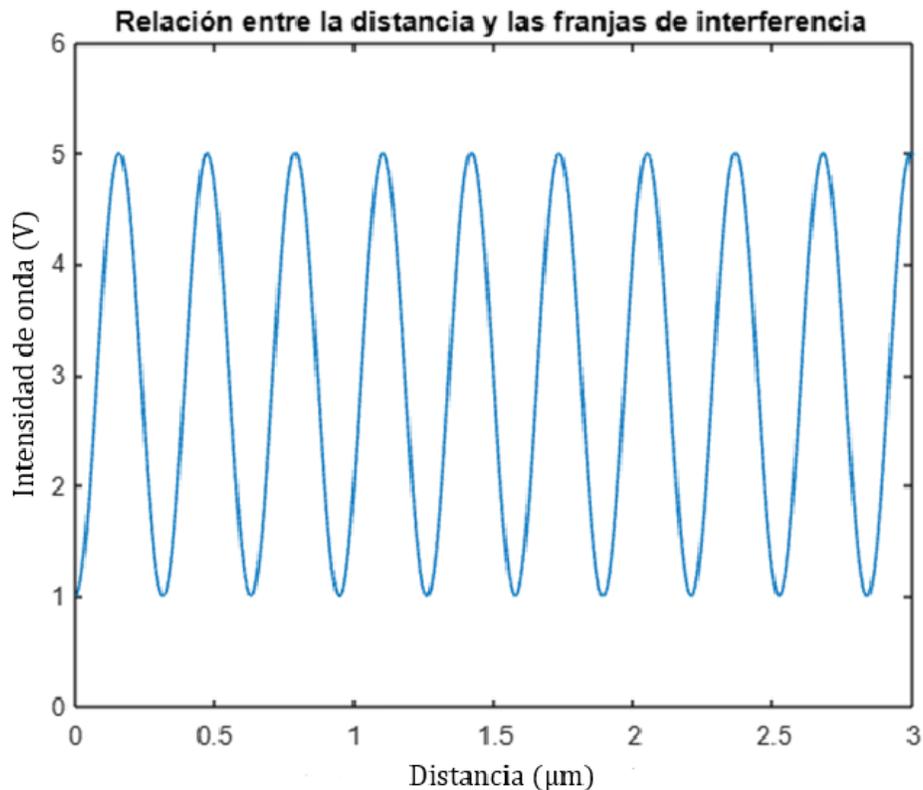
$$m_{mi} = \frac{2(2\mu m)}{633nm} = 6 \quad (37)$$



**Figura 3.2.** Simulación del número de franjas transcurridas en dos micrómetros.

Ahora el valor aumenta a una distancia de  $3 \mu m$ . Observar Fig. 3.3.

$$m_{mi} = \frac{2(3\mu m)}{633nm} = 9 \quad (38)$$



**Figura 3.3.** Simulación del número de franjas transcurridas en tres micrómetros.

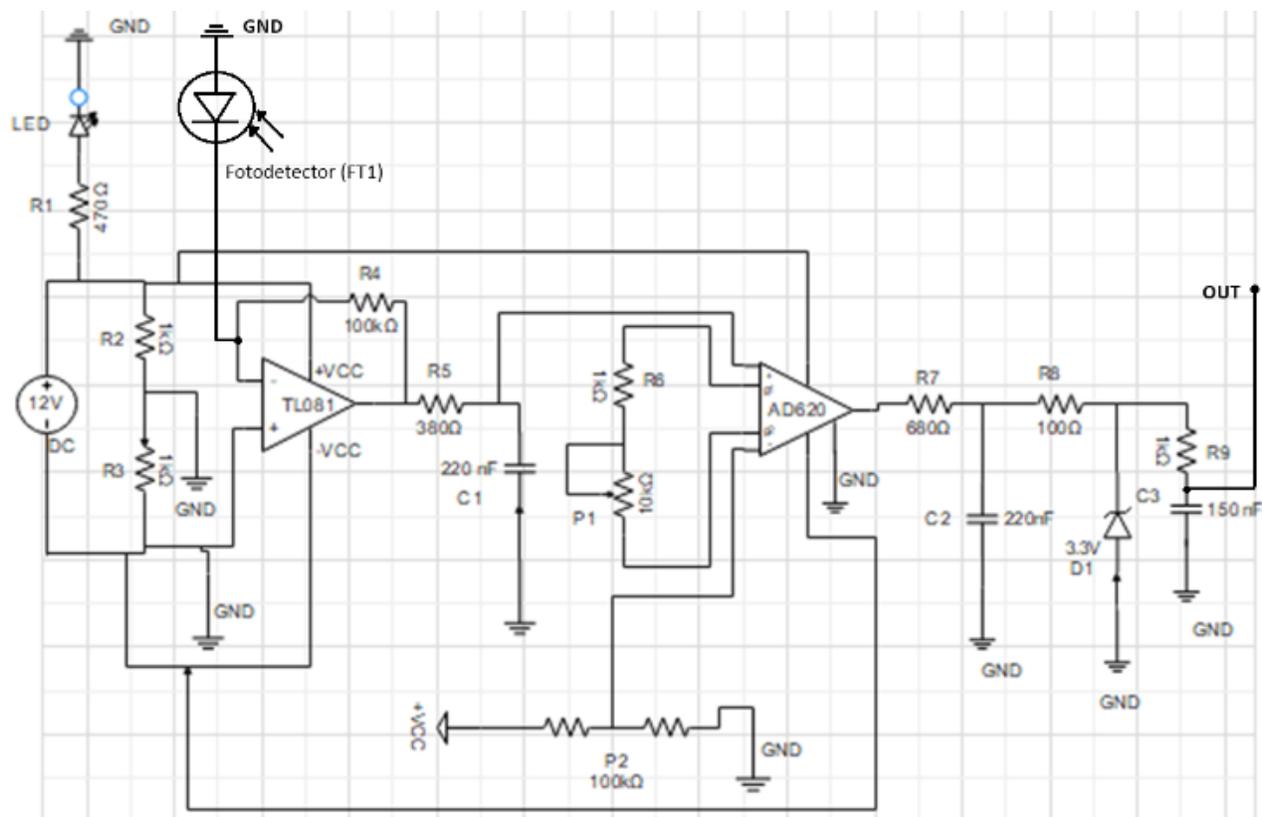
Es importante mencionar que el número de franjas, " $m_{mi}$ ", toma un valor adimensional, por lo que no tiene unidades al tratarse del número de franjas de interferencia transcurridas.

Contar el número de franjas transcurridas cuando ocurre una alteración en la diferencia del camino óptico es una tarea difícil para el ojo humano, especialmente cuando el número de franjas aumenta o los desplazamientos no son lo suficientemente veloces para ser percibidos. Por esta razón, se desarrolló un dispositivo para detectar y contar el número de franjas de interferencia que transcurren cuando se altera el camino óptico. Este dispositivo constará de tres partes: la parte óptica, la parte electrónica y la parte del software.

En la parte óptica, como ya se ha mencionado, se utiliza el interferómetro de Michelson que forma el patrón de interferencia. Además, se emplea un dispositivo de silicio (fotodetector) para la detección de la luz monocromática y los cambios de intensidad. El fotodetector de silicio convierte la luz en una corriente eléctrica mediante el principio del efecto fotoeléctrico. Al incidir los fotones sobre la superficie del fotodetector, los electrones

se excitan en el material de silicio, creando conjuntos electrón-hueco. Estos se separan por el campo eléctrico y generan fotocorriente proporcional a la intensidad de la luz. Para esta tesis se utilizó un fotodetector que detecta un rango de longitud de onda coincidente con la fuente de luz monocromática, un láser rojo de 633 nm Melles Griot He-Ne.

Para la adquisición de la señal proveniente del fotodetector de silicio, se diseñó el circuito que como resultado entrega una señal de voltaje a la salida en función de la corriente proporcionada a la entrada al fotodetector. Para lo anterior, se utilizó el circuito amplificador de transimpedancia, Fig. 3.4. En este circuito, existe una relación entre la tensión de salida y la corriente de entrada, proporcionando un equivalente en voltaje. También es posible aplicar una ganancia a dicha señal, que en este caso fue utilizando un amplificador TL081 y añadiendo la resistencia  $R4$ , que tiene un valor de 100 kohms.



**Figura 3.4.** Circuito diseñado para acoplar y analizar la señal obtenida del fotodetector.

Cuando se dispone de la señal acoplada, es decir, equivalente a un voltaje, es el momento de ajustar dicha señal. Para lograrlo, después de pasar por el circuito de transimpedancia, la señal se somete a un filtro pasa bajas. Este filtro utiliza los valores de resistencia  $R5 =$

380Ω (ohmios) y del capacitor C1 = 220nF (nano Faradios). Estos valores se seleccionaron con el propósito de atenuar la frecuencia más elevada, evitando así la influencia del ruido generado por vibraciones o movimientos externos durante las mediciones.

Para calcular la frecuencia de corte del filtro pasa bajos usado se usa la siguiente ecuación [16]:

$$F_c = \frac{1}{2\pi R_{FC} C_{FC}} \quad (39)$$

Donde:

$R_{FC}$  = Es el valor de la resistencia empleada.

$C_{FC}$  = Es el valor del capacitor utilizado.

Entonces, sustituyendo los valores por los de R5 y C1, se obtiene lo siguiente:

$$F_c = \frac{1}{2\pi(380 \text{ ohms})(220 \cdot 10^{-9})} \quad (40)$$

$$F_c = 1.89 \text{ kHz} \quad (41)$$

El circuito amplificador de instrumentación es ampliamente utilizado para adquirir señales de sensores, especialmente en el ámbito óptico. En este caso, se empleó el amplificador de instrumentación AD620, conocido por su alta precisión, y se añadió una resistencia externa (P1), en este caso, un potenciómetro de bajo ruido de veinte vueltas con un valor de 1k ohm, para ajustar la ganancia del amplificador según sea necesario. Además, en este circuito, es posible aplicar un offset o un voltaje de corriente directa (DC) a la señal de entrada. Para ello, se utilizó otro potenciómetro de bajo ruido de veinte vueltas con un valor de 100k ohm (P2) para ajustar un offset en caso de ser necesario.

Posteriormente, se implementó otro filtro pasa bajas utilizando la Ec. 39 y empleando los siguientes valores:

$R7 = 680 \text{ ohm}$

$C2 = 220 \text{ nF}$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$F_c = \frac{1}{2\pi(680 \text{ ohms})(220 \cdot 10^{-9})} \quad (42)$$

$$F_c = 1.06 \text{ kHz} \quad (43)$$

Luego, el filtro pasa bajas RC atenuará la señal si tiene una frecuencia mayor a 1.06 kHz y permitirá el paso de aquellas de menor frecuencia.

Posteriormente, para adquirir y analizar los datos, se empleó un microcontrolador de la familia Arduino ESP32. En este caso, se seleccionó este modelo específico debido a su velocidad de adquisición de datos, ya que otras tarjetas del mismo modelo presentaban velocidades de muestreo más bajas, lo que podría resultar en pérdida de datos. Es importante destacar que el ESP32 tiene una limitación en cuanto a la recepción de voltajes, no pudiendo superar los 3.3V en los pines de entrada. Para abordar este tema, se integró un diodo Zener de 3.3V (D1) en el circuito, que limita la señal de voltaje hasta ese punto, ofreciendo protección a la tarjeta ESP32.

Finalmente, se implementó un filtro pasa bajas con los siguientes valores:

$$F_c = \frac{1}{2\pi(680 \text{ ohms})(220 \cdot 10^{-9})} \quad (44)$$

$$F_c = 1.06 \text{ kHz} \quad (45)$$

Es esencial destacar que para alimentar los amplificadores TL081 y el AD620, se requiere una fuente de alimentación externa de tipo bipolar, con dos fuentes de voltaje: una positiva y otra negativa. Con el objetivo de evitar la incomodidad de emplear dos fuentes de alimentación, se optó por utilizar un divisor de tensión para alimentar los amplificadores operacionales con una sola fuente de alimentación. El divisor de tensión divide la tensión de entrada en dos tensiones más pequeñas de salida, mediante el uso de dos resistencias conectadas en serie. Una de las tensiones de salida se emplea como el terminal positivo del amplificador operacional, mientras que la otra se utiliza como el terminal negativo. De esta manera, se logra crear una alimentación bipolar simulada con un funcionamiento eficiente.

Las expresiones para el divisor de tensión son las siguientes [17]:

$$V_{salida} = V_{entrada} \cdot \frac{R2}{R3 + R2} \quad (46)$$

De acuerdo con la Fig. 3.4 en el circuito diseñado, las resistencias que conforman el divisor de tensión son las resistencias R2 y R2 por lo que los nombres de las resistencias en la ecuación 50 serán R1=R2 y R2=R3.

Por lo que para el circuito desarrollado en este trabajo la expresión correcta es la siguiente:

$$V_{salida} = V_{entrada} \cdot \frac{R3}{R2 + R3} \quad (47)$$

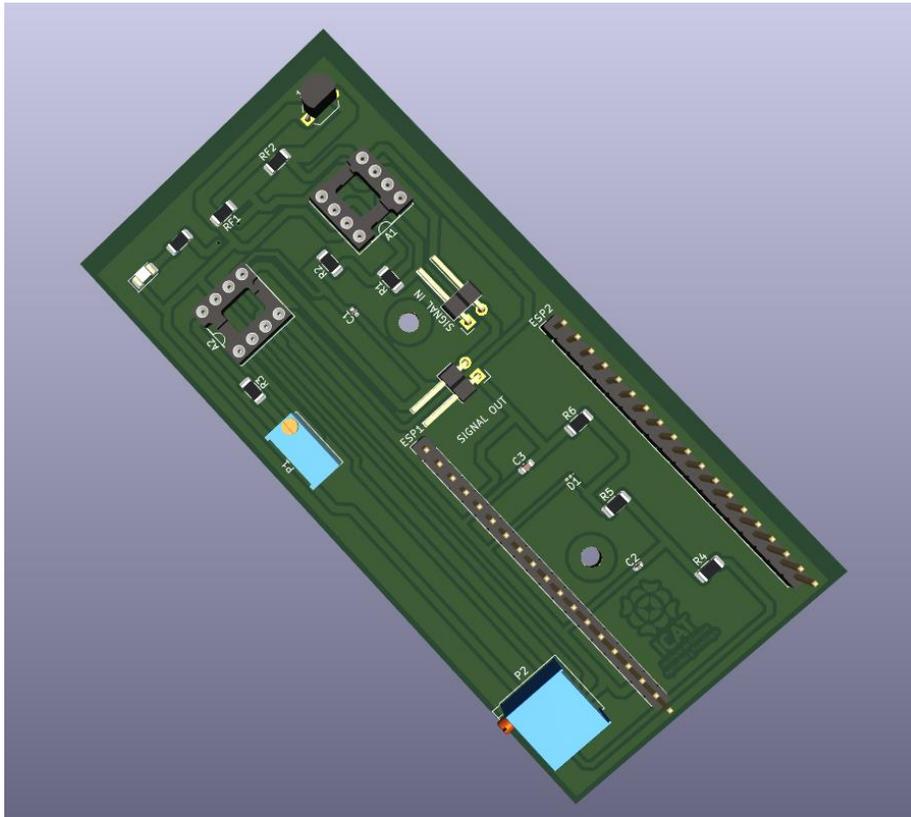
Utilizando la Ec. 47 y sustituyendo los valores se obtiene el siguiente resultado:

$$V_{salida} = 12V \cdot \frac{1000}{1000 + 1000} \quad (48)$$

Entonces

$$V_{salida} = 6V \quad (49)$$

Por lo que la alimentación de la fuente bipolar simulada es de +6V y -6V respectivamente con lo que solo se utilizó una sola fuente de alimentación externa para alimentar los amplificadores operacionales.

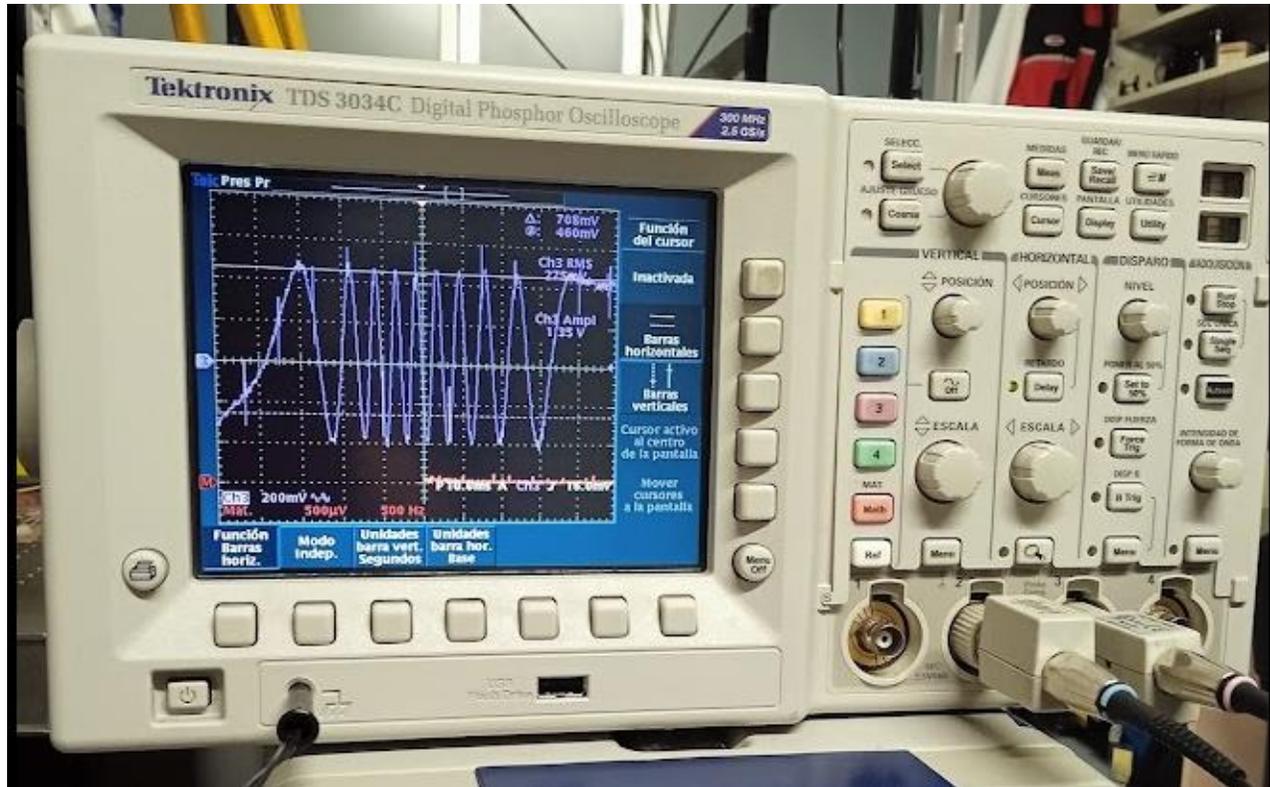


**Figura 3.5.** Modelo 3D del circuito diseñado.

El modelo 3D representa la tarjeta impresa PCB (Placa de Circuito Impreso, por sus siglas en inglés Printed Circuit Board). En la Fig. 3.5 se muestran todos los componentes utilizados, incluyendo los pines para insertar tanto la tarjeta con el microcontrolador ESP32 (llamado así por sus siglas de la compañía que lo desarrolla “Espressif Systems”) como los pines para insertar los amplificadores operacionales. Los potenciómetros, de color azul, junto con los capacitores, resistencias y el diodo Zener, fueron seleccionados como componentes SMD (dispositivo de montaje superficial, por sus siglas en inglés Surface-Mount Device).

Una vez que la señal está acoplada y correctamente filtrada, se inician las mediciones (visualmente). Sin embargo, las condiciones naturales del ambiente, como los cambios de temperatura, las corrientes de aire o el calor humano, son factores que no se pueden controlar. A pesar de diseñar un espacio aislado para el interferómetro de Michelson, diseñar el circuito con alta precisión y utilizar filtros para evitar el ruido electrónico, en ocasiones se produce más ruido, lo que afecta los resultados de la medición. Por esta razón, se decidió complementar el circuito diseñado con el preamplificador de bajo ruido SR560 en el que se puede hacer el ajuste en tiempo real de acuerdo con las condiciones en ese momento.

El preamplificador permite la aplicación de cualquier tipo de filtro necesario y la modificación de la ganancia en tiempo real. Durante las mediciones, si se observaba más ruido de lo habitual, se aplicaba un filtro para poder apreciar la señal al máximo. Es importante mencionar que, para estas pruebas, la señal se visualizó en tiempo real en un osciloscopio.



**Figura 3.6.** Señal mostrada en el osciloscopio obtenida a través del circuito diseñado, con bajo ruido.

En la Fig. 3.6 se observa un paso de franjas de interferencia, la señal está correctamente acoplada debido a que se distinguen claramente las crestas y valles de la señal. El estado alto que percibe el fotodetector (la cresta de la señal) es debido a que la zona sensitiva del fotodetector percibe intensidad luminosa, el estado bajo (valle de la señal) representa ausencia de luz en la parte sensitiva del fotodetector, este cambio constante de estados (alto y bajo) es provocado a consecuencia de una diferencia de longitud entre los dos brazos del interferómetro de Michelson, lo que significa que hay un paso de franjas de interferencia. Este paso de franjas de interferencia es provocado por un movimiento mecánico, este movimiento fue una presión aplicada a la mesa óptica con el fin de realizar

una prueba para verificar que el dispositivo-sensor este percibiendo correctamente el corrimiento de franjas de interferencia. Como se observa en la Fig. 3.6 la adquisición de datos es adecuada, es decir, es posible distinguir con facilidad el paso de franjas de interferencia sin ningún tipo de ruido que afecte la distinción de estas.

Una vez que se han controlado los problemas de ruido y la señal está acoplada según lo requerido, es el momento de trabajar en la adquisición de datos. Para esto, como se mencionó previamente, se utilizó una tarjeta con un microcontrolador ESP32 de la familia de Arduino. Este dispositivo tiene una velocidad de muestreo mayor que el Arduino Uno común, lo que lo convierte en una excelente opción para esta aplicación.

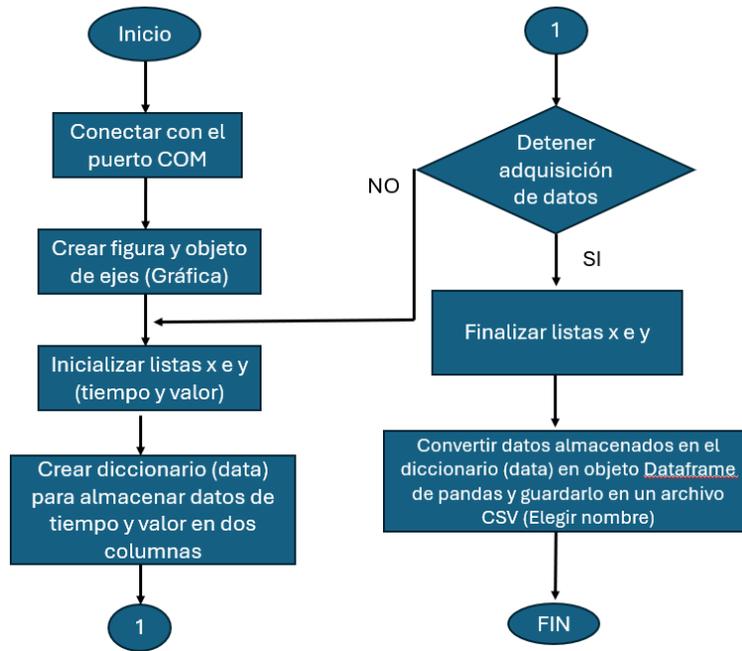
Al microcontrolador se le carga un programa básico para que identifique la información del pin 34, que recibirá la señal acoplada por los filtros del circuito y el preamplificador de bajo ruido SR560. En el programa del Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado, por sus siglas en inglés Integrated Development Environment), se indica que lea el pin 34 y se ajusta la velocidad de transmisión de datos en el puerto serie COM (que se refiere al puerto de comunicación serial), también es ajustado con una cantidad de 115200 baudios, que representa el número de cambio de estado de una señal por segundo.

Es esencial contar con una aplicación que muestre y almacene los datos en tiempo real. Para ello, se utilizó el lenguaje Python. El funcionamiento de la aplicación importa los módulos necesarios: serial, matplotlib.pyplot, pandas y datetime. El módulo serial entabla la comunicación con el puerto COM, el módulo matplotlib.pyplot proporciona la interfaz para graficar los datos obtenidos a través del puerto serie de comunicación, el módulo de pandas se encarga de manipular los datos y asignarles una etiqueta, por último, el módulo date time se encarga de manipular la fecha y hora en el momento en el que se ejecuta el programa escrito en Python.

La biblioteca Matplotlib se encarga de la visualización de los datos. Fue desarrollada por el neurobiólogo John Hunter en 2002 [18], su objetivo era visualizar a las señales eléctricas del cerebro en personas epilépticas, y para lograrlo, quiso replicar las funcionalidades de creación gráfica de MATLAB usando Python, de esta manera se creó esta librería.

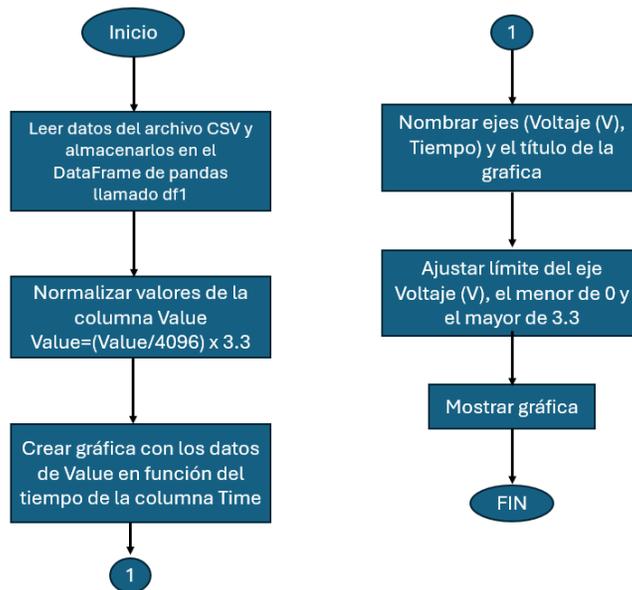
Entonces, se establece la conexión con el dispositivo ESP32 a través del puerto serie para crear una figura y un objeto de ejes para la gráfica. Además, almacena los datos de tiempo y valor en forma de tabla. Entra en un bucle infinito hasta que se detenga la ejecución del programa. Posteriormente, convierte los datos almacenados en el diccionario "data" en un objeto DataFrame, de la biblioteca de pandas, que es una estructura de datos bidimensional, en este caso creando dos listas con sus respectivos nombres, que gráfica y guarda al mismo tiempo en un archivo CSV (Valores Separados por Comas, por sus siglas en inglés Comma Separated Values). De esta manera, al realizar un experimento,

se puede verificar tanto en el osciloscopio como en la computadora si no hay interferencia de ruido o algún error en la adquisición de datos. En la Fig. 3.7 se observa el diagrama de flujo para el primer programa.



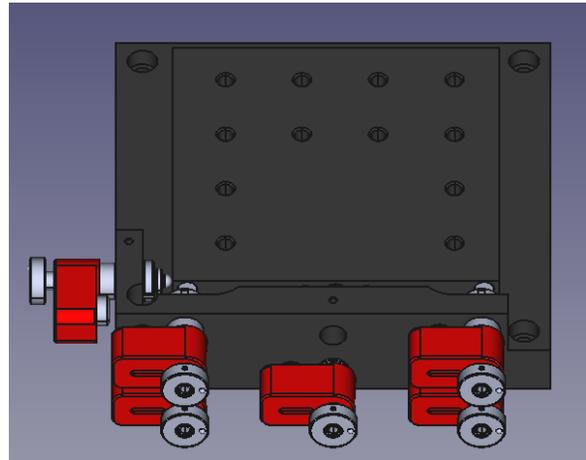
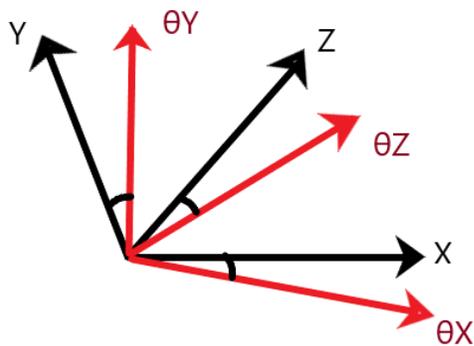
**Figura 3.7.** Diagrama de flujo programa de adquisición de datos y graficar en tiempo real.

Es necesario utilizar otro programa para visualizar la gráfica con los datos obtenidos. Para ello, se diseñó un programa que lee los archivos CSV almacenados. El programa realiza un almacenamiento en un objeto DataFrame de pandas y normaliza la columna "value". Los datos se dividen por 4096 y posteriormente se multiplican por 3.3. Este proceso se lleva a cabo para convertir los valores de voltaje de la escala de 12 bits del dispositivo de adquisición de datos ESP32 a la escala de voltaje real. Finalmente, se grafican los datos de "value" contra los datos del tiempo real y se muestran en una ventana emergente. En la Fig. 3.8 se observa el diagrama de flujo del segundo programa, para visualizar los datos obtenidos del primer programa.



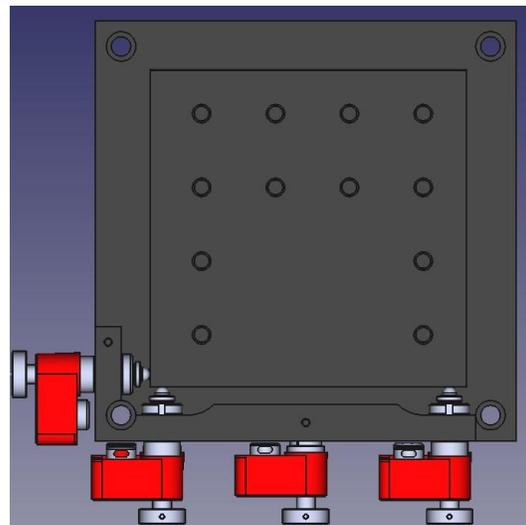
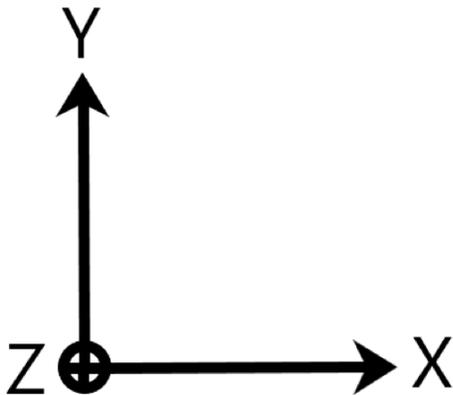
**Figura 3.8.** Diagrama de flujo programa de lectura de archivos CSV.

Para analizar la superficie plana reflejante, es importante aplicar un movimiento a dicha superficie sin provocar vibraciones en la configuración del interferómetro de Michelson. Esta tarea es complicada debido a la naturaleza sensible del interferómetro ya que cualquier vibración mínima puede afectar la experimentación. Para abordar este problema, se empleó una platina motorizada especializada en proporcionar pequeños movimientos imperceptibles para el interferómetro. La platina motorizada utilizada es de la marca Newport, modelo 8095M. Este dispositivo cuenta con seis pico-motores que permiten el movimiento en las direcciones X, Y, Z,  $\theta_y$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_z$ . Cada picomotor realiza un paso con una resolución menor a 30 nanómetros, lo que lo convierte en una herramienta sumamente eficiente para la experimentación. En las figuras 3.9 y 3.10 se representan las seis direcciones en las que se puede desplazar la platina motorizada, el modelo 3D representa a la platina real utilizada en el laboratorio de sensores en fibra óptica del ICAT, el cual fue obtenido de la página oficial del fabricante Newport [19].



**Figura 3.9.** Modelo 3D proporcionado por Newport de la platina motorizada de seis ejes, señalando el movimiento angular de tres ejes.

Con el software proporcionado por el fabricante cada pico motor puede realizar un movimiento a la vez, para la utilidad que se requiere en este trabajo de tesis sólo se hizo uso del movimiento en el eje X, esto significa, que solo se utilizó un pico motor en movimiento normal y en el retroceso de éste.

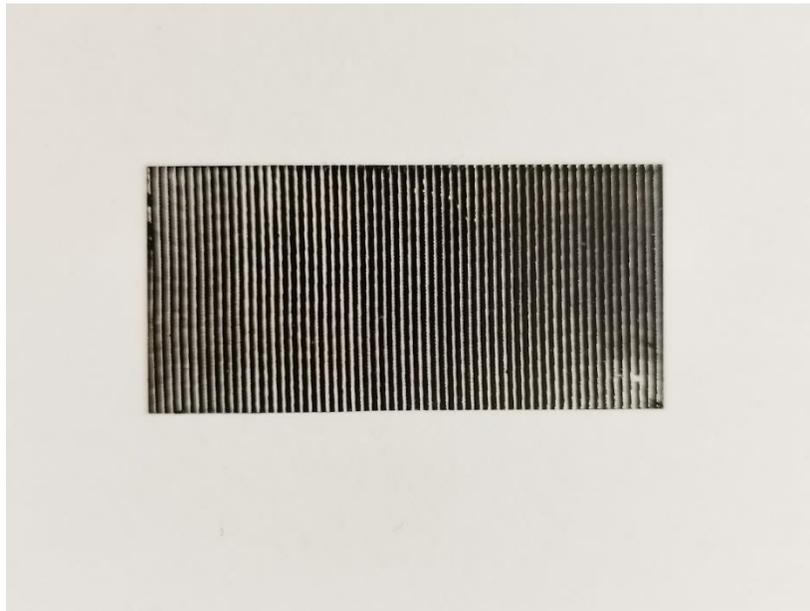


**Figura 3.10.** Modelo 3D proporcionado por Newport de la platina motorizada de seis ejes, señalando el movimiento lineal de los tres ejes.

La platina motorizada simplificó enormemente la tarea, ya que se logró configurar la velocidad, la aceleración y el número de pasos deseados. La platina se conecta a un

controlador de Newport, que cuenta con seis puertos para cada pico motor. A través del software de Newport, se pueden configurar todos los parámetros necesarios.

Para analizar las imperfecciones en el portaobjetos de vidrio con material depositado tipo tóner, fue necesario realizar movimientos de la muestra de forma vertical y horizontal, y para realizar estos movimientos se utilizó la platina motorizada, de acuerdo con la Fig. 3.10 se realizó un movimiento horizontal (visto de frente de izquierda a derecha) y un retroceso de este movimiento, para el desplazamiento vertical se rotó la muestra noventa grados y se realizó el mismo movimiento mencionado anteriormente, al igual que el retroceso. Se eligió trabajar con portaobjetos de vidrio común con material depositado al estilo de rejilla Ronchi, la cual consiste en un dispositivo óptico con material depositado provocando una rejilla de franjas claras y oscuras. Este diseño permite controlar las áreas con imperfecciones y las áreas sin ellas. Es muy importante alinear correctamente la superficie plana reflejante al utilizar la platina motorizada. De lo contrario, en lugar de realizar un movimiento horizontal, se estaría realizando un movimiento angular lo que ocasionaría el paso constante de franjas de interferencia debido a la alteración de la diferencia del camino óptico al alejar la superficie plana reflejante.



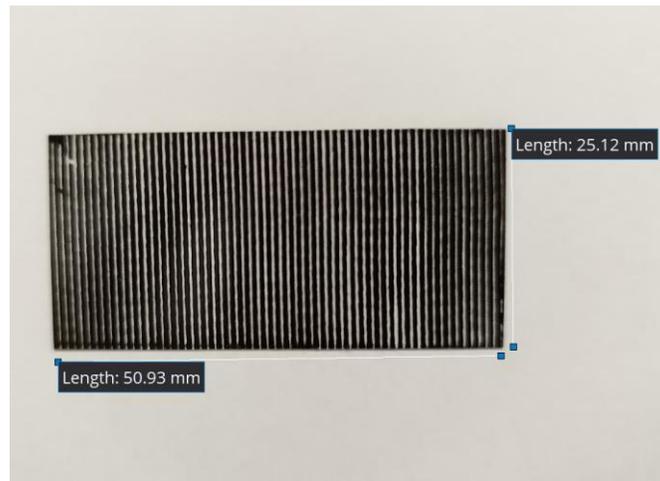
**Figura 3.11.** *Portaobjetos de vidrio con material depositado (tóner).*

El portaobjetos de la Fig. 3.11 presenta un material depositado uniformemente a simple vista. Sin embargo, al aplicar una ampliación de la imagen, se observa que el material depositado no está distribuido uniformemente. La expectativa es que el dispositivo-sensor sea capaz de detectar estas imperfecciones que son imperceptibles para el ojo humano y para ello, se realiza un barrido en un sentido y luego se retrocede en ese mismo barrido,

es decir, en el punto donde termina el primer barrido comienza el segundo, pero en sentido contrario. Se lleva a cabo un barrido horizontal y posteriormente se realiza un barrido vertical, observando la diferencia entre ambos.

Con las imperfecciones controladas, se procede a unir dichos portaobjetos a la superficie plana reflejante para que ahora formen parte de esta última. Como superficie plana reflejante, se utilizó un espejo comúnmente empleado en aplicaciones ópticas.

Con el fin de tener una referencia, se empleó el software IC Measure versión 3.0 para analizar la distancia de separación de cada línea en el portaobjetos con material depositado al estilo de rejilla Ronchi, el software es desarrollado por Imaging Source y está especialmente enfocado en mediciones de longitudes, ángulos, círculos y polígonos en una imagen, esto lo hace mediante un análisis de la resolución de la imagen que se adjunte al programa y con una referencia de valor de longitud real para poder calibrar el programa, en este caso la medición real que se conoce fue las dimensiones del portaobjetos. La imagen se calibró con las medidas reales del portaobjetos con material depositado, que tiene dimensiones de 50 mm de ancho por 25 mm de alto. Observar Fig. 3.12.

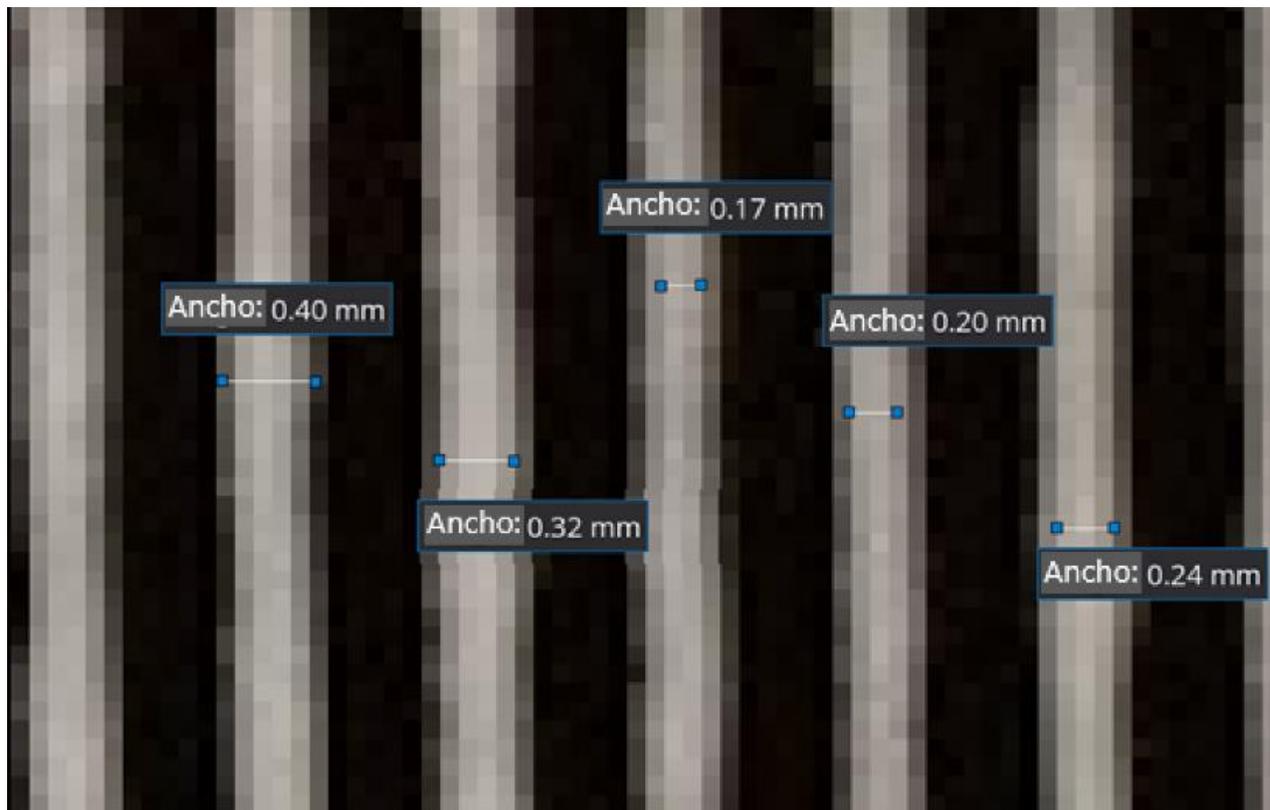


**Figura 3.12.** Medidas reales del portaobjetos de vidrio con material depositado usando el software IC Measure.

Entonces, con ayuda del software se aplicó una amplificación de la imagen hasta distinguir los píxeles donde se observan las diferencias en el material depositado. En algunas partes, hay más material depositado que en otras a pesar de que la imagen esta amplificada, la resolución es bastante limitada ya que al realizar un acercamiento mayor no se puede distinguir una imagen clara. Los colores más claros representan la ausencia de material, mientras que, a medida que se oscurecen, se indica un aumento en el material depositado. Según el análisis de la Fig. 3.13, se aprecia una diferencia en la longitud de las imperfecciones, lo que indica que son desiguales debido a la naturaleza de la fabricación

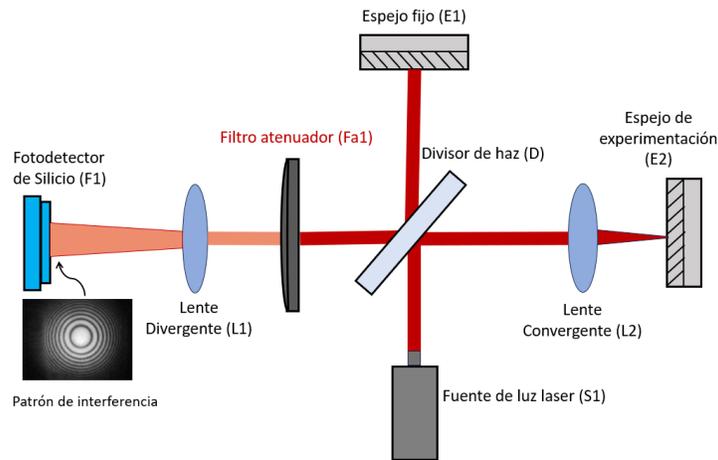
del portaobjetos con material depositado al estilo de una rejilla Ronchi. Es poco probable que el material depositado sea uniforme entre unas y otras áreas.

Este análisis es muy importante, ya que se espera que el dispositivo-sensor pueda diferenciar la longitud entre el material depositado y la ausencia de material. Es importante destacar que la longitud exacta y la precisión del análisis con el software IC Measure no se pueden conocer con certeza solo a través de la fotografía, por lo que el software es bastante limitado para esta aplicación, sin embargo sirve como referencia. Por lo tanto, con el interferómetro, se espera visualizar y distinguir si las líneas de material depositado son realmente uniformes.

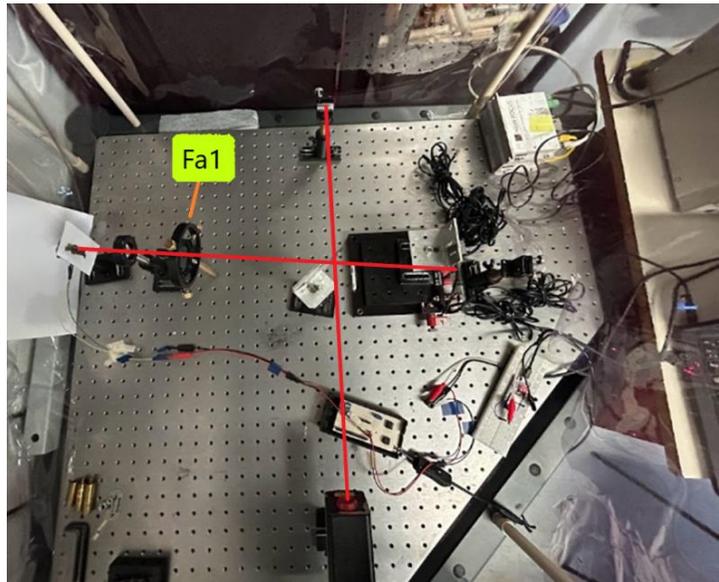


**Figura 3.13.** *Diversas distancias entre cada barra de material depositado y la ausencia de este.*

Con todo lo mencionado anteriormente, se ha completado la configuración del dispositivo-sensor, integrando la parte óptica, electrónica y de programación. Una vez terminada la configuración se pueden realizar los experimentos con la superficie plana reflejante que presenta material depositado. En la Fig. 3.15 se muestra una fotografía de la configuración completa del dispositivo, que incluye el interferómetro de Michelson, el circuito de adquisición de datos, la conexión del circuito con el preamplificador de bajo ruido SR560, y finalmente la adquisición de datos a través de la tarjeta ESP32, junto con el programa en Python cargado en la misma tarjeta ESP32.



**Figura 3.14.** Esquema del dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson.

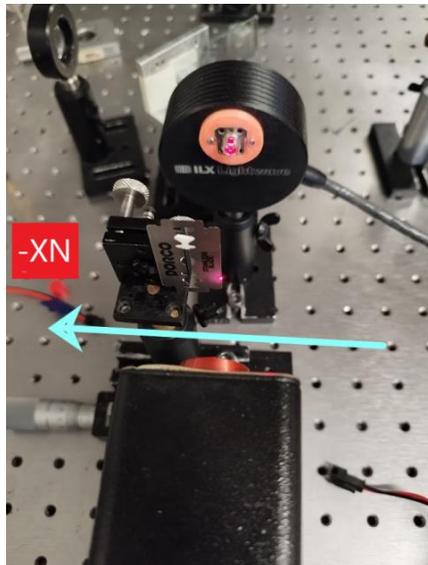


**Figura 3.15.** Dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson (las líneas rojas representan la trayectoria del haz láser).

La intensidad óptica del láser genera un voltaje proporcional a dicha intensidad. Es importante recordar que el dispositivo de adquisición de datos es un ESP32, y su límite de voltaje de entrada es 3.3V. Si recibe un voltaje mayor, no se daña el dispositivo, pero la señal no será apreciable, ya que se satura a 3.3V. Por lo tanto, es necesario reducir la intensidad de alguna manera, para apreciar correctamente el comportamiento de la señal, por lo que se optó por disminuir la potencia óptica del láser de forma natural mediante un filtro, denominado *Fa1* en la Fig. 3.14, ubicado justo antes del lente divergente que amplía el haz láser para una detección adecuada en el área sensible del fotodetector de silicio.

Además, es importante mencionar que en algunos barridos se añade un lente convergente (L2) para disminuir el diámetro de la cintura del haz láser. Observar Fig. 3.14.

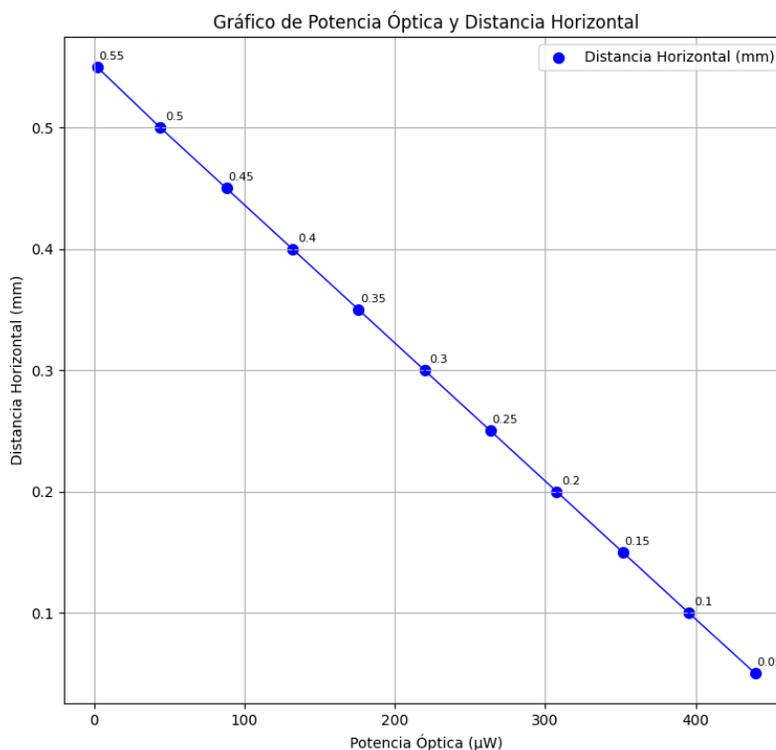
El patrón de interferencia percibido por el área sensible del fotodetector debe ser de tamaño adecuado. Si el fotodetector captura todo el patrón de interferencia, no podrá distinguir entre la ausencia de luz y la presencia de luz, generando una señal constante. Para solucionar esto, se implementó la "técnica de la navaja", restringiendo al fotodetector detectar solo una parte del patrón de interferencia, donde haya luz y ausencia de luz cuando se produce un cambio. Esto permite obtener una señal clara, como se muestra en la Fig. 3.16 en la que se observa el tipo de desplazamiento usado para determinar el diámetro del haz láser.



**Figura 3.16.** Fotografía del procedimiento utilizado para medir la potencia óptica mientras se va descubriendo el área sensitiva del fotodetector utilizando la navaja.

La técnica de la navaja no solo evita la generación de ruido no deseado, sino que también se empleó para determinar el diámetro del haz láser. Aunque se disponía del diámetro específico según la hoja de datos del láser, se confirmó experimentalmente. Se aplicó un desplazamiento horizontal hacia  $-X_N$  observar la Fig. 3.16, que visto de frente es un desplazamiento de derecha a izquierda, y utilizando un multímetro óptico y un fotodetector calibrado se realizó la medición. Se ajustó la platina de precisión mientras se desplazaba la navaja revelando la parte sensible del fotodetector del multímetro óptico y observando el aumento de la potencia óptica. La delgadez de la navaja permite obtener una gráfica casi lineal, sin embargo no es así, en la gráfica se aprecia una línea horizontal debido a la escala, pero hay diferencias en el resultado de la potencia óptica. Se demuestra la

eficiencia de la navaja con la que cubre el área sensible del fotodetector y proporcionando una estimación del diámetro del ancho de cintura del haz láser de manera experimental.

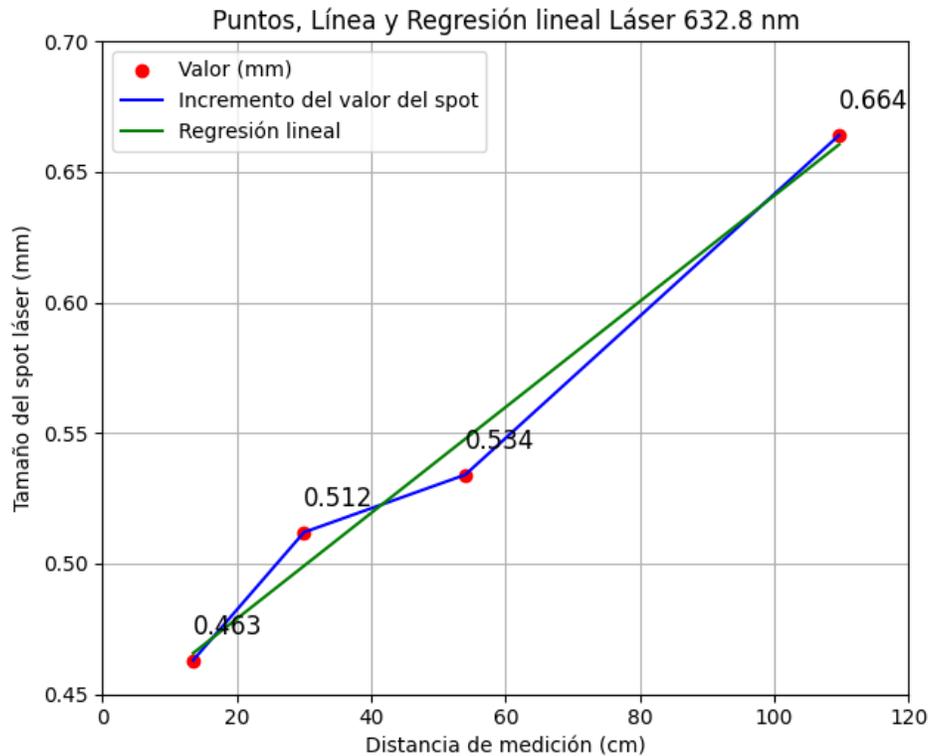


**Figura 3.17.** Grafica del aumento de la potencia óptica conforme se va descubriendo con la navaja la parte sensitiva del fotodetector del multímetro óptico.

Con la técnica de la navaja, se logró obtener un tamaño aproximado del tamaño de la cintura del haz láser, la Fig. 3.17 muestra el resultado de las diferentes distancias de la medición. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el tamaño del haz láser varía según la distancia a la que se encuentra. En este experimento de tesis, la distancia entre el láser He-Ne Melles Griot y el espejo (E1) es de 110 cm, una distancia considerable. Para medir imperfecciones en escalas comparables con micras, es esencial comprender cómo converge el haz láser a esa distancia. Por lo tanto, se llevó a cabo otro experimento, repitiendo la medición de la cintura del haz láser con la técnica de la navaja a diversas distancias. Esto implica que tanto el detector como la navaja se desplazaron a diferentes distancias para determinar el tamaño de la cintura del haz láser a esas distancias específicas de la fuente de luz monocromática. Se repitió el experimento tres veces para obtener un promedio preciso de dicha medición. Las distancias seleccionadas fueron 13.5 cm, 30 cm, 54 cm y 109.66 cm, como se muestra en la Fig. 3.18.

La regresión lineal, un modelo estadístico, ilustra la relación entre un valor dependiente y uno independiente. En este contexto, se empleó para describir el comportamiento de

diferentes valores con una tendencia común, específicamente el aumento del tamaño del ancho de cintura del haz láser a medida que se aleja el fotodetector y la navaja.



**Figura 3.18.** Cuatro promedios de las distintas distancias del tamaño del haz láser con la técnica de la navaja y la regresión lineal.

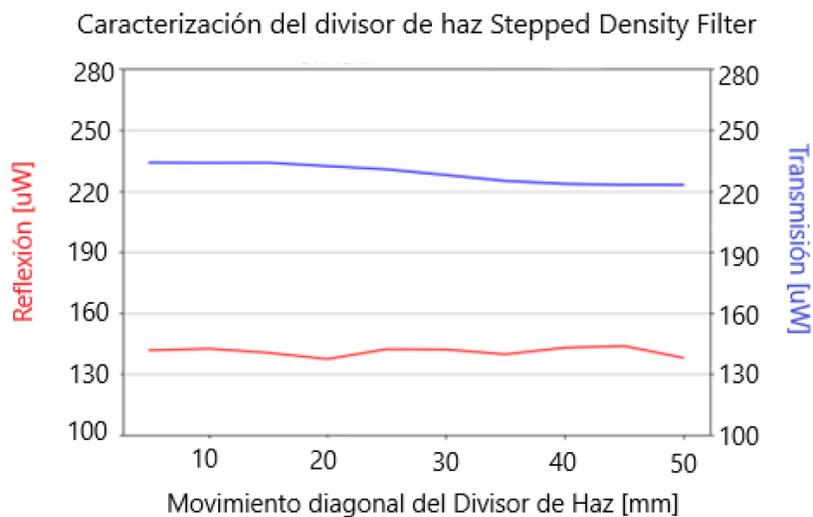
### 3.1. Potencia óptica de reflexión y transmisión.

Se realizó una caracterización del divisor de haz utilizado en la configuración del interferómetro de Michelson. El objetivo de esta caracterización fue medir la potencia óptica en la reflexión y la transmisión de este dispositivo mediante el uso de un multímetro óptico. La intención era comparar estas mediciones para determinar si hay alguna variación significativa entre la reflexión y la transmisión, lo que proporcionaría una comprensión completa de todos los dispositivos relevantes utilizados en este trabajo de tesis.

Para llevar a cabo esta caracterización, se desplazó horizontalmente el divisor de haz utilizando una platina micrométrica mientras el haz láser permanece inmóvil e incide sobre diversas áreas conforme se desplaza el divisor de haz. Visualmente, este desplazamiento

es equivalente a un movimiento de izquierda a derecha visto de frente al divisor de haz, mientras que el láser He-Ne permanecía en una posición fija incidiendo. En otras palabras, se aplicó un barrido al divisor de haz desde la izquierda hacia la derecha. La posición del fotodetector del multímetro óptico cambió para medir la transmisión y reflexión respectivamente. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 3.19.

Al realizar el desplazamiento, se observó que la reflexión se mantuvo constante en toda el área del divisor de haz, mientras que la transmisión disminuía a medida que el divisor de haz se desplazaba incrementalmente. Este desplazamiento se realizó de manera gradual y los datos se adquirieron en tiempo real. Es evidente que la potencia óptica en la reflexión es considerablemente menor que en la transmisión.

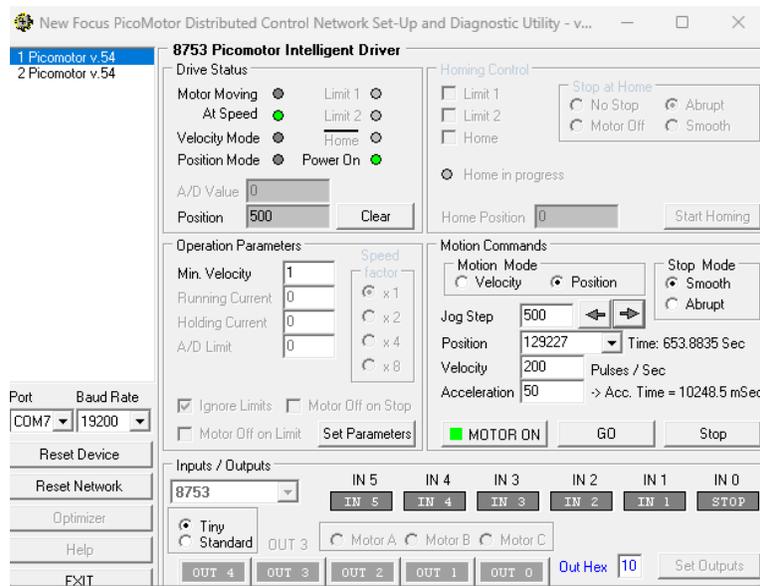


**Figura 3.19.** Potencia óptica de la transmisión y reflexión del divisor de haz.

Por último, se debe analizar el movimiento aplicado a los distintos componentes del dispositivo-sensor. Se optó por caracterizar la distancia recorrida por la platina Newport (8095M). A pesar de que la hoja de datos establece que cada paso de los pico-motores que componen esta platina es menor a 30 nm, no hay certeza de que esta condición se mantenga para la platina utilizada, ya que varios factores pueden influir en ello. Por lo tanto, se procedió a caracterizar los movimientos de la platina motorizada mediante el interferómetro de Michelson.

En este análisis, se utilizó un solo motor responsable de los movimientos en el eje horizontal, como se mencionó en párrafos anteriores, una de las formas de alterar la diferencia del camino óptico en el interferómetro de Michelson es modificar el tamaño de

uno de los brazos, ya sea haciéndolo más pequeño o grande. En este caso, se eligió colocar la platina perpendicular al haz láser para que la platina pudiera alejar el espejo movable (E2). Se utilizó el programa diseñado para obtener el número de franjas transcurridas en cierta cantidad de pasos de la platina motorizada. La configuración del software de fábrica de la platina motorizada se visualiza de la siguiente manera:



**Figura 3.20.** Software New Focus PicoMotor en donde se puede aplicar la configuración más apropiada a la platina motorizada.

Es posible configurar varios parámetros para cada uno de los pico-motores que integran la platina, Fig. 3.20. Se establece la conexión a través del puerto COM y, mediante el controlador designado para cada pico motor, se envía la señal para el movimiento correspondiente. No se recomienda mover dos pico-motores simultáneamente debido a la corriente que soporta el controlador, se puede ocasionar un daño.

Para la caracterización de la platina, se aplicó una cantidad específica de pasos en un sentido y la misma cantidad al regresar del motor, como se muestra en la Tabla 1. Posteriormente para medir el retroceso se aplicó la misma cantidad de pasos, pero en el sentido opuesto, los resultados se pueden observar en la Tabla 1.2.

**Tabla 1. Diferentes repeticiones de tres diferentes distancias aplicados al pico motor de la platina motorizada en X.**

Numero de pasos	500	1000	1500
Primer desplazamiento	33	58	88
Segundo desplazamiento	28	62	90
Tercer desplazamiento	34	63	89
Cuarto desplazamiento	35	59	93
Quinto desplazamiento	33	64	92
Promedio de numero de franjas transcurridas	32	61	90

**Tabla 1.2. Diferentes repeticiones de tres diferentes distancias aplicados al pico motor de la platina motorizada -X.**

Numero de pasos	500	1000	1500
Primer desplazamiento	22	53	81
Segundo desplazamiento	24	55	80
Tercer desplazamiento	22	51	82
Cuarto desplazamiento	25	53	79
Quinto desplazamiento	23	55	83
Promedio de numero de franjas transcurridas	23	53	81

Usando la Ecuación 19:

$$d_{nf} = \frac{(633 \times 10^{-9})(23.2)}{2} = 7.3208 \mu m \quad (50)$$

De esta manera se calculó la tabla 1.3:

**Tabla 1.3.** Promedio de la distancia recorrida en un numero de pasos en la platina micrométrica.

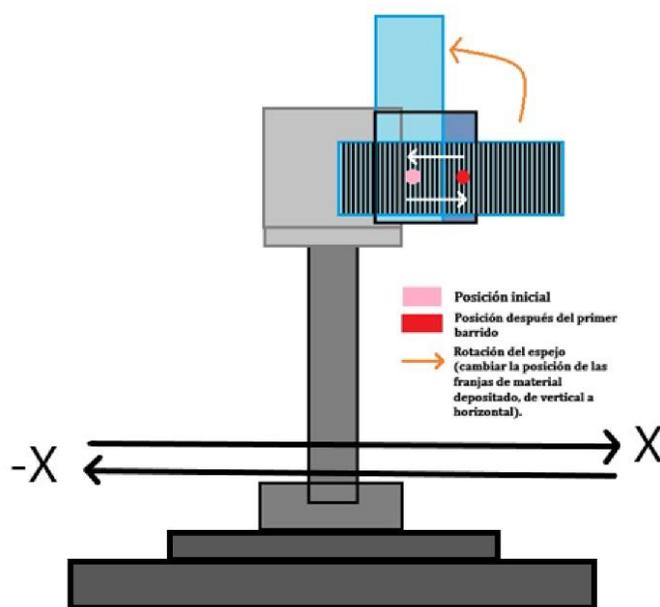
Numero de pasos	Distancia de motor girando en X	Distancia de motor girando en -X
500	10.2909 $\mu m$	7.3208 $\mu m$
1000	19.4088 $\mu m$	16.9091 $\mu m$
1500	28.6176 $\mu m$	25.6365 $\mu m$

Como se observa, la misma cantidad de pasos en diferentes sentidos con el mismo pico motor y en las mismas condiciones muestra un comportamiento diferente en el retroceso en comparación con el giro "común". Esta diferencia es constante, ya que con el aumento de los pasos no hay una variación significativa, más bien es una diferencia constante. Es importante tener en cuenta que en los resultados se realizaron mediciones de 2 milímetros, que corresponden a la misma cantidad de pasos aplicados a la platina motorizada para llevar a cabo las mediciones de los experimentos, por lo que es posible que para la gráfica en el sentido opuesto se puedan observar diferencias comparadas con la gráfica de giro común, lo cual será interesante analizar.

Si se divide la distancia de desplazamiento al girar el motor entre el número de pasos, se puede obtener un valor aproximado de cada paso del pico motor. Recordando que el manual del fabricante mencionaba que cada paso era menor que 30 nanómetros. Con los cálculos experimentales, se obtiene que es aproximadamente de 20 nanómetros cuando el motor gira en sentido positivo, mientras que, cuando gira en sentido contrario, es de aproximadamente 14 nanómetros por cada paso. Para los experimentos, se utilizó una cantidad de pasos de 136,602 pasos por medición, lo cual es equivalente a 2 milímetros.

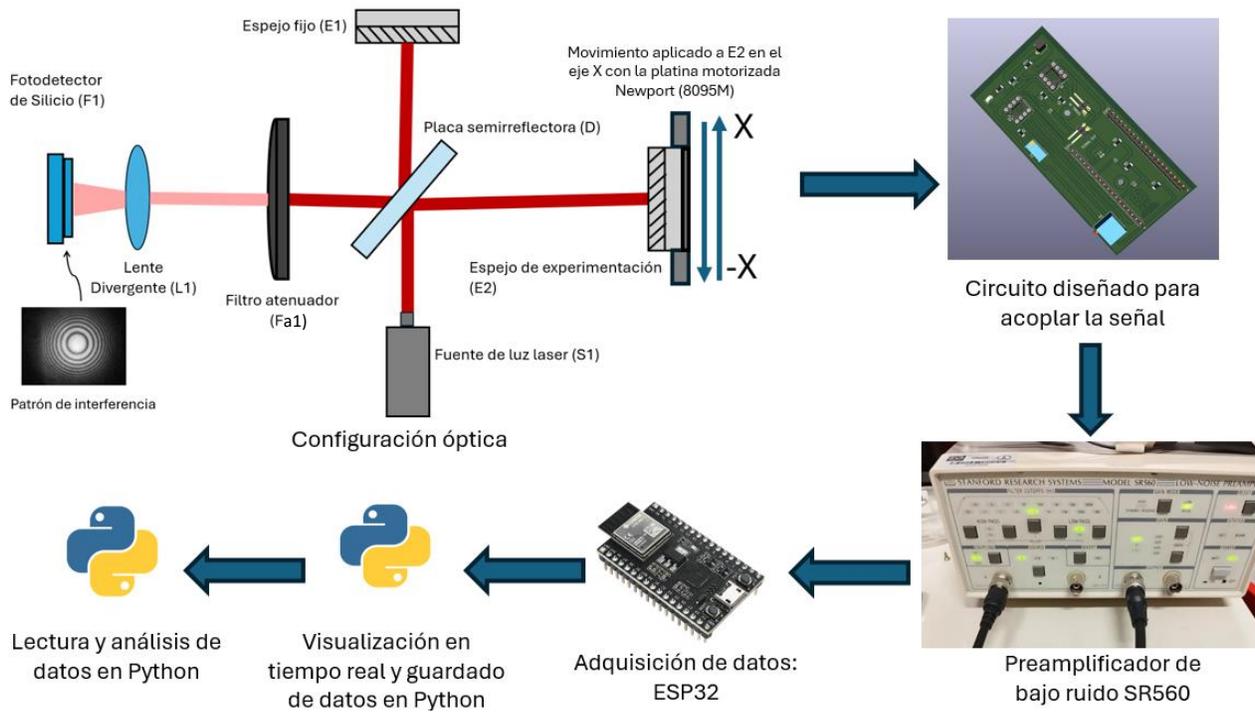
#### IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como se ha mencionado previamente, se realizaron barridos sobre imperfecciones controladas en una superficie plana reflejante, siguiendo el estilo de una rejilla Ronchi, que consiste en un portaobjetos con material depositado (tinta). Se llevaron a cabo diversos barridos, visualizando la rejilla Ronchi de frente, se aplicó un desplazamiento de izquierda a derecha y de derecha a izquierda en la misma área, se rotó la muestra noventa grados y se realizó otro barrido de abajo hacia arriba con su respectivo retorno, es decir, de arriba hacia abajo, utilizando la platina del fabricante Newport modelo 8095M, cuyos picomotores dan pasos menores a 30 nanómetros [19]. La muestra para analizar se colocó sobre la platina motorizada en una pieza diseñada en aluminio con la única función de sostener el espejo y el portaobjetos de vidrio tipo soda lime, y se situó en un soporte para espejo, como se observa en la Fig. 4.

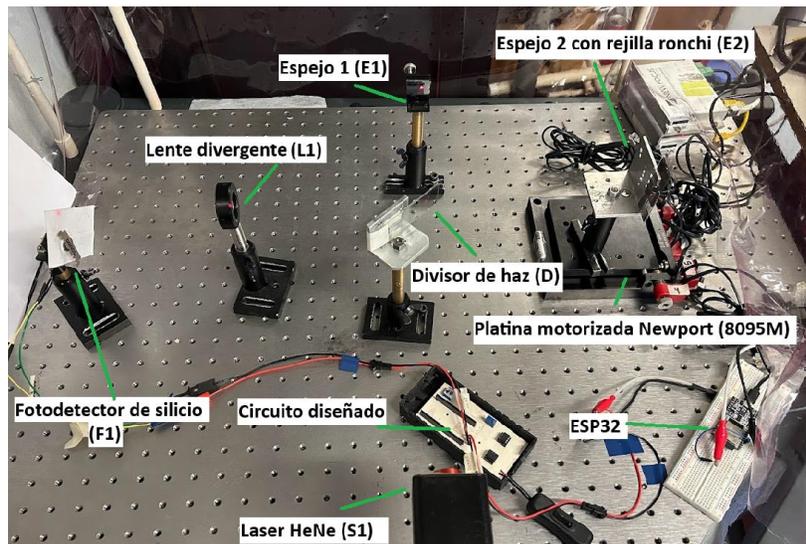


**Figura 4.** Representación de la metodología del barrido, y del cambio de posición de las franjas de material depositado.

De acuerdo con la Fig. 4, se aprecia la posición inicial del haz láser y, posteriormente, se muestra la representación al final del primer barrido. El segundo barrido comienza inmediatamente después de que finaliza el primero, es decir, regresa a la posición inicial. Cabe recordar que el haz láser permanece estático, y es todo lo que compone el espejo sobre la platina New Focus (8095M) lo que se desplaza. La Fig. 4.1 muestra el esquema completo del dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson omitiendo el lente convergente.



**Figura 4.1.** Esquema del dispositivo-Sensor basado en el interferómetro de Michelson para medir imperfecciones en superficies planas reflejantes.



**Figura 4.2.** Dispositivo-Sensor basado en el interferómetro de Michelson para medir imperfecciones en superficies planas reflejantes.

La Fig. 4.2 muestra el dispositivo-sensor en la mesa óptica del laboratorio de sensores en fibra óptica del ICAT. Al agregar un lente adicional entre el divisor de haz (D) y el espejo

donde se coloca la muestra (E2), se emplea un lente convergente (L2) con una distancia focal corta para minimizar el tamaño del diámetro de cintura del haz láser. Con la incorporación del lente convexo, el tamaño del diámetro de cintura del haz se vuelve más pequeño que el material depositado en el espejo. Cuando el haz láser no tiene ningún elemento adicional, tiene un tamaño original de 0.49 mm según el fabricante ó 0.46 mm según la medición realizada con la técnica de la navaja. A una distancia de 110 cm al espejo (E1), el tamaño es de 0.64 mm. En este contexto, el material depositado no indica una ausencia de luz, sino una atenuación de la intensidad luminosa, junto con la detección de alteraciones en el camino óptico debido a diversas imperfecciones de diferentes tamaños. La Ec. 51 determina el tamaño del ancho de cintura del haz láser después de pasar por un lente convexo de una distancia focal de 20 milímetros [20]:

$$d_{lc} = \frac{(2\lambda_{lc})f_{lc}}{D_{lc}} \quad (51)$$

Donde:

$d_{lc}$  = Es el diámetro del ancho de cintura del haz láser en el plano focal.

$\lambda_{lc}$  = Es la longitud de onda de la fuente de luz incidente.

$f_{lc}$  = Es la distancia focal de la lente.

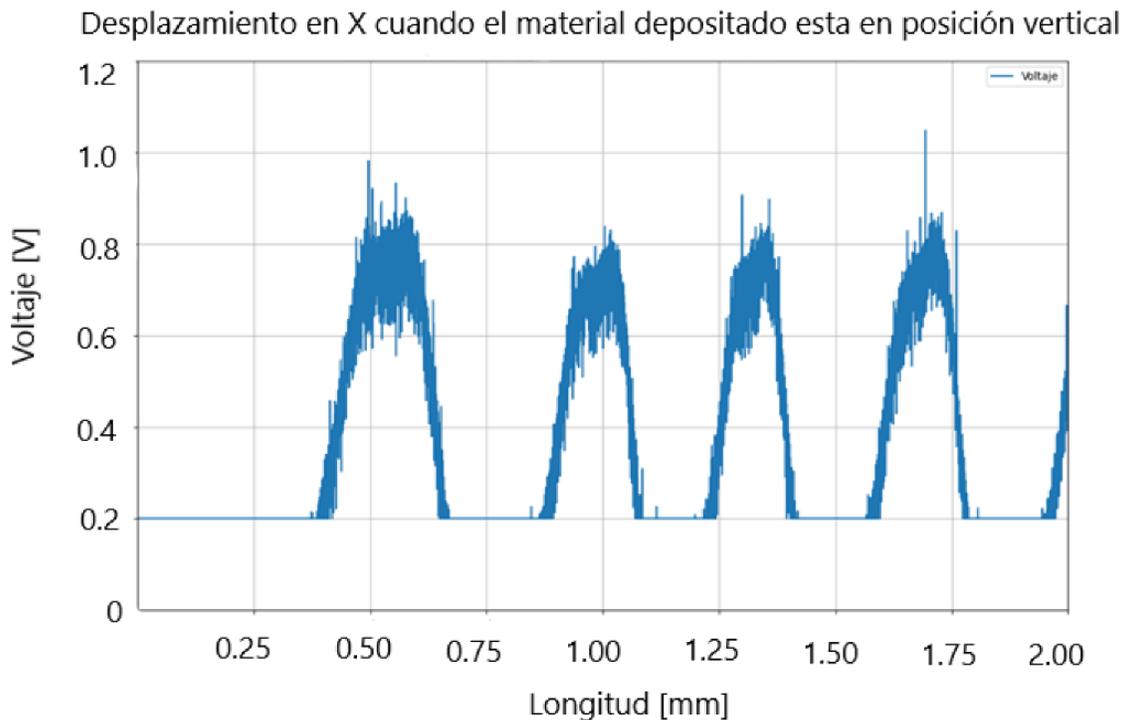
$D_{lc}$  = Diámetro del haz incidente

Sustituyendo los valores:

$$d_{lc} = \frac{(2 \cdot (633 \times 10^{-9} \text{ m})(0.02 \text{ m}))}{0.00064 \text{ m}} = 0.0000395 \text{ m} \quad (52)$$

Con el resultado de 39.5 micrómetros se sabe que el diámetro del haz láser se redujo aproximadamente 16 veces, ya que es un factor importante que considerar para analizar los resultados obtenidos.

Para obtener los resultados, se llevaron a cabo diversos barridos. El primer barrido, se realizó visto desde el frente, un desplazamiento hacia la derecha, con el material depositado en posición vertical, es decir, las barras paralelas de material depositado en la superficie plana reflejante (E2) son verticales.

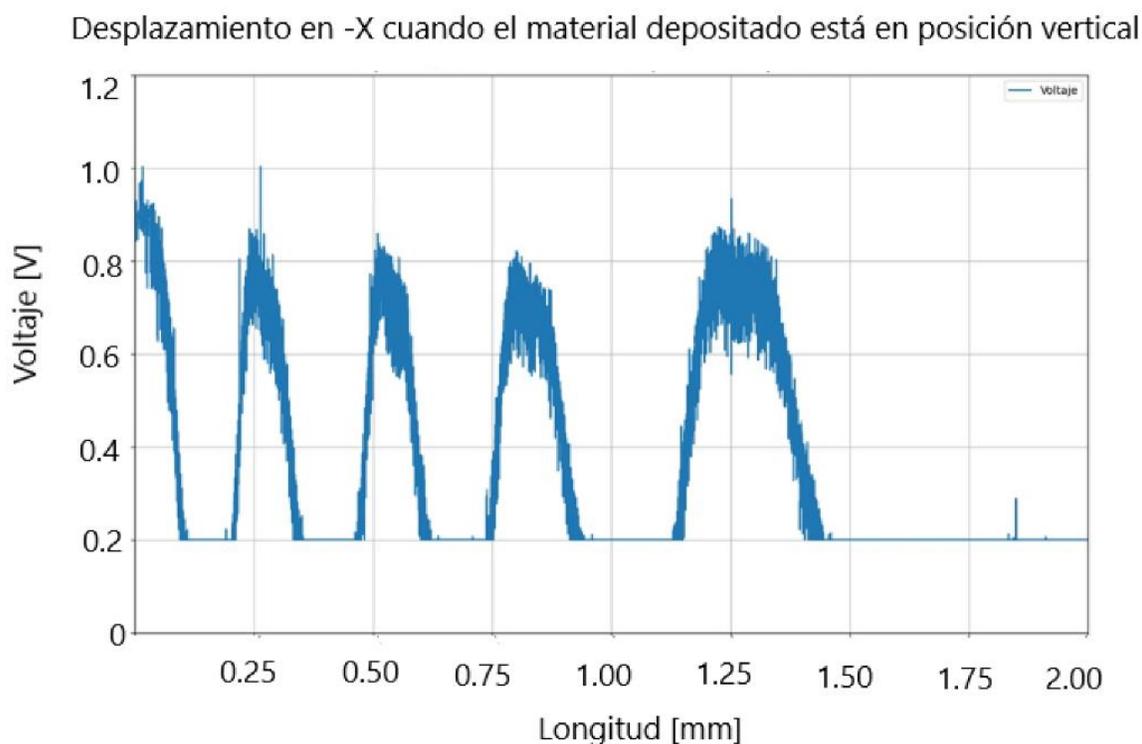


**Figura 4.3.** Desplazamiento de 2 milímetros en X con el lente convexo insertado mientras el material depositado está en disposición vertical.

Es interesante analizar el comportamiento de la medición en la Fig. 4.3, ya que en un desplazamiento de 2 mm se observan una serie de pulsos de voltaje. Los máximos de la señal aparecen de manera espontánea y no son iguales. La gráfica está escalada a 1.2V en el eje vertical de voltaje, para apreciar mejor los resultados, mientras que en el eje horizontal se representa la longitud recorrida por el haz láser. El diámetro de la cintura del haz láser es más pequeño que el material depositado en el vidrio unido al espejo, debido a que está colocado el lente convexo (L2), por lo que el comportamiento tiene tendencia a ser repetitivo siempre y cuando haya franjas de material depositado durante el barrido, esto es debido a que el barrido paso por cuatro franjas de material depositado y se observan cuatro pulsos.

La gráfica comienza con un mínimo de la señal limitada a 0.2V, y esto se debe a que la intensidad del haz láser reflejado en el espejo (E2) está completamente cubierto por el material depositado, es decir, esta sobre una franja de material depositado, la intensidad del otro brazo es la que se logra apreciar como una señal de voltaje constante. Algunos pulsos son más extensos, mientras que otros tienen una longitud más corta, por lo tanto, cuando el haz láser es cubierto por el material depositado, no se presenta el fenómeno de interferencia ya que ese brazo del interferómetro no está reflejando el haz láser y solo es una señal constante de voltaje limitada a 0.2V.

Este comportamiento permite distinguir claramente entre las áreas con material depositado y las áreas sin él. Se logra una clara diferenciación cuando se realiza un barrido en la superficie del vidrio soda lime cuando está libre de material y cuando hay material depositado, de acuerdo a la medición realizada por el software IC Measure, cuatro líneas de material depositado y cinco líneas de ausencia de material es un valor cercano a dos milímetros, por lo que la medición es correcta, es importante mencionar que la cantidad de franjas de material es diferente en cada barrido, ya que no son uniformes en toda el área del vidrio soda lime, sin embargo los barridos de ida y retroceso en la misma área deben ser similares. En la cresta de la señal hay un paso de franjas de interferencia ocasionadas por una alteración en el camino óptico, provocado por imperfecciones o deformaciones en la superficie del vidrio soda lime, esas imperfecciones no son visibles, sin embargo, el dispositivo-sensor es capaz de detectarlo.



**Figura 4.4.** Desplazamiento de 2 milímetros en  $-X$  con el lente convexo insertado mientras el material depositado está en disposición vertical.

El comportamiento de la Fig. 4.4, es muy similar al de la primera gráfica, ya que al observar la Fig. 4.3, los valles y crestas son muy parecidos, pero en el lado opuesto. El inicio de la Fig. 4.4 comienza desde un medio pulso y posteriormente se visualizan cuatro pulsos completos. Al comparar ambas figuras, se percibe una notable similitud, lo cual es coherente dado que las mediciones se realizaron en la misma área, debido a que fue un

barrido completo es decir de ida y retroceso, sin embargo, la principal diferencia es causada por la platina micrométrica Newport (8095M), ya que como se mencionó anteriormente el desplazamiento de la platina es diferente cuando se aplica un retroceso, sin embargo, es clara la similitud entre ambos resultados. Además, el hecho de que ambas gráficas terminen o inicien en el rango de 0.2 V añade consistencia a la secuencia observada. A pesar de la aplicación de varios filtros, la presencia de ruido menor es visible en ambas gráficas; sin embargo, este ruido no afecta la medición para el análisis de este trabajo y es mínimamente apreciable.

Para analizar la señal que se está midiendo es importante conocer la relación señal-ruido SNR (Relación Señal Ruido, por sus siglas en inglés Signal to Noise Ratio). Esta relación se mide realizando la comparación entre la potencia de la señal original con la potencia de la señal de ruido presente, posteriormente se obtiene la relación señal-ruido en decibelios (dB), observar Ec. 53 [21].

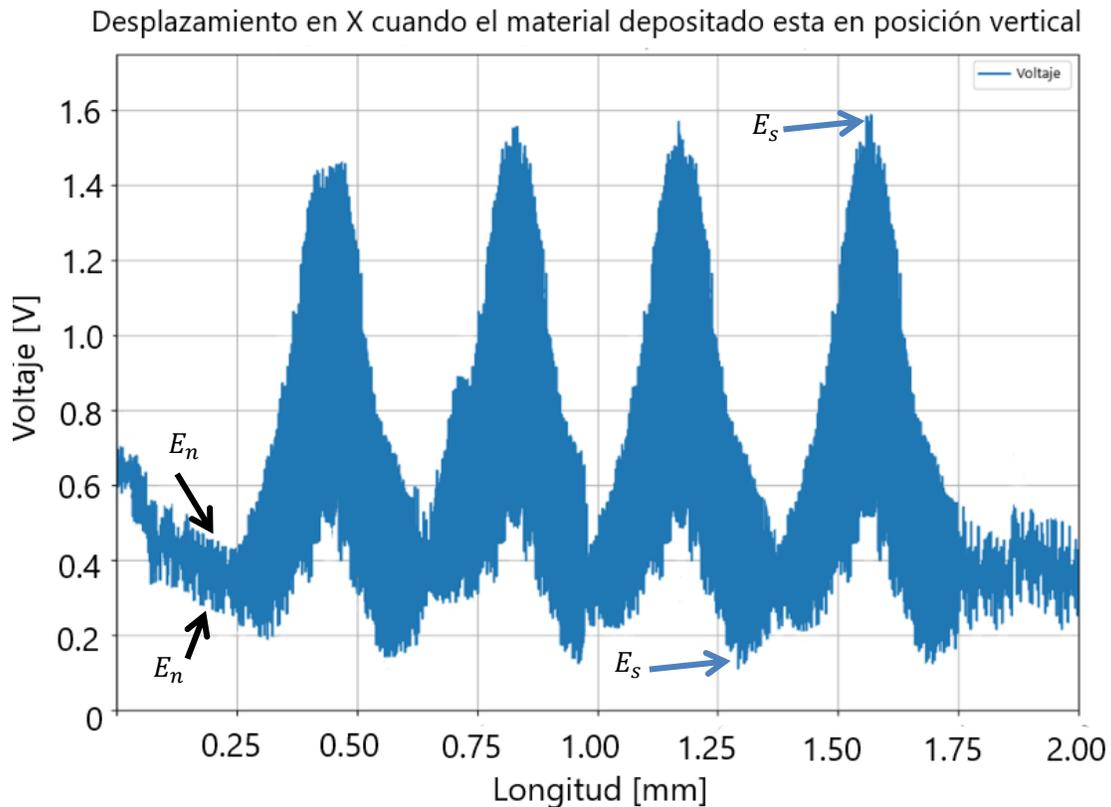
$$SNR = 20 \log \left( \frac{E_s}{E_n} \right) (dB) \quad (53)$$

Para obtener el valor de la señal ( $E_s$ ) y del ruido presente en dicha señal ( $E_n$ ) es necesario elevar al cuadrado la diferencia entre el valor mínimo y máximo de las respectivas señales y dividirlos a la mitad, esto para obtener el promedio de toda la señal y no solo del valor pico-pico, como se muestra en las Ec. 54 y Ec. 55 [21].

$$E_s = \frac{(V_{\max s} - V_{\min s})^2}{2} \quad (54)$$

$$E_n = \frac{(V_{\max n} - V_{\min n})^2}{2} \quad (55)$$

En el primer barrido los pulsos son evidentes y la presencia de ruido es mínima, por lo que la relación señal-ruido será calculada en el segundo y tercer barrido.



**Figura 4.5.** Desplazamiento de dos milímetros en X mientras el material depositado está en disposición vertical.

Cuando el diámetro del haz láser no es menor que el área del material depositado, es decir cuando el lente convergente (L2) no está colocado, se observa un patrón similar de aumento en la intensidad del voltaje y la disminución de este, observar Fig. 4.5. Este comportamiento es causado por el material depositado, ya que, al cubrir un porcentaje del diámetro del haz láser, provoca una disminución en la potencia óptica del haz láser. Cuando el diámetro del haz láser es mayor que una o más franjas material depositado en forma de rejilla Ronchi, la disminución de potencia óptica es ocasionada por estar pasando por dos líneas de material depositado, lo que provoca el mínimo de intensidad. Es decir, el diámetro del haz láser es lo suficientemente grande, que puede ser cubierto por dos líneas de material depositado debido a su tamaño, entonces, el fotodetector percibe franjas de interferencia, pero con una intensidad de voltaje más bajo.

El paso de pulsos es constante y comparándolo con el primer barrido tiene un comportamiento similar, sin embargo, siempre se observa un paso de franjas de interferencia, además de un aumento y disminución en la intensidad del voltaje, lo que permite observar las imperfecciones de manera clara. Debido a la escala, no es posible apreciar las franjas de interferencia por separado sin hacer un acercamiento a la gráfica.

Es importante recordar la técnica de la navaja, ya que ocurre un efecto similar: al cubrir constantemente una parte del diámetro del haz láser, la intensidad va disminuyendo. En este caso, sucede algo similar con el material depositado cubriendo la reflexión del haz láser sobre el espejo. Al registrar dos franjas de material depositado, esa zona no se refleja y, entonces se aprecia una cantidad reducida de reflexión. Sin embargo, cuando solo está cubierto por una franja de material depositado, hay un aumento en el voltaje. Los valles y crestas de la señal parecen ser similares, además por la cantidad de franjas de interferencia transcurridas es evidente que hay numerosas imperfecciones, en toda el área del vidrio soda lime.

Calculando la relación señal-ruido de la señal graficada en la Fig. 4.5 se obtiene lo siguiente:

$$E_s = \frac{(1.57V - 0.18V)^2}{2} = 0.9660V \quad (56)$$

$$E_n = \frac{(0.5V - 0.35V)^2}{2} = 0.0112V \quad (57)$$

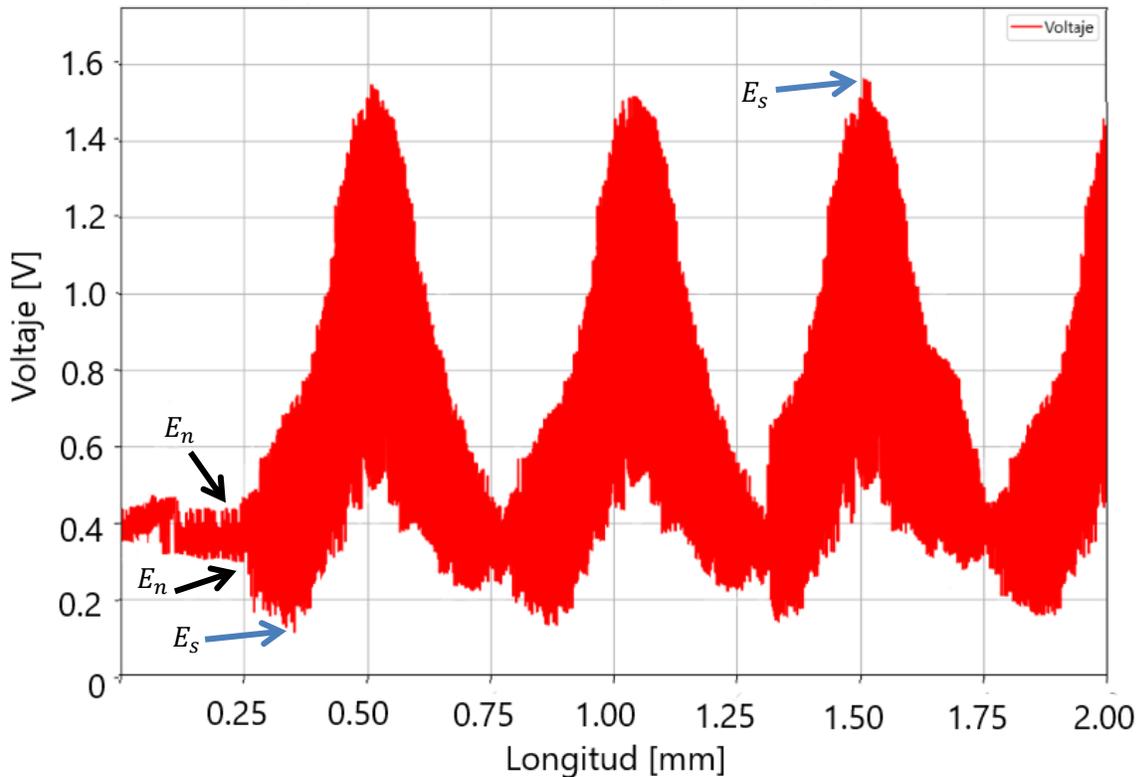
Sustituyendo los valores en la fórmula para calcular la relación señal-ruido:

$$SNR = 20 \log \left( \frac{0.9660V}{0.0112V} \right) \quad (58)$$

$$SNR = 38.7 \text{ dB} \quad (59)$$

Una señal de 38.7 dB es bastante buena para diferenciar la señal que se quiere analizar y el ruido presente, este resultado demuestra que la señal es aproximadamente 85.82 veces más fuerte que el ruido, esta diferencia es significativamente alta lo que demuestra que es claramente distinguible la señal normal del ruido que se presenta.

Desplazamiento en -X cuando el material depositado esta en posición vertical



**Figura 4.6.** Desplazamiento de dos milímetros en -X mientras el material depositado está en disposición vertical.

Desde el mismo punto en el que terminó la medición de la Fig. 4.5, comenzó el retroceso, Fig. 4.6. En el retroceso se observa un comportamiento muy similar de aumento y disminución en la intensidad del haz láser, y un paso muy grande de franjas de interferencia, que es muy similar a la medición anterior. Otro aspecto que persiste en los resultados es el desplazamiento de la platina micrométrica en avance y retroceso; es diferente en el retroceso a pesar de contar con los mismos parámetros en el software, a consecuencia de esto, el número de pasos recorridos por el pico motor tiene un comportamiento distinto, debido a su naturaleza es complicado que replique el mismo número de pasos en ambos sentidos.

Intentar igualar el desplazamiento de avance y retroceso del pico motor no es el objetivo principal de este trabajo de tesis, ya que es evidente la detección de imperfecciones y son altamente similares en la misma área, cuando las imperfecciones están colocadas verticalmente, siendo detectables en ambos casos, cuando el diámetro de la cintura del haz láser es más pequeño y cuando el material depositado es mayor.

Ahora se determinará la relación de la señal-ruido de la señal graficada en la Fig. 4.6, obteniendo lo siguiente:

$$E_s = \frac{(1.57V - 0.14V)^2}{2} = 1.0224V \quad (60)$$

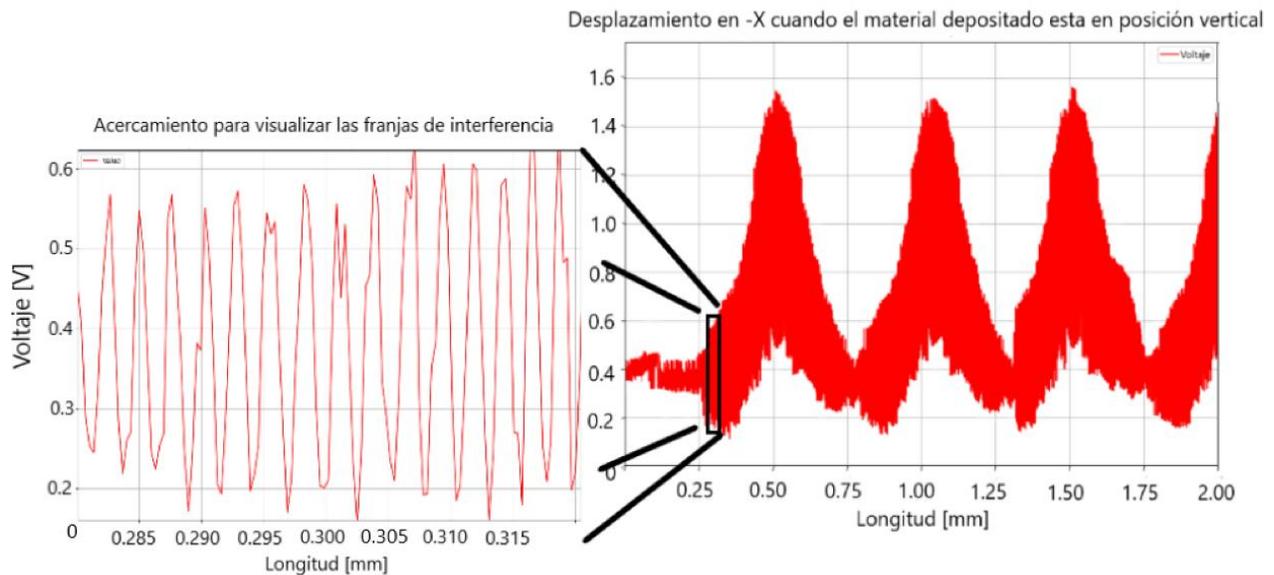
$$E_n = \frac{(0.45V - 0.35V)^2}{2} = 0.005V \quad (61)$$

Ahora sustituyendo los valores para calcular la señal-ruido se obtiene:

$$SNR = 20 \log \left( \frac{1.0224V}{0.005V} \right) \quad (62)$$

$$SNR = 46.20 \text{ dB} \quad (63)$$

Con el resultado obtenido, la apreciación de la señal es bastante buena comparada con el ruido, es decir, es una señal muy clara y fácilmente distinguible del ruido.

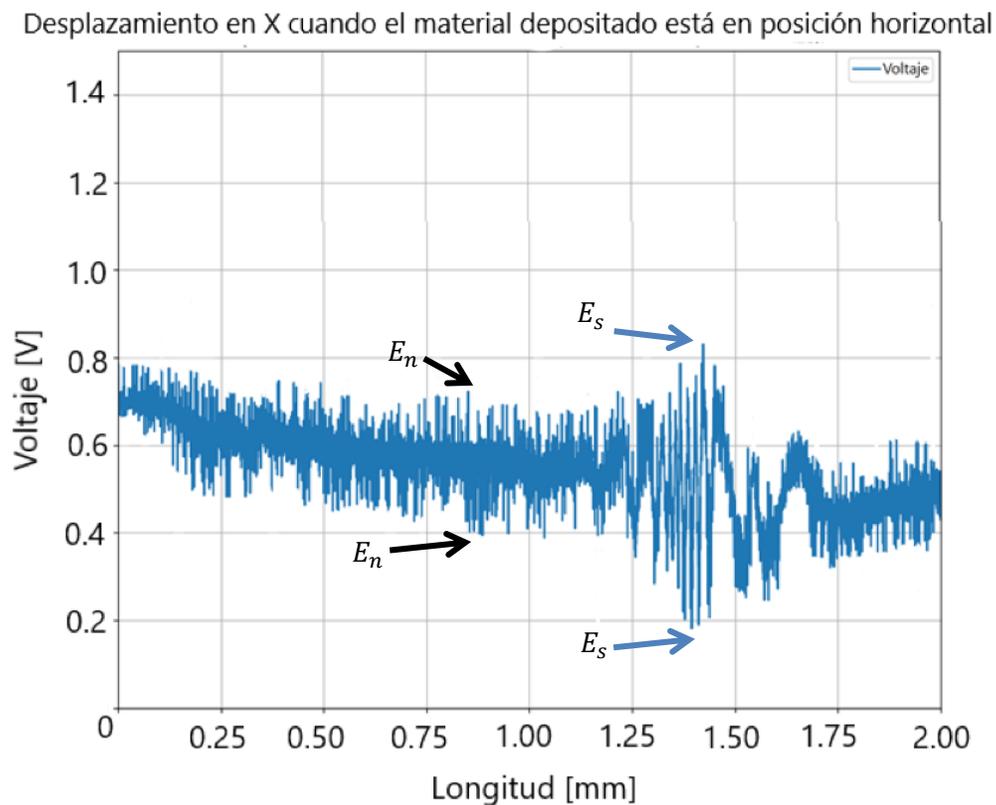


**Figura 4.7.** Franjas de interferencia después de aplicar un acercamiento en la zona señalada.

La adquisición de datos del sistema diseñado es de alta velocidad, lo que resulta en una gran cantidad de datos capturados. Al observar la gráfica completa, resulta imposible apreciar las franjas de interferencia, ya que son demasiadas las que pasan en un periodo

tan corto de tiempo durante la medición. La figura que se forma es el resultado del cambio en la intensidad del haz láser que incide en el espejo (E2), y esto es exactamente lo que se busca observar. Las franjas de interferencia se deben a imperfecciones en el material depositado, ya que las franjas de material no son uniformes. A simple vista, las líneas parecerían perfectamente paralelas, sin embargo, el material depositado no es uniforme, lo que resulta en numerosas imperfecciones que no son visibles para el ojo humano pero que son perceptibles para el dispositivo-sensor diseñado basado en el interferómetro de Michelson. Observar Fig. 4.7.

Después de completar las mediciones con las franjas de material depositado en vertical, la muestra se ajustó aplicando una rotación de  $90^\circ$ , como se observa en la Fig. 4. Ahora, las líneas de material depositado están dispuestas horizontalmente, lo que significa que el barrido se realizará sobre una zona intermedia entre la ausencia de material depositado y el material depositado. Es importante destacar que para el barrido de la Fig. 4.8 y la Fig. 4.9 no está colocado el lente convexo entre el espejo (E2) y el divisor de haz (D).



**Figura 4.8.** Desplazamiento de dos milímetros en X mientras el material depositado está en disposición horizontal.

En este barrido, observar Fig. 4.8, no hay un obstáculo abrupto como cuando las franjas de material depositado estaban verticales. Sin embargo, se observa una ligera disminución constante de la intensidad en el voltaje y un cambio en el comportamiento de las franjas de interferencia en un lapso de longitud específico. En esta medición, el diámetro del haz láser es mayor que una línea de material depositado, es decir, sin el lente convergente (L2). Hubo una disminución constante pero no muy evidente en la intensidad, y el cambio en las franjas es interesante, ya que sugiere la presencia de una pequeña cantidad de imperfección depositada en ese lugar específico, detectada por el interferómetro. Al final de la gráfica, nuevamente hubo un aumento constante hasta que finaliza la medición. Por lo que se atribuye este comportamiento a la disminución y aumento de anchura de una o más franjas de material depositado, es decir, es un poco más ancha en esa área y después se vuelve a hacer más delgada que es cuando el nivel de voltaje aumenta casi al final de la medición.

Ahora se realizará el cálculo de la relación señal-ruido de la señal graficada en la Fig. 4.8.

$$E_s = \frac{(0.82V - 0.19V)^2}{2} = 0.1984V \quad (64)$$

$$E_n = \frac{(0.7V - 0.4V)^2}{2} = 0.045V \quad (65)$$

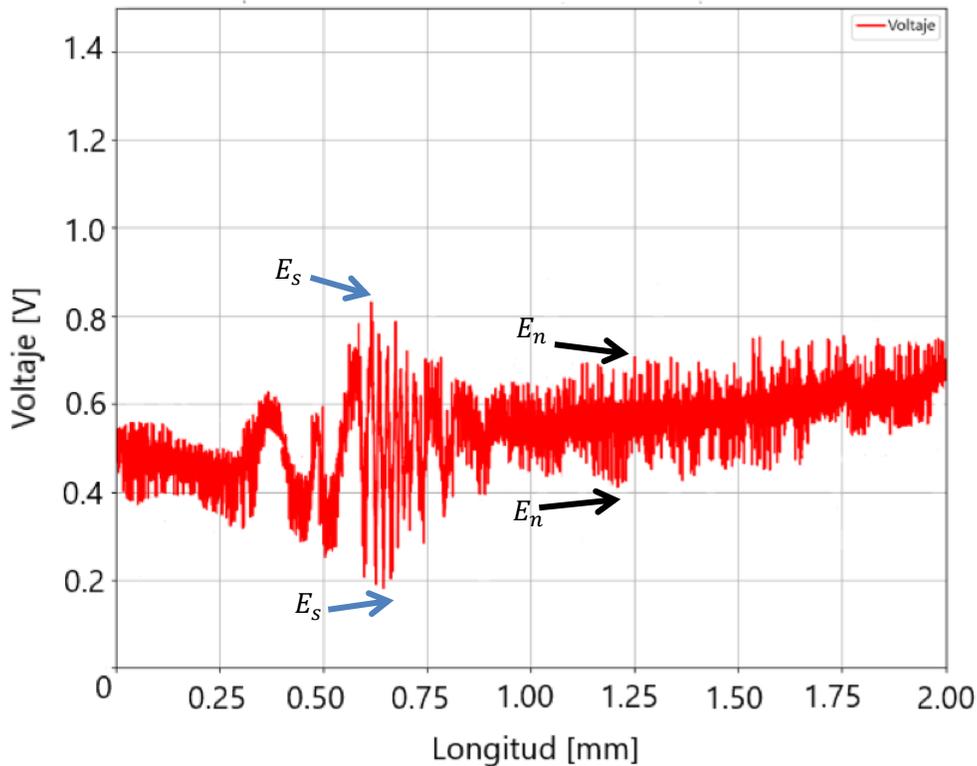
Sustituyendo los valores para obtener la relación señal ruido se obtiene:

$$SNR = 20 \log \left( \frac{0.1984V}{0.045V} \right) \quad (66)$$

$$SNR = 12.88 \text{ dB} \quad (67)$$

La relación señal-ruido de 12.88 dB es baja comparada con los primeros barridos, la calidad de la señal se torna bastante ruidosa, tanto que la señal es aproximadamente 4.41 veces más fuerte que el ruido, sin embargo, esto permite distinguir claramente la señal del ruido, para esta aplicación no hay ningún inconveniente al momento de visualizar los datos ya que se distingue la disminución en la intensidad del voltaje y se observan las franjas de interferencia.

Desplazamiento en-X cuando el material depositado está en posición horizontal



**Figura 4.9.** Desplazamiento de dos milímetros en  $-X$  mientras el material depositado está en disposición horizontal.

Desde el punto en el que finalizó la medición anterior, se aplicó un retroceso que parece tener un comportamiento similar al de la Fig. 4.8. Inicia con un decremento de intensidad de voltaje, seguido por un paso de franjas de interferencia y luego un constante aumento de intensidad en el voltaje, observar Fig. 4.9. En ambos resultados, parece que dos líneas de material depositado se encuentran en paralelo y a medida que el barrido avanza, estas líneas se cierran debido a un cambio en el grosor de alguna de ellas, provocando una disminución y aumento en el reflejo del haz láser, lo que provoca el aumento o disminución de intensidad. Las franjas de interferencia se deben a una imperfección a escala comparable con micras en la misma área, según la detección del dispositivo-sensor diseñado, lo que sugiere que el dispositivo funciona de manera más que satisfactoria.

Ahora, al colocar un lente convexo entre el divisor de haz (D) y el espejo (E2) a la distancia focal adecuada según la hoja de datos del lente, que tiene una distancia focal de 20 mm, se busca reducir al máximo el diámetro de la cintura del haz láser. Es importante recordar que cuando se utiliza el lente convexo, el diámetro del haz láser se reduce hasta ser más pequeño que el material depositado en el espejo y de acuerdo con lo calculado la reducción es de 16 veces.

Calculando la relación señal-ruido de la señal graficada en la Fig. 4.9, se obtiene lo siguiente:

$$E_s = \frac{(0.83V - 0.18V)^2}{2} = 0.2112V \quad (68)$$

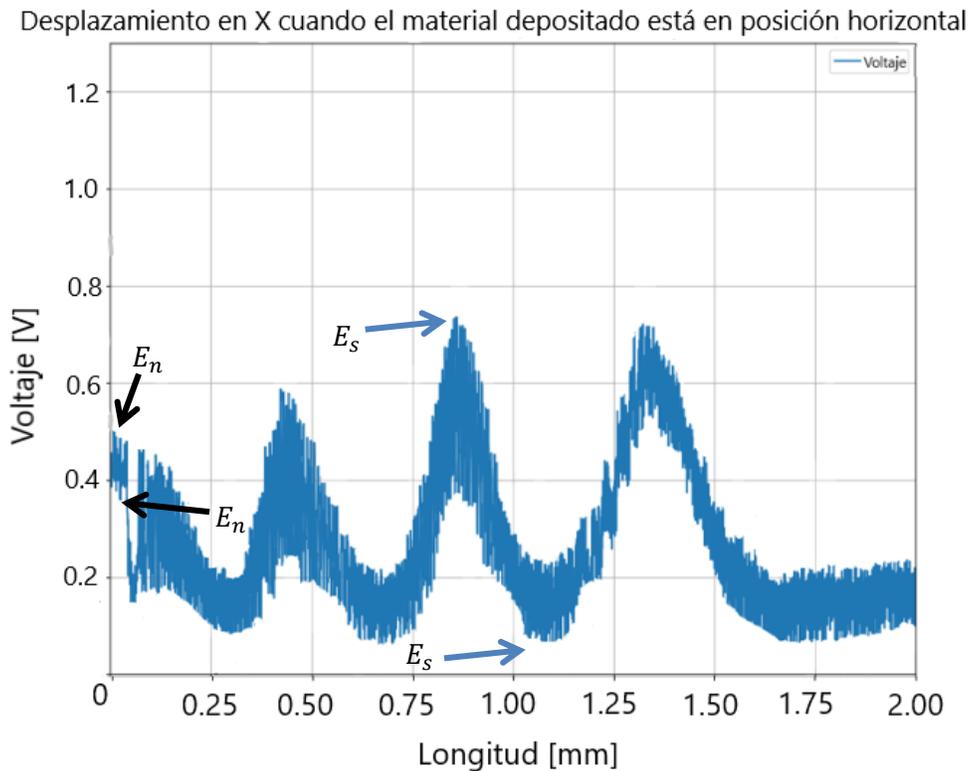
$$E_n = \frac{(0.7V - 0.43V)^2}{2} = 0.0364V \quad (69)$$

Ahora sustituyendo los valores para obtener la relación señal-ruido:

$$SNR = 20 \log \left( \frac{0.2112V}{0.0364V} \right) \quad (70)$$

$$SNR = 15.26 \text{ dB} \quad (71)$$

La relación señal-ruido de este barrido ha sido muy bajo, sin embargo, eso no impide analizar lo que se requiere, que es el aumento o descenso de la intensidad del voltaje y visualizar las franjas de interferencia, por lo que es un resultado adecuado para analizar.



**Figura 4.10.** Desplazamiento de dos milímetros en X mientras el material depositado está en disposición horizontal.

En la Fig. 4.10, se observa una fluctuación en la intensidad del haz láser y un paso de franjas de interferencia. Esta variación se debe al grosor no uniforme de las imperfecciones del material depositado en uno de los espejos, es decir a la anchura de las franjas de material depositado. En algunas áreas, estas imperfecciones no interfieren con el haz láser, pero en otras más gruesas, afectan la potencia óptica, impidiendo el paso del haz láser al espejo, en este punto el tamaño del haz láser está reducido a 39.5 micrómetros y hay una presencia de franjas de interferencia, lo que indica que se está alterando el camino óptico gradualmente, entonces se están visualizando imperfecciones más pequeñas que el diámetro del haz láser, a escalas comparables a nanómetros, las imperfecciones de tamaño considerablemente más grande afectan a la intensidad de reflexión (de no haber imperfecciones que afecten la intensidad de reflexión se vería un paso de franjas en un mismo nivel de voltaje) y esto se refleja claramente en la fluctuación de la gráfica.

Se intentó realizar el barrido en la misma zona que en las dos gráficas anteriores, es posible que, al enfocar el lente, el haz láser haya cambiado ligeramente su trayectoria. Sin embargo, se pueden observar claramente la presencia de franjas de interferencia en esa “nueva” área, lo cual indica la detección de imperfecciones en escalas comparables con micrómetros.

Al reducir el diámetro del haz láser mediante el lente convexo, la resolución del dispositivo-sensor aumenta, lo que permite visualizar franjas de interferencia que antes no se podían detectar, esto no se debe al dispositivo, sino por un mejor enfoque hacia un área específica, lo que también limita el tamaño del barrido. Esto demuestra claramente que el material depositado está distribuido de manera no uniforme, aunque a simple vista humana pueda parecer depositado de manera perfecta.

Calculando la relación de la señal-ruido de la señal graficada de la Fig. 4.10, se obtiene:

$$E_s = \frac{(0.73V - 0.08V)^2}{2} = 0.2112V \quad (72)$$

$$E_n = \frac{(0.51V - 0.38V)^2}{2} = 0.0084V \quad (73)$$

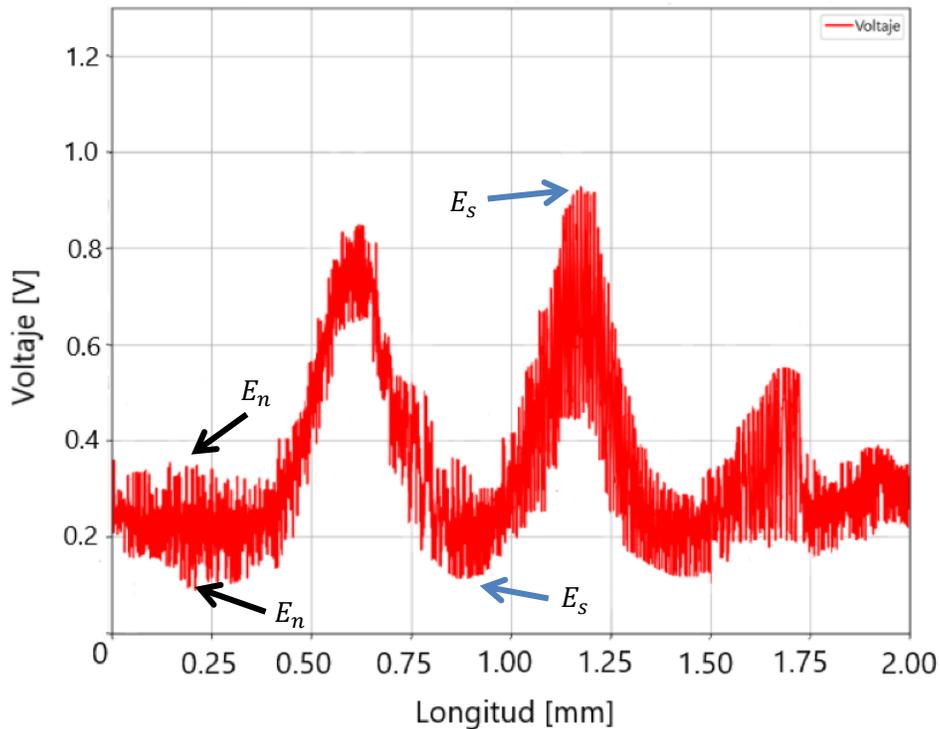
Sustituyendo los valores para obtener la relación señal-ruido:

$$SNR = 20 \log \left( \frac{0.2112V}{0.0084V} \right) \quad (74)$$

$$SNR = 28 \text{ dB} \quad (75)$$

Con el resultado obtenido de la relación señal-ruido se puede analizar con claridad los aumentos y disminuciones de intensidad en el voltaje de la señal al igual que son distinguibles las franjas de interferencia del interferómetro de Michelson, por lo que es posible analizar los resultados sin ningún inconveniente.

Desplazamiento en -X cuando el material depositado está en posición horizontal.



**Figura 4.11.** Desplazamiento de dos milímetros en -X mientras el material depositado está en disposición vertical.

Al igual que en los barridos anteriores se realizó un retroceso, Fig. 4.11, y se observa un comportamiento muy similar que la gráfica anterior, Fig. 4.10. Esto sugiere que las imperfecciones del material depositado realmente presentan variaciones en su grosor en ciertas partes, lo que se confirma con el barrido completo. Además, se pueden apreciar franjas de interferencia que, considerando el tamaño del haz láser, representan imperfecciones muy pequeñas de tamaño comparable a nanómetros. Por lo que se ha logrado el objetivo del trabajo.

Este trabajo puede tener aplicaciones muy interesantes tanto en la industria como en la academia, especialmente en áreas como el estudio del espacio y diversas investigaciones actuales que requieren análisis de superficies planas reflejantes. La importancia de los interferómetros radica en su capacidad para realizar mediciones precisas en ciertas zonas y analizar las condiciones del estado físico de las superficies, determinando si son planas o si tienen algún defecto de diseño o han sido contaminadas por manipulación o simplemente por partículas de su entorno. En investigaciones de laboratorio, donde en algunos casos se requieren superficies lisas, dispositivos como el desarrollado en este trabajo de tesis pueden ser herramientas valiosas para verificar y evaluar la calidad de dichas superficies.

Analizando la relación señal-ruido de la señal graficada en la Fig. 4.11 se obtiene lo siguiente:

$$E_s = \frac{(0.92V - 0.13V)^2}{2} = 0.3120V \quad (76)$$

$$E_n = \frac{(0.36V - 0.13V)^2}{2} = 0.0529V \quad (77)$$

Sustituyendo los valores para obtener la relación señal-ruido se obtiene:

$$SNR = 20 \log \left( \frac{0.3120V}{0.0264V} \right) \quad (78)$$

$$SNR = 21.46 \text{ dB} \quad (79)$$

Con el resultado obtenido de la relación señal-ruido de la Fig. 4.11, es claramente distinguible e indica que la señal es 11.7 veces más grande que el ruido, por lo que no hay ningún inconveniente en distinguir entre la señal y el ruido para analizar los resultados.

La relación promedio de la señal-ruido (SNR) del dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson se obtiene calculando la media aritmética de los resultados de la relación señal-ruido de cada barrido. Para esto se realiza la sumatoria de todos los resultados y se divide entre la cantidad de números obtenida, observar Ec. 80 [21].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N} \quad (80)$$

Dónde:

$\bar{x}$  = Media aritmética

$x_i$  = Valores individuales

$\sum_{i=1}^n x_i$  = Será la sumatoria de los valores desde  $i=1$  hasta  $i=n$ .

Sustituyendo los valores en la Ec. 80:

$$\bar{x}_{sr} = \frac{38.7 \text{ dB} + 46.20 \text{ dB} + 12.88 \text{ dB} + 15.26 \text{ dB} + 28 \text{ dB} + 21.46 \text{ dB}}{6} = 27.083 \text{ dB} \quad (81)$$

De esta manera se obtiene la señal promedio de la relación señal-ruido del dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson basado en los diversos resultados obtenidos de las señales graficadas en los barridos de la superficie plana reflejante.

Finalmente, es importante conocer la sensibilidad del dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos, la sensibilidad se obtiene a partir de la intensidad de voltaje máxima medida por el dispositivo-sensor, dividido entre el número de franjas de material depositado en el vidrio soda lime y la superficie plana reflejante, en la distancia de dos milímetros que son los desplazamientos aplicados por la platina en los distintos barridos de este trabajo de tesis, para determinar el número de franjas de material depositadas, nuevamente se hará uso de la media aritmética para identificar un valor medio de franjas de material depositado.

$$\bar{x}_m = \frac{4 + 4.5 + 4 + 3.5}{4} = 4 \text{ franjas de material depositado} \quad (82)$$

Entonces, el promedio de franjas de material depositado es de 4 y el valor de voltaje máximo alcanzado durante los diversos barridos es de 1.59 V, entonces la sensibilidad del dispositivo-sensor implementado en este trabajo de tesis es:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{(\text{Voltaje})}{\text{Franjas de material depositadas}} = \frac{1.59V}{4} = 0.3975 \frac{\text{Volts}}{\text{Franjas de material depositadas}} \quad (83)$$

De esta forma se obtiene la sensibilidad del dispositivo sensor basado en el interferómetro de Michelson, la sensibilidad es importante debido a que es la magnitud que establece la capacidad de un sistema para responder a señales muy bajas.

## Conclusiones

En este proyecto de investigación, se realizó el diseño e implementación de un dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson, capaz de sensar dos tipos de imperfecciones; la primera de éstas es la calidad de las franjas de material depositado de forma comparable a una rejilla Ronchi en el vidrio soda lime. El segundo tipo de imperfecciones son aquellas que no son perceptibles para el ojo humano, como residuos de material que se desprendió al realizar el grabado de la rejilla Ronchi, o imperfecciones en el substrato de depósito (el vidrio soda lime) y la superficie plana reflejante, partículas depositadas en la superficie por manipulación o deformaciones en la superficie del vidrio soda lime.

La manera en la que el dispositivo sensor mide la presencia de las franjas de material depositado (que son fácilmente distinguibles para el ojo humano) es a través de la fluctuación de la intensidad en el voltaje medido por el fotodetector, usando o no, una lente convergente (L2), observar Fig. 4.3 y Fig. 4.5. Cuando el lente convexo es colocado en la configuración óptica el diámetro de la cintura del haz láser se reduce 16 veces, lo que significa que será mucho más pequeño que una franja de material depositado en el vidrio soda lime y el espejo, una franja de material depositado en valor promedio (evaluando cuatro franjas de material depositado) mide 0.40 mm de grosor, que comparado con el diámetro de la cintura del haz láser cuando es colimado por el lente convergente es de 39.5 micrómetros, lo que significa que es aproximadamente 10 veces más pequeño el diámetro del haz láser que una franja de material depositado, observar Fig. 3.13. Cuando el haz láser incide sobre esta franja de material depositado, esta impide la llegada del haz láser al espejo, por lo tanto no se refleja el haz láser ni se provoca el fenómeno de interferencia, a consecuencia de esto, no se percibe la intensidad en ese brazo del interferómetro de Michelson provocando la detección de una señal de voltaje constante de 0.2 V, una vez que el haz láser ya no incide sobre la franja de material depositado se aprecia un aumento en la intensidad de voltaje de la señal y el fenómeno de interferencia se aprecia nuevamente, observar Fig. 4.3 y Fig. 4.4.

Cuando no está colocado el lente convergente (L2) el dispositivo-sensor también es capaz de medir las franjas de material depositado en el vidrio soda lime y el espejo, sin embargo, se cuantifica de manera distinta. La forma en la que sensa estas franjas de material depositado es de igual manera mediante fluctuaciones en la intensidad del voltaje, sin embargo, la diferencia de cuando está ausente el lente convergente (L2) es que sin el lente sí se presenta el fenómeno de interferencia, a consecuencia de lo anterior, se observa un paso de franjas de interferencia del interferómetro de Michelson, pero con aumentos y disminuciones en la intensidad de la señal de voltaje, observar Fig. 4.5 y Fig.

4.6. Esto se debe a que el diámetro del haz láser está sin colimar y es mayor que una franja de material depositado en el vidrio soda lime y el espejo, el valor promedio del grosor de una franja de material depositado es de 0.40 mm mientras que el diámetro de la cintura del haz láser a una distancia de 110 cm (distancia utilizada para toda la configuración óptica de esta tesis) es de 0.64 mm, observar Fig. 3.18. Cuando el haz láser incide sobre la franja de material depositado no es cubierto en su totalidad, por lo que el espejo consigue reflejar un porcentaje del haz láser, que estará decreciendo o aumentando conforme se desplace la platina en el barrido, y a pesar de estar reflejando solo un porcentaje del haz láser, se presenta el fenómeno de interferencia y por lo tanto hay un paso de franjas de interferencia del interferómetro de Michelson, que son visibles en los resultados graficados, observar Fig. 4.7.

El dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson, además de sensor las franjas de material depositado que son visibles para el ojo humano, también es capaz de sensor aquellas imperfecciones que no pueden ser visualizadas con facilidad, tiene la capacidad de hacer esto mediante el paso de franjas de interferencia de material depositado, con y sin el lente convergente (L2). Las franjas de interferencia del interferómetro de Michelson aparecen cuando hay una diferencia en la distancia del camino óptico de alguno de sus brazos, entonces en la realización de los experimentos, al hacer diversos barridos hubo un paso pronunciado de franjas de interferencia, lo que significa que se alteró la distancia en ese brazo del interferómetro, y por eso es que hay un paso de franjas de interferencia, cuando se habla de una distancia, esta distancia es comparable con micrómetros debido a la cantidad de franjas que transcurrieron. La alteración de la distancia es causada debido a que el material depositado en el vidrio soda lime no es uniforme y se pueden encontrar partículas de este mismo material en donde se supone debería estar ausente, es decir sobre la ausencia de la franja de material depositado, también es ocasionado por deformaciones en la superficie del vidrio soda lime y partículas contaminantes.

Se comprobó que las franjas de material depositado como rejilla Ronchi en el vidrio soda lime y el espejo, no son del mismo grosor, es decir no son uniformes. En los barridos para comprobar esto, la muestra se giró 90°, observar Fig. 4, de manera que las franjas de material depositado estén paralelas con el desplazamiento del haz láser aplicado por la platina. El haz láser se colocó entre dos franjas de material depositado, en otras palabras, está ubicado en medio de las dos franjas de material para que el haz láser pueda ser reflejado por la ausencia de material depositado. Como resultado con y sin el lente convergente (L2) se aprecian cambios en la intensidad del voltaje, esta vez causados por el grosor de las franjas de material depositado, debido a que al aumentar el grosor de la franja de material depositado impedirá la reflexión de una parte del haz láser y conforme aumente el grosor más cubrirá el haz láser, lo que se traduce en una disminución en la

intensidad del voltaje, por el contrario si la franja de material depositada se hace más delgada el aumento en la intensidad de voltaje será visible, observar Fig. 4.10 y Fig. 4.11.

Adicional a la fluctuación de intensidad en el voltaje debido al cambio de grosor de las franjas de material depositado, fue posible observar un paso de franjas de interferencia cuando el haz láser sigue una trayectoria paralela a las franjas de interferencia, esto se debe a una imperfección ocasionada por el mismo material depositado, de esta manera fue ligeramente alterada la diferencia del camino óptico provocando un breve paso de franjas de interferencia, observar Fig. 4.8, se comprobó además que en el desplazamiento invertido por parte de la platina se puede observar la misma imperfección presente en la misma área del vidrio soda lime, observar Fig. 4.9.

Se realizó el cálculo de la relación señal-ruido (SNR) del dispositivo-sensor, mediante los resultados obtenidos de los diferentes barridos, para ello se obtuvo el valor medio de la relación señal-ruido de cada barrido (dos datos por barrido debido a que es ida y vuelta un barrido completo), debido a esto se obtuvo una relación señal-ruido de 27.083 dB del dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson desarrollado en este trabajo de tesis. La relación de señal-ruido obtenida para el dispositivo-sensor es bastante buena, fácilmente se puede distinguir el paso de franjas de interferencia, así como aumentos y disminuciones en la intensidad del voltaje con respecto al tamaño del ruido presente.

Por otro lado, se realizó el cálculo de la sensibilidad, la cual en este caso específico estará dada por el número de franjas de material depositado transcurrida durante el barrido por la intensidad máxima de voltaje percibida por el dispositivo-sensor, como resultado del cálculo de la sensibilidad se obtuvo 0.3975 volts por cada franja de material depositado.

El dispositivo-sensor basado en el interferómetro de Michelson desarrollado en este trabajo de tesis es capaz de distinguir fácilmente imperfecciones en escalas comparables con micrómetros y con imperfecciones visibles en superficies planas reflejantes. Este dispositivo-sensor tiene muchas aplicaciones útiles, como el control de calidad en la fabricación de espejos, este dispositivo nos puede proporcionar información relevante sobre la calidad de la superficie plana de espejos. De igual manera este dispositivo tiene relevancia en trabajos de investigación en óptica y nanotecnología, ya que el escaneo de superficies reflejantes es una pieza fundamental de este campo de estudio, también puede ser utilizado en metrología de alta precisión en donde se requiere un estricto control de superficies planas reflejantes y analizar si tiene alguna imperfección y/o defecto de fábrica.

Este trabajo de tesis puede tener mejoras como el de aumentar el rango de detección hasta imperfecciones nanométricas, utilizar un diferente método para implementar el barrido, o incluso mejorar la parte de óptica en espacio abierto por fibra óptica.

## Referencias

- [1] M. Campos-García y F. Granados-Agustín, «Interferometric Ronchi test by using substructured gratings,» de *Proc SPIE 7390(2009)*, 73901B-73901-9, Ciudad de México, 2009.
- [2] D. Malacara , *Óptica Básica*, Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 2015.
- [3] E. Hecht, *Optics*, 5th Edition Global Edition ed., London: Pearson Education Limited, 2017.
- [4] F. Jenkins y H. White, *Fundamentals of Optics*, Fourth Edition ed., California: McGraw-Hill, 2001.
- [5] A. Gonzalez , «La ley de Snell,» *n-Ciencia Estudiantil*, vol. 7, nº 1, pp. 34-35, 2020.
- [6] H. I. Villalón, O. Pottiez y Gómez Vieyra, «El camino hacia la luz láser,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 64, nº 2, pp. 100-106, 2018.
- [7] M. Moreno, «La Luz,» *Innovación y Experiencias Educativas*, vol. 45, nº 6, 2009.
- [8] M. Gisbert Juárez, «Ingenierizando,» Academia Balderix, 23 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.ingenierizando.com/optica/ley-de-snell/>. [Último acceso: 23 Febrero 2024].
- [9] S. Palma-Vargas, G. E. Sandoval-Romero y A. Ibarra, «Detection limit of a Sagnac interferometer,» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 6422, nº 6, pp. 2-4, 2007.
- [10] J. Pleite, R. Vergaz y J. Ruiz , *Electrónica Analógica para Ingenieros*, Madrid: McGraw-Hill, 2009.
- [11] M. Gisbert-Juárez, «Ingenierizando,» Academia Balderix, 20 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.ingenierizando.com/electronica/valor-eficaz-o-valor-rms/>. [Último acceso: 25 Febrero 2024].
- [12] Ruiz Txélo, O. Arbelaitz, I. Etxebarria y A. Ibarra, *Análisis Básico de Circuitos Eléctricos y Electrónicos*, Madrid: Pearson Educación, 2004.
- [13] S. R. Systems, «SRS Stanford Research Systems,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.thinksrs.com/products/sr560.html>. [Último acceso: 7 January 2024].
- [14] A. Ruiz , L. García y J. Mesa, «Error, Incertidumbre, Precisión y Exactitud, Términos asociados a la calidad espacial del dato geográfico,» *Congreso Internacional de Catastro Unificado y Multipropósito*, vol. 1, nº 1, pp. 1-8, 2010.

- [15] K. Greene, «MIT Technology Review,» Opinno, 9 Diciembre 2008. [En línea]. Available: <https://www.technologyreview.es/s/149/el-mejor-detector-de-fotones-jamas-creado>. [Último acceso: 8 Enero 2024].
- [16] R. Teja , R. Navarro y A. V, «Electronics Hub,» Electronics Hub, 17 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.electronicshub.org/passive-low-pass-rc-filters/>. [Último acceso: 12 Enero 2024].
- [17] W. McAllister, «Khan Academy,» Khan Academy, 17 Noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-resistor-circuits/a/ee-voltage-divider>. [Último acceso: 12 Enero 2024].
- [18] Daniel, «Data Scientist,» Formación en Ciencia de Datos, 30 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://datascientest.com/es/todo-sobre-matplotlib>. [Último acceso: 6 Abril 2024].
- [19] Newport, «mks Newport,» Newport Corporation, 18 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.newport.com/p/8095-M>. [Último acceso: 18 Enero 2024].
- [20] F. Sears, H. Zemansky, H. Young y R. Freedman, «OpenStax,» Física Universitaria Volumen 3, 17 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://openstax.org/details/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-3>. [Último acceso: 26 Enero 2024].
- [21] E. Jacobsen, «DSP Related- Understanding and Relating Eb/No, SNR, and other power efficiency metrics,» DSP Related, 29 Mayo 2012. [En línea]. Available: <https://www.dsprelated.com/showarticle/168.php>. [Último acceso: 29 Abril 2024].
- [22] F. S., «Química y Física,» Gimnasio San Felipe Neri, 19 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://sanfelipe-quimicayfisica.blogspot.com/2022/10/continuacion-interferencia-de-la-luz.html>. [Último acceso: 2 Febrero 2024].

## Anexo

En esta sección se agregan los programas desarrollados en este trabajo de tesis.

El siguiente código simula las franjas de interferencia que deben transcurrir en una distancia específica.

```
clear;

prompt = "Introduzca el valor de la distancia en um "; %introduce la distancia
d = input(prompt)

prompt = "Introduzca el valor de la Intensidad cero "; %introduce uno por defecto
Ic = input(prompt)

prompt = "Introduzca el valor de la luz del ambiente "; %una especie de offset se puede colocar uno por defecto
il = input(prompt)

x=0:1e-3:d; %um
y = il+2*(Ic)*(1+cos((4*pi)*x/0.630+pi())); %ecuación que realiza el calculo

plot(x, y); %crea la grafica
xlabel("Longitud (μm)")
ylabel("Voltaje(V)")
title("Relación entre la distancia y las franjas de interferencia ")
axis([0 d 0 5+il]); %escala el voltaje (simulado)
```

Este programa en Python, lee y muestra gráficamente la señal analógica proveniente del pin 34 de la tarjeta ESP32 a través del puerto COM.

```
import serial

import matplotlib.pyplot as plt

import pandas as pd

from datetime import datetime

# Configura la conexión con Arduino a través del puerto COM4 a una velocidad de 115200 baudios.

arduino = serial.Serial('COM4', 115200)

# Configura la visualización en tiempo real de la gráfica.

plt.ion()

# Crea una figura y un eje para la gráfica.

fig, ax = plt.subplots()

# Inicializa listas para almacenar datos de tiempo (x) y valores (y).

x, y = [], []

# Inicializa un diccionario para almacenar los datos en un formato tabular.

data = {'Time': [], 'Value': []}

# Bucle infinito para recibir y procesar datos continuamente desde Arduino.

while True:

    # Lee los datos del Arduino y elimina los caracteres de nueva línea al final.

    arduino_data = arduino.readline()[:-2]

    # Verifica si se recibieron datos desde Arduino.

    if arduino_data:

        # Obtiene la hora y fecha actual.

        now = datetime.now()

        # Convierte los datos de Arduino a un valor flotante.

        value = float(arduino_data)

        # Almacena el tiempo y el valor en las listas respectivas.

        x.append(now)

        y.append(value)

        # Almacena el tiempo y el valor en el diccionario de datos.
```

```
data['Time'].append(now)
data['Value'].append(value)
# Limpia el eje para actualizar la gráfica.
ax.clear()
# Grafica los datos en el eje.
ax.plot(x, y)
# Configura las etiquetas de los ejes.
ax.set_xlabel('Time')
ax.set_ylabel('Value')
# Establece el rango del eje y (altura de la gráfica).
ax.set_ylim([0, 4096])
# Ajusta automáticamente el formato de la fecha en el eje x.
plt.gcf().autofmt_xdate()
# Pausa breve para permitir la actualización de la gráfica en tiempo real.
plt.pause(0.01)
# Crea un DataFrame de Pandas a partir del diccionario y guarda los datos en un archivo CSV.
df = pd.DataFrame(data)
df.to_csv('Distanciiiiia.csv', index=False)
```

El último código en Python es para visualizar y personalizar los datos obtenidos en el programa anterior. Abre dos archivos CSV y los grafica al mismo tiempo.

```
import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

# Lee los archivos CSV

df1 = pd.read_csv('LásercnrejillaronchiDerechaFranjasvert.csv')
df2 = pd.read_csv('Der_RonchiM2.csv')

# Convierte la columna 'Time' en objetos de fecha y hora

df1['Time'] = pd.to_datetime(df1['Time'], format='%Y-%m-%d %H:%M:%S.%f')
df2['Time'] = pd.to_datetime(df2['Time'], format='%Y-%m-%d %H:%M:%S.%f')

# Ajusta el eje horizontal

df1['Time'] = (df1['Time'] - df1['Time'].min()) / (df1['Time'].max() - df1['Time'].min()) * 2
df2['Time'] = (df2['Time'] - df2['Time'].min()) / (df2['Time'].max() - df2['Time'].min()) * 2

# Grafica el primer archivo

ax = df1.plot(x="Time", y="Value", label="Voltaje")

ax.set_title("Desplazamiento en -Xe cuando el material depositado está en posición vertical")
ax.set_xlabel("Longitud (mm)")
ax.set_ylabel("Voltaje (V)")
ax.set_ylim(0, 1.2) # Ajusta el límite superior debido al offset
ax.tick_params(axis='x', rotation=45)
ax.set_xlim(0, 2)

for i, date in enumerate(df1['Time']):
    ax.text(date, -0.25, str(round(df1.iloc[i]['Time'], 2)), transform=ax.get_xaxis_transform())

# Grafica el segundo archivo

ax = df2.plot(x="Time", y="Value", label="Voltaje")

ax.set_title("Desplazamiento en Xe cuando el material depositado está en posición vertical")
ax.set_xlabel("Longitud (mm)")
ax.set_ylabel("Voltaje (V)")
ax.set_ylim(0, 1.2) # Ajusta el límite superior debido al offset
ax.tick_params(axis='x', rotation=45)
```

```
ax.set_xlim(0, 2)
for i, date in enumerate(df2['Time']):
    ax.text(date, -0.25, str(round(df2.iloc[i]['Time'], 2)), transform=ax.get_xaxis_transform())
# Añadir leyenda
ax.legend()
# Muestra las gráficas
plt.show()
```