



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE  
MORELOS



FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS E INGENIERIA

Prototipo de vibrómetro láser basado en interferometría  
de auto-mezclado: diseño y construcción

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECANICO

P R E S E N T A:

ALAN REYES SÁNCHEZ



DIRECTOR DE TESIS:  
DR. VICTOR ULISES LEV CONTRERAS LOERA  
2018

## **Dedicatoria**

El presente proyecto de tesis es dedicado:

Principalmente a mis padres quienes me apoyaron y estuvieron en todo momento durante mi carrera, por los consejos, regaños y por confiar siempre en mí.

A mi tía Cipriana por ser la persona de quien más recibí apoyo y amor, me recibió en su casa durante la mayor parte de tiempo de mi carrera y tesis.

A mis tíos Ernesto, Wendy, Alma que también me apoyaron en todo momento y a mi familia en General.

A mis amigos en general, principalmente Marco, Joel, Miguel, Francisco y Rubén quienes fueron un gran apoyo en todas las situaciones durante el tiempo y me ayudaron a tomar el mejor camino.

A mi novia Kenia por su gran apoyo emocional y estar conmigo en todo momento desde la elaboración de mi tesis y por todas las palabras que me motivaron a seguir adelante.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

## **Agradecimientos**

El principal agradecimiento es a mi director de tesis Víctor Ulises Lev Contreras Loera por todo el aprendizaje, la confianza que me concedió y a sus colaboradores del Instituto de Ciencias Físicas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM y a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) que, a través del proyecto PAPIIT IA103617, apoyó en la realización del prototipo.

A H. Hugo Hinojosa Galván por su apoyo en la manufactura de las piezas mecánicas de mi prototipo

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarme, a ellos que continuaron depositando su esperanza en mí.

A mis compañeros de laboratorio, principalmente a Jairo, quienes me apoyaron en situaciones donde involucraba temas que yo desconocía.

A los sinodales quienes estudiaron mi tesis y la aprobaron.

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

## Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el diseño, construcción y operación de un prototipo de vibrómetro láser para medición de desplazamiento, velocidad y aceleración de vibraciones. Con este prototipo es posible realizar mediciones de forma no destructiva y sin contacto físico con el objeto de que se desea medir.

Los vibrómetros láser convencionales funcionan generalmente con interferómetros contruidos con 2 brazos formados con prismas y espejos para generar interferencia. El prototipo que presentamos se basa en interferometría de automezclado (Self-mixing Interferometry o SMI). SMI es una técnica simple de un solo brazo interferométrico que requiere un menor número de componentes ópticos que otras técnicas y simplifica la alineación óptica. Estas características extienden las aplicaciones de la interferometría sobre todo en el ámbito industrial.

En la técnica SMI la interferencia sucede dentro de la cavidad láser cuando parte de la luz emitida es retro-reflejada en la superficie del objeto en movimiento hacia la cavidad. Esta interferencia produce una modulación en amplitud (AM) y una modulación en frecuencia (FM) de la emisión láser. En un interferómetro SMI convencional la modulación AM es introducida en un fotodetector para convertirla en una señal eléctrica y poder medirla. En este prototipo la señal se extrae del canal FM demodulada y amplificada mediante un filtro de borde, obteniendo una señal más intensa que la señal obtenida del canal AM. El prototipo trabaja con un láser de bajo costo que opera a una longitud de onda de 405 nm con el que es posible realizar mediciones con desplazamientos desde ~200nm y frecuencias mayores de 40 kHz. En conclusión, SMI es una técnica simple, de bajo costo y con un amplio ancho de banda. El prototipo que presentamos en este trabajo puede ser utilizado en la industria y en investigaciones científicas; por ejemplo, para mediciones de

velocidad en túneles de viento, velocidad de fluidos, vibraciones mecánicas, desplazamientos en escalas micrométricas y análisis modal de objetos sólidos.

## Contenido

<b>Dedicatoria.....</b>	<b>ii</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>iii</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>iv</b>
<b>Capítulo 1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Definición del problema .....	2
1.2 Justificación .....	2
1.3 Importancia de medir vibraciones.....	3
1.4 Principios básicos de funcionamiento de vibrómetros láser .....	5
1.4.1 Principio de interferometría .....	5
1.4.2 Interferencia óptica .....	5
1.4.3 Interferómetro de Michelson.....	6
1.4.4 Efecto Doppler .....	8
1.4.5 Batido de ondas.....	9
1.5 Interferometría de Automezclado SMI.....	10
1.5.1 Láser Fabry Perot (FPL) .....	12
1.6 Estado del Arte.....	13
1.6.1 Métodos de medición de vibraciones y desplazamiento.....	14
1.6.2 Acelerómetros .....	14
1.6.3 Sensores LVDT (Sensores de desplazamiento inductivos) .....	15
1.6.4 Vibrómetros láser.....	16
1.6.5 Vibrómetros Doppler comerciales .....	16
1.6.6 Vibrómetros láser basados en la técnica de SMI (Señal AM) .....	18
1.6.7 Obtención de señal FM .....	20
1.7 Objetivos.....	23
1.7.1 Objetivo general:.....	23
1.7.2 Objetivos particulares: .....	23
<b>Capítulo 2 Diseños del prototipo .....</b>	<b>24</b>
2.1 Diseño mecánico.....	24

2.2 Diseño óptico .....	31
2.3 Diseño electrónico .....	34
2.4 Gastos aproximados .....	36
<b>Capítulo 3 Funcionamiento y Validación .....</b>	<b>37</b>
3.1 Lectura de señal .....	38
3.2 Validación .....	41
3.2.1 Medición de señales de un motor a pasos .....	42
3.2.2 Medición de señales de bocinas .....	46
<b>Capítulo 4 Aplicaciones .....</b>	<b>50</b>
4.1 Industria automotriz .....	50
4.2 Calibración de instrumentos .....	51
4.3 Salud .....	52
<b>Conclusiones .....</b>	<b>53</b>
<b>Recomendaciones para futuros proyectos .....</b>	<b>54</b>
<b>Lista de referencias .....</b>	<b>55</b>
<b>Anexo 1 hoja de especificaciones motor a pasos LSM025A .....</b>	<b>58</b>
<b>Anexo 2: Plano de puertas.....</b>	<b>60</b>
<b>Anexo 3: Planos de cubierta trasera.....</b>	<b>61</b>
<b>Anexo 4: Planos de cubierta frontal.....</b>	<b>62</b>
<b>Anexo 5: Planos del chasis del detector.....</b>	<b>63</b>

## Lista de tablas

Tabla 1. Rangos de operación de acelerómetros.....	15
Tabla 2. Desplazamientos de motor a pasos. ....	45
Tabla 3. Desplazamientos de bocina con respecto a los voltajes inducidos. ....	47

## Índice de figuras

Figura 1. Configuración básica de Interferómetro de Michelson. ....	8
Figura 2. Efecto Doppler en la luz. ....	9
Figura 3. Ilustración del efecto Doppler en un experimento de SMI. ....	11
Figura 4. Demodulación FM. ....	21
Figura 5. Configuración de la VBG. ....	22
Figura 6. Estructura del vibrómetro. ....	25
Figura 7. Chasis del fotodiodo. ....	26
Figura 8. Chasis de amplificador. ....	27
Figura 9. Chasis general construido en aluminio. ....	28
Figura 10. Base para fijación de componentes ópticos. ....	28
Figura 11. Puertas de gran abertura. ....	29
Figura 12 Montura rotatoria. ....	30
Figura 13. Base, porta-poste y poste de Thorlabs®. ....	30
Figura 14. Clamps Thorlabs®. ....	31
Figura 15. Alienación óptica del vibrómetro. ....	32
Figura 16. Diodo láser. ....	32
Figura 17 Ventana de borde o cuña. ....	33
Figura 18. Amplificador de trans-impedancia. ....	34
Figura 19. Lectura de señal de vibrómetro SMI. ....	37
Figura 20. Desplazamiento (s). ....	39
Figura 21. Lectura de señal. ....	40
Figura 22. Análisis de desplazamiento controlado con motor a pasos LSM025A. ....	42
Figura 23. Desplazamiento de 2 $\mu$ m. ....	43
Figura 24. Desplazamiento de 3 $\mu$ m. ....	44
Figura 25. Desplazamiento de 5 $\mu$ m. ....	44
Figura 26. Gráfica desplazamiento-voltaje de bocina a 100 Hz. ....	47
Figura 27. Gráfica de medición a baja frecuencia (6 Hz). ....	49

# Capítulo 1

## Introducción

La medición de vibraciones es un proceso importante en un sinnúmero de campos de trabajo, por ejemplo, para la inspección y evaluación de máquinas y estructuras, investigación científica, pruebas en sistemas de amortiguamiento, entre otros.

Las técnicas convencionales para medir vibraciones emplean sensores de contacto, como acelerómetros, los cuales presentan limitaciones como: respuestas de frecuencia limitadas, efectos en la lectura de la vibración a causa de la masa del transductor y dificultad para seleccionar el sensor correcto. Estas limitaciones se pueden prevenir con el uso de sensores libres de contacto, como vibrómetros láser.

Los vibrómetros láser son herramientas utilizadas ampliamente en la industria y otras áreas para medición de vibraciones sin contacto físico con el objeto a analizar, en entornos de difícil acceso y en cualquier tipo de superficie.

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y operación de un vibrómetro láser con base en la técnica SMI. El documento está conformado por una parte teórica y una técnica, donde se describen los principios de funcionamiento, diseños, operación y lectura de datos del prototipo. En este capítulo se desarrolla la parte teórica, donde se describe: la investigación de la importancia de medir vibraciones, equipos de uso convencional para medición de vibraciones, principios básicos de vibrómetros láser y funcionamiento de vibrómetros láser.

En capítulos subsecuentes relacionados con la parte técnica se presentan los diseños mecánicos, diseños ópticos, diseños electrónicos, así como, operación del prototipo, validación de la medición y sus aplicaciones en metrología para ingeniería mecánica.

## **1.1 Definición del problema**

El problema planteado en esta tesis es el diseño, construcción y operación de un vibrómetro laser de bajo costo basado en la técnica SMI. El vibrómetro tendrá la capacidad de medir la vibración de un objeto con solo enfocar el láser en su superficie.

## **1.2 Justificación**

Actualmente los vibrómetros laser son la herramienta con el grado más alto de precisión y sin contacto físico, para medir vibraciones, lo que implica que sean usados ampliamente en la industria y otras áreas además de mantener al usuario a una distancia segura del objetivo de medición. Existen pocas empresas dedicadas a la creación y comercialización de estos instrumentos; por lo que su precio es alto. Una de las principales finalidades de este proyecto es poder crear un vibrómetro alternativo tan eficaz como uno comercial y de bajo costo gracias a la técnica SMI.

### **1.3 Importancia de medir vibraciones**

Las vibraciones son el movimiento oscilatorio de una partícula o un cuerpo alrededor de su punto de equilibrio. Cuando un cuerpo entero vibra todas sus partes se desplazan en la misma dirección [1]. Las vibraciones están presentes en todos lados y pueden ser normales y no afectar al sistema donde se presenta o pueden ser no deseadas que son el tipo de vibraciones que es importante medir para prevenir daños y fatigas.

Todos los sistemas mecánicos y estructuras, incluyendo el cuerpo humano, pueden soportar vibraciones en rangos específicos sin sufrir problemas, pero son susceptibles a experimentar vibraciones no deseadas fuera de esos rangos. Las vibraciones no deseadas producen esfuerzos dinámicos que originan fallas por la fatiga generada, el caso del cuerpo humano, se transmiten comúnmente a través de las manos.

Por ejemplo, en las personas, las interacciones continuas con vibraciones a ciertas frecuencias pueden generar trastornos dependiendo la magnitud de la frecuencia a la que estuvo expuesto. A altas frecuencias se pueden presentar: lesiones en la muñeca, calambres, reducir sensibilidad en extremidades y comúnmente síndrome de Raynaud. A bajas frecuencias se pueden presentar: problemas lumbares, hernias, trastornos de visión; en muy baja frecuencia trastornos del sistema nervioso central, mareos y vómitos.

En la mecánica, los problemas relacionados con vibraciones no deseadas son un campo muy importante para el estudio ya que están presentes en un sinnúmero de fenómenos, por ejemplo, en maquinaria industrial donde medir vibraciones es la base del mantenimiento

predictivo. Es importante saber que las vibraciones se generan por la transmisión de fuerzas que provocan desgaste y deterioro a causa de fatiga.

Los objetivos del mantenimiento predictivo son: mejorar la calidad de los procesos, extender su vida útil, disminuir gastos de reparación y obtener una mejor producción logrando que las maquinas operen sin problemas por medio de un monitoreo continuo de sus vibraciones, especialmente cuando un sistema de producción depende de ellas [2].

Otro ejemplo donde es importante medir vibraciones es en estructuras como: puentes y edificios de gran altura, los cuales son propensos a oscilaciones por el viento o sismos. Estas oscilaciones pueden generar daños en las estructuras y afectar su funcionalidad, la solución es crear sistemas de amortiguamiento que ayudan a reducir las oscilaciones disipando la energía.

Para diseñar sistemas de control de vibraciones se debe considerar que las oscilaciones debido al viento o sismos son difíciles de predecir, por lo tanto, se debe crear modelos que reproduzcan situaciones reales y sistemas de detección para tener análisis muy precisos [3].

A continuación, se presentan algunos sistemas utilizados para análisis de desplazamientos y vibraciones.

## **1.4 Principios básicos de funcionamiento de vibrómetros láser**

### **1.4.1 Principio de interferometría**

Los vibrómetros láser funcionan por interferometría óptica. Para definir interferometría y sus aplicaciones, es importante conocer algunos conceptos básicos que se describen a continuación.

### **1.4.2 Interferencia óptica**

La irradiancia es la potencia de la radiación electromagnética (luz) por unidad de área. De acuerdo con el sistema internacional sus unidades son  $\frac{W}{m^2}$ .

La interferencia es la interacción de dos o más ondas y en el caso de la luz es la interacción de dos o más ondas luminosas que dan como resultado la suma de las irradiancias de cada onda. El fenómeno de interferencia se divide en dos grupos: división de frente de onda y división de amplitud. En el primer caso el frente de onda es usado como fuente para emitir más ondas y después son unidas para hacerlas interferir. En el segundo caso la amplitud de la onda primaria es dividida en 2 segmentos que recorren distintos caminos ópticos y después se combinan para interferir [6].

Una característica importante de la interferometría es que las ondas que interfieren deben ser coherentes para mantener una relación de fases. En los puntos donde ambas ondas estén en fase se producirá interferencia constructiva y la intensidad será máxima, por otra parte,

si las fases son opuestas (desfase de  $180^\circ$ ) se producirá interferencia destructiva y la intensidad será nula. En el caso en que las ondas no fuesen coherentes, no existiría relación de fases y la interferencia sería inestable; por lo que medirla no sería posible o extremadamente complicado. Para lograr una condición de coherencia ambas ondas deben ser emitidas por la misma fuente, generalmente un láser. La forma de obtener ambos haces de la misma fuente y hacerlos interferir se logra por medio de componentes ópticos como: Divisores de haz (BM), espejos, lentes y prismas. Los vibrómetros comerciales más reconocidos basan sus mediciones en un interferómetro tipo Michelson.

### **1.4.3 Interferómetro de Michelson**

La primera persona que realizó experimentos en metrología de alta precisión fue Albert Michelson (1852-1931), a quien se le considera el padre de la interferometría, por la configuración del interferómetro que actualmente lleva su nombre con el que fue capaz de medir la velocidad de la luz, longitud de onda y frecuencia que emiten diferentes fuentes luminosas.

Los interferómetros de Michelson están basados en la división de amplitud de las ondas. El haz primario es dividido en dos haces por medio de un divisor de haz; uno de los haces es enviado a un espejo fijo y otro a un espejo móvil para que, al desplazarse cierta distancia de modo que ambos haces lleguen con diferentes fases debido a la diferencia de distancia que recorren (camino óptico). Posteriormente son reflejados en la misma dirección y al

llegar de nuevo al divisor de haz se mezclan para generar interferencia. Si el haz resultante de esta interferencia se apunta hacia una pantalla, se puede observar el patrón de interferencia con forma de círculos concéntricos (franja de interferencia). En la práctica uno de los espejos es móvil porque se fija al objeto en movimiento que se pretende estudiar. Cuando las ondas están en fase y el camino óptico entre los brazos cambia en  $\lambda/4$ , por ejemplo, cuando el espejo móvil se desplaza esta distancia, hay un corrimiento en las franjas y genera interferencia destructiva. Si el espejo se desplaza de nuevo  $\lambda/4$  se genera nuevamente interferencia constructiva (Figura 1). Tiempo después la técnica se revolucionó, mejorando la sensibilidad y detección, con la aparición del láser [7]. Estas mejoras han permitido el uso de interferómetros directamente sobre superficies reflejantes, evitando el uso del espejo acoplado a los objetos que se desean monitorear, por ejemplo, objetos con superficies metálicas.

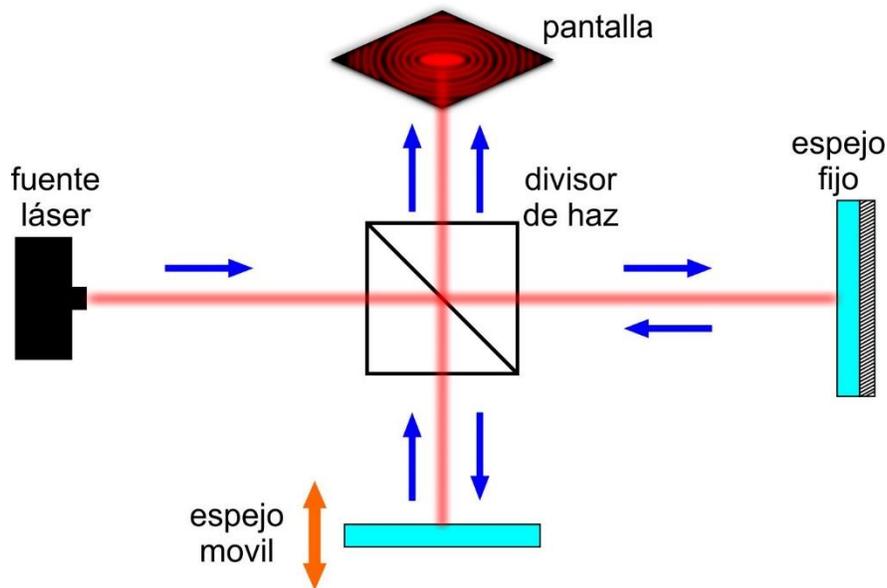


Figura 1. Configuración básica de Interferómetro de Michelson.

### 1.4.4 Efecto Doppler

El efecto Doppler es el cambio en la frecuencia de una onda que produce un objeto en movimiento respecto a un observador, es decir, la frecuencia de las ondas cambia para el observador a medida que el emisor se acerca o se aleja de él. El efecto Doppler es aplicable a cualquier tipo de onda y dado que la luz es onda electromagnética también aplica este fenómeno. Por ejemplo, si se dirige luz a un objeto reflejante en movimiento, como resultado, la luz reflejada experimenta un corrimiento en su frecuencia, estos cambios en la frecuencia están dados por la siguiente ecuación [9]:

$$\Delta f_D = \frac{2v}{\lambda}$$

Donde

$\Delta f_D$  = cambio en la frecuencia

$v$  = velocidad del objeto

$\lambda$  = longitud de onda del emisor.

Cuando el objeto se aleja del emisor, la luz que refleja tiene una frecuencia menor, por lo que experimenta un corrimiento hacia el rojo, si el objeto se acerca hacia el emisor la frecuencia reflejada es mayor, por lo que experimenta un corrimiento hacia el violeta (Figura 2). Este efecto ha permitido crear herramientas de alta precisión para aplicaciones metrológicas como velocímetros Doppler y vibrómetros Doppler.

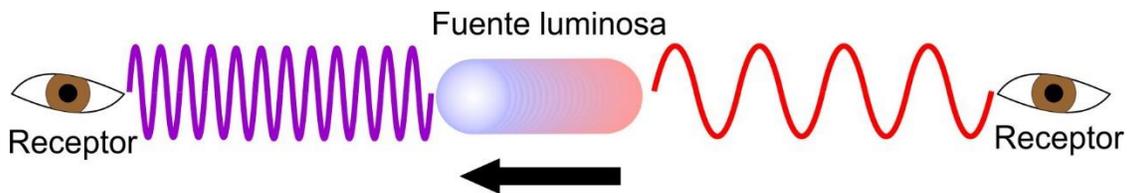


Figura 2. Efecto Doppler en la luz.

El vibrómetro Doppler funciona gracias al efecto Doppler de la luz reflejada en la superficie de un objeto en movimiento para determinar frecuencias, velocidades y desplazamientos.

### 1.4.5 Batido de ondas

Si se superponen dos ondas con frecuencias ligeramente diferentes, por ejemplo, la luz de un láser y la misma luz reflejada por la superficie de un objeto en movimiento, el cual le aporta un corrimiento a su frecuencia debido al efecto Doppler, se producirá el conocido

batido de ondas. Es decir, cuando dos frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , ligeramente diferentes se superponen, se producen ondas con la suma y la resta de ambas frecuencias:

$$\text{sen}(2\pi f_1 t) + \text{sen}(2\pi f_2 t) = 2\cos(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t) \text{sen}(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t)$$

El termino senoidal es equivalente a una onda con la frecuencia promedio y está modulada por otra onda armónica que depende de la mitad de la diferencia de las frecuencias. Este término es el responsable del batido de ondas, y está asociado a una envolvente de la onda que varía en el tiempo. Gracias a este fenómeno es posible detectar la señal en un vibrómetro utilizando frecuencias ópticas.

## 1.5 Interferometría de Automezclado SMI

SMI es una técnica de interferometría con una configuración simple y un amplio rango de aplicaciones para metrología. Su configuración requiere una menor cantidad de componentes que un interferómetro común; incluso es posible utilizar un láser de cavidad Fabry Perot, el cual se describe más adelante, para poder construir un vibrómetro a un bajo costo.

SMI, al igual que otras técnicas, funciona debido al efecto Doppler. Cuando la luz del láser es enfocada en un objeto que se encuentra vibrando, una pequeña parte de ella es reflejada, el haz que regresa se introduce dentro de la cavidad del láser que actúa como fuente de luz y detector (Figura 3). Dentro de la cavidad se mezclan ambos haces y producen una

modulación de amplitud (AM) y una modulación de frecuencia (FM) debido al batido de la luz. Estas modulaciones AM y FM, centradas en la frecuencia de la luz sin perturbar; dependen de la posición, velocidad y aceleración del objeto. Por lo tanto, la luz del láser luego del batido o interferencia transporta información de la vibración y esta luz se puede detectar y analizar para caracterizar la vibración.

Como la señal AM se obtiene fácilmente al medir la potencia de salida del láser, se ha demostrado que SMI es un interferómetro auto-alineado sencillo y de bajo costo.

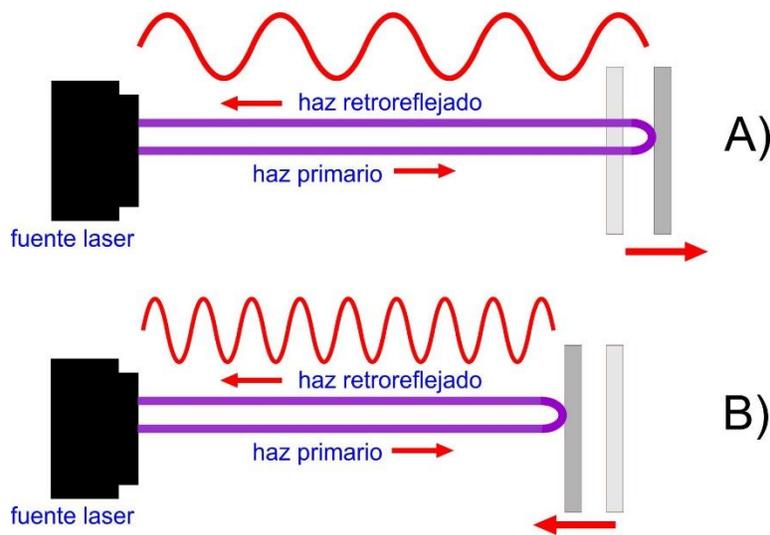


Figura 3. Ilustración del efecto Doppler en un experimento de SMI. A) objeto alejándose de la fuente. B) objeto acercándose a la fuente

Las principales ventajas de SMI son [8]:

- 1.- Utiliza un considerable número menor de componentes que otros vibrómetros.

2.- Debido a su configuración simple, pero sobre todo al uso de láseres semiconductores de tamaños milimétricos, se puede crear un vibrómetro en un diseño compacto.

3.- La detección es rápida que permite una detección en tiempo real y es fácil obtener datos en el orden de nanómetros.

4.- Se pueden obtener resultados directos de superficies rugosas.

5.- La información es transportada por el haz del láser, esto permite obtener información de cualquier lugar simplemente dirigiendo el haz a un detector para su posterior análisis.

Para realizar la lectura de la señal la potencia se divide con un divisor de haz y posteriormente se introduce a un fotodetector que genera una señal eléctrica proporcional a la cantidad de luz que recibe. La técnica convencional SMI detecta AM, para este proyecto se muestra a continuación una variante de SMI basada en detectar señal FM por medio de rejillas de difracción.

### **1.5.1 Láser Fabry Perot (FPL)**

El FPL es un láser de tipo semiconductor compuesto por una región activa al centro y dos espejos paralelos, a esto se le conoce como resonador de Fabry Perot donde se generan ondas estacionarias. A estas ondas se les conoce como modos longitudinales y cada uno de los modos permitidos en la cavidad corresponde a una longitud de onda emitida. Estos láseres son muy sensibles a la retroalimentación óptica producida por espejos u otras

superficies reflectoras, lo que los convierte en una excelente opción para experimentos y aplicaciones de interferometría de automezclado.

## **1.6 Estado del Arte**

La invención del láser, cuyo nombre es formado por sus siglas en inglés LIGHT AMPLIFICATION SIMULATED EMISSION OF RADIATION, fue un suceso que amplió los horizontes de la investigación y la industria, y desde entonces ha sido un instrumento utilizado en diversas aplicaciones y de gran potencial para muchas más. El descubrimiento del láser fue un accidente, puesto que, los experimentos realizados tenían una finalidad diferente a la de crear un láser, debido a esto, no se había pensado en las aplicaciones y con el paso de los años se fueron descubriendo, por ejemplo, el uso del láser para metrología.

Tiempo después se realizaron técnicas de interferencia, descritas antes, pero haciendo uso del láser; con la ventaja de que la alta coherencia espacial y temporal del láser permite mediciones con muy buena precisión, sin embargo, en la actualidad un equipo para medir vibraciones con láser es muy costoso, por lo que se siguen empleando otros métodos más económicos como los que se describen a continuación.

## **1.6.1 Métodos de medición de vibraciones y desplazamiento**

Existen diversos tipos de herramientas para medir vibraciones que se pueden seleccionar de acuerdo a ciertos criterios, tales como, el campo de aplicación, tipo de análisis, rango de frecuencias y velocidad. Las herramientas más utilizadas habitualmente en medición de vibraciones y desplazamiento son los transductores, los sensores LVDT y los vibrómetros láser. A continuación, se describen brevemente estos sistemas.

### **1.6.2 Acelerómetros**

Los acelerómetros son transductores utilizados para medir aceleraciones, en su amplio rango de aplicaciones, son reconocidos como la herramienta estándar y la más usada para la medición de vibraciones debido a su bajo costo. La forma en que un acelerómetro mide vibraciones es replicando las características de la vibración del objeto que se está analizando. Para su correcto funcionamiento se debe adherir a la superficie del objeto haciendo contacto físico. La función del acelerómetro es convertir el movimiento mecánico que se produce en el transductor, debido a cambios en la velocidad del objeto donde está situado, en una señal eléctrica proporcional para poder extraer datos y analizarlos. Los acelerómetros deben ser seleccionados para rangos de frecuencia específicos de acuerdo a la frecuencia en que se va a trabajar. Para seleccionar correctamente el acelerómetro que se empleará en el análisis, se debe conocer la amplitud de desplazamiento, temperatura de

trabajo y el rango de frecuencias de vibración que se desea medir. La siguiente tabla muestra el rango típico de operación de algunos transductores [4].

*Tabla 1. Rangos de operación de acelerómetros*

<i>Tipo de transductor</i>	<i>Rango típico de frecuencia (Hz)</i>
<i>Desplazamiento sin contacto</i>	<i>0 - 10,000</i>
<i>Desplazamiento con contacto</i>	<i>0 - 150</i>
<i>Velocímetro sísmico</i>	<i>10 - 1,000</i>
<i>Acelerómetro de uso general</i>	<i>2 - 7,000</i>
<i>Acelerómetro de baja frecuencia</i>	<i>0.2 - 2,000</i>

### **1.6.3 Sensores LVDT (Sensores de desplazamiento inductivos)**

Los sensores LVDT son transductores para medición de desplazamientos, presión, fuerza, nivel y flujo entre otras aplicaciones comúnmente usadas en la industria. Estos sensores basan su funcionamiento en el movimiento de un núcleo que se desplaza dentro del cuerpo del sensor que contiene bobinados, debido al campo magnético, se genera una señal eléctrica equivalente al desplazamiento, esta señal puede ser analizada con equipos electrónicos. Las principales ventajas de los LVDT son: buena sensibilidad, linealidad, durabilidad y bajo costo. La principal limitación de estos sensores es su rango de medición que va desde los pocos mm hasta 500 mm [5].

### **1.6.4 Vibrómetros láser**

Los vibrómetros láser son una herramienta que ha tenido un gran esplendor en los últimos años y se han convertido en los dispositivos más utilizados para la ciencia e industria en aplicaciones de medición de vibraciones, velocidades y desplazamientos. A pesar de su elevado costo, los vibrómetros láser, continúan desplazando a los transductores por su alto nivel de precisión, gran ancho de banda y su funcionalidad para un sin fin de aplicaciones, además de no requerir contacto físico en la superficie del objeto que se está analizando proporcionando una señal más precisa y mayor seguridad para el usuario. Desde hace más de 30 años se han utilizado los vibrómetros láser y se han mejorado con el paso del tiempo extendiendo sus aplicaciones siendo cada vez más precisos, compactos y obteniendo mejores resultados. Actualmente estos dispositivos no han alcanzado su máximo potencial y una de las principales áreas de mejora está en optimizar la señal a ruido, debido a que el ruido se puede acoplar de diversas fuentes, como señales externas o mala alineación óptica o análisis sobre superficies poco reflectoras [5]. Sabiendo esto se han realizado investigaciones para seguir mejorando la lectura de señal de los vibrómetros, tal es el caso de SMI y su variante ESMI, que mejoran la señal a ruido y el problema de alineación.

### **1.6.5 Vibrómetros Doppler comerciales**

Actualmente existen diferentes empresas especializadas en construir y manufacturar vibrómetros Doppler para diferentes rangos de mediciones, necesidad de medición o en

uno, varios puntos o escaneo. El vibrómetro ESMI es un vibrómetro que mide en un solo punto desde aproximadamente 6 Hz hasta más de 40 kHz. La construcción de un vibrómetro ESMI es de bajo costo ya que requiere menos componentes que un vibrómetro convencional y utiliza componentes más económicos. En las siguientes secciones se hablará de algunas características generales de vibrómetros comerciales como su rango de medición de frecuencia, sus costos aproximados y tipo de medición. El vibrómetro de este proyecto es un vibrómetro que mide en un solo punto, sin embargo, se describen otros dos tipos de vibrómetros más complejos para dar una idea del rango de medición, funcionamiento y precio, esta información puede ser útil para futuros proyectos.

### ***Vibrómetros de un punto***

Son los vibrómetros láser más simples y económicos en el mercado para aplicaciones donde solo es necesario medir la vibración en un solo punto del objeto. En algunas empresas, líderes en manufactura y comercio de estos equipos, el precio de estos vibrómetros aproximadamente va desde los 15,000 dólares para mediciones en un rango de pocos Hz hasta 8kHz.

### ***Vibrómetros multipuntos***

Este tipo de vibrómetros permite medir simultáneamente la vibración en varios puntos de un objeto para poder analizar el tiempo y frecuencia de la deflexión de un objeto. En algunos vibrómetros su interfaz permite crear figuras en 3D y visualizar la vibración a partir de la lectura del vibrómetro, el precio, en empresas líderes, de equipos con estas características va desde 28,000 dólares.

### ***Vibrómetros de escaneo***

Este tipo de vibrómetro realiza un escaneo en ciertos puntos definidos previamente por el usuario en la interfaz del vibrómetro. Permite medir vibraciones estructurales para resolver problemas relacionados con dinámica estructural y acústica. Estos vibrómetros son de los más avanzados en el mercado, por lo que su precio es alto, las empresas líderes los venden en un precio aproximado desde 190, 000 dólares. Los equipos más avanzados permiten escanear la superficie seleccionando los puntos donde se requiere hacer la medición y mediante un software, a partir de un archivo CAD, se pueden obtener las formas de deflexión.

#### **1.6.6 Vibrómetros láser basados en la técnica de SMI (Señal AM)**

En la literatura científica se pueden encontrar invenciones y desarrollos tecnológicos que basan su funcionamiento en la técnica de SMI [8]. Por ejemplo, Giuliani et al., [16] presentaron en 2002 un vibrómetro más simple y versátil que un vibrómetro convencional basado en la detección de la señal SMI de régimen moderado, donde es posible detectar vibraciones con resolución de  $\lambda/4$  monitoreando la señal de forma activa. Esto permite extender el rango dinámico mientras mantiene buena sensibilidad. El prototipo de este vibrómetro puede medir frecuencias desde 0.1 Hz hasta 70 kHz, amplitudes de hasta 26 mm p-p; a distancias de 6 a 60 cm,

En 2012, Magnani y sus colaboradores publicaron el artículo [17] donde describen la implementación de un sensor para medir vibraciones sin contacto basado en obtener señal

a partir de un interferómetro SMI con un sistema de autoenfoco integrado con el propósito de automatizar y facilitar su uso sin necesidad de un operador experto.

En el mismo año Francisco J. Azcona y sus colaboradores aplicaron la técnica SMI para la medición de deformación de materiales estructurales sometidos a cargas dinámicas como lo describen en la referencia [18]. Como ejemplo para caracterizar las propiedades de los materiales, realizaron ensayos de deformación en una viga de perfil I, utilizando un sensor LVDT y un sensor SMI. En los resultados muestran una diferencia entre 1 y 2 micras entre ambos sensores.

Sin embargo, todos los vibrómetros laser mencionados están basados en la técnica de SMI convencional y obtienen la señal al detectar y analizar la potencia del láser (señal AM).

No fue hasta 2015 [19] en que por primera vez se utilizó la señal SMI del canal FM al demodularla de manera simple con filtros de absorción óptica, permitiendo no solo medir el canal FM, sino amplificar la señal hasta en 2 órdenes de magnitud con respecto a la señal convencional obtenida del canal AM. En 2017 se reportaron dos nuevas técnicas para demodular la señal FM [9, 20]. Gracias a estas innovaciones, la técnica SMI ha adquirido un gran potencial para desarrollar vibrómetros que operen en un rango dinámico más amplio.

En la siguiente sección se describe un método utilizado en la referencia [9] para obtener la señal SMI a partir del canal FM, ya que es el método implementado en el desarrollo de esta tesis.

### 1.6.7 Obtención de señal FM

La señal FM no se puede medir por métodos directos ya que el corrimiento de frecuencia está impreso en la frecuencia de la luz, que es mayor a  $10^{15}$  Hz y no existen detectores capaces de medir ese rango de frecuencias. Sin embargo, se ha reportado recientemente un novedoso enfoque para acceder a la señal FM-SMI [9] en la que es posible mejorar la señal más allá del límite convencional provisto por la detección AM-SMI. Este enfoque, llamado interferometría de automezclado mejorada (ESMI, acrónimo en inglés de Enhanced Self-Mixing Interferometry), se basa en la conversión de modulación de frecuencia a intensidad (FM a IM) cuando la luz de un láser que transporta la señal SMI es dirigida a una rejilla volumétrica de Bragg (VBG), la cual se describe en el siguiente párrafo, utilizada como filtro de borde [15].

La VBG es una rejilla de difracción con planos de Bragg que tienen índices de refracción variables grabados en un material foto-termo-refractivo. Cuando una luz, de múltiples longitudes de onda, es introducida en la VBG una pequeña parte de luz con una longitud de onda específica es reflejada y el resto se transmite. Las rejillas VBG pueden fabricarse para un gran rango de longitudes de onda entre 350 y 2500 nm y un estrecho ancho de línea menor a 20 pm [14]. El ancho espectral de la VBG está determinado por el número de planos de Bragg que la luz atraviesa a través del vidrio. La longitud de onda se selecciona de acuerdo al ángulo de entrada de la luz a la VBG.

El prototipo que diseñamos y describimos en esta tesis se basa en la medición de la señal FM, que al demodularse, por medio de una VBG utilizada como filtro de borde (Figura 4), puede detectarse con un fotodiodo.

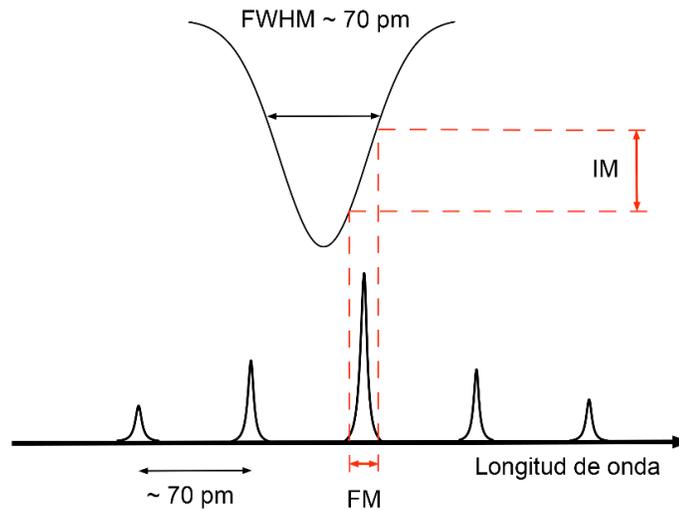


Figura 4. Demodulación FM.

El vibrómetro utiliza un láser de cavidad Fabry Perot que emite longitudes de onda alrededor de 405 nm. Los modos longitudinales de este láser están separados aproximadamente 70 pm. Es posible convertirlos individualmente en intensidad modulada (IM) que puede ser detectada por el fotodiodo como se describe en [9]. El haz del láser que es separado por el BS (haz de entrada) entra con un ángulo al filtro VBG donde se transmiten los modos longitudinales que no coinciden con el filtro y el modo longitudinal que coincide espectralmente con el filtro es reflejado (haz de salida). El modo longitudinal

se puede seleccionar al variar el ángulo del haz de entrada (Figura 5). ESMI provee una mejora significativa en la señal con respecto a SMI, extendiendo sus aplicaciones. De este modo, ESMI permite tener una mayor sensibilidad debido a que la señal puede ser amplificada hasta 2 órdenes de magnitud (con respecto a la señal AM) dependiendo de las características del filtro [3].

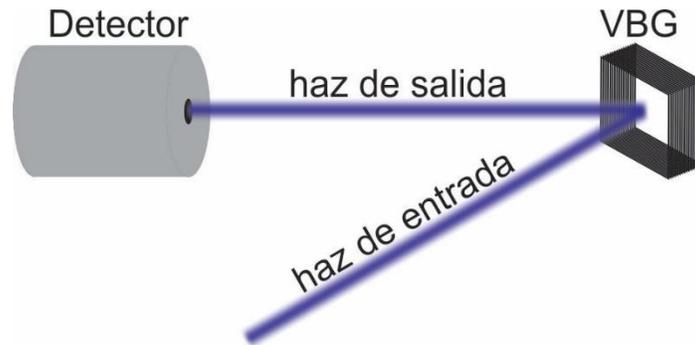


Figura 5. Configuración de la VBG. El haz modulado se dirige a la rejilla volumétrica de Bragg (VBG) y un solo modo longitudinal es reflejado con un ángulo de salida hacia el detector.

## **1.7 Objetivos**

### **1.7.1 Objetivo general:**

Diseñar y construir un vibrómetro para la medición de desplazamientos en rangos sub-micrométricos. El prototipo tendrá un tamaño compacto con dimensiones aproximadas de 70x40x40 cm, gracias a esto, podrá utilizarse en laboratorios y en mediciones de campo bajo ciertas condiciones; como un entorno donde no existan perturbaciones que puedan influir en la medición del vibrómetro.

### **1.7.2 Objetivos particulares:**

- Diseñar la estructura, configuración óptica y electrónica del vibrómetro.
- Construcción y ensamblaje de los componentes.
- Implementación de instrumentos electrónicos como: amplificadores y fotodetectores para detectar la señal y posteriormente procesarla con un osciloscopio.
- Calibración de la señal del vibrómetro.
- Validación del vibrómetro por medio de vibraciones conocidas.

## **Capítulo 2**

### **Diseños del prototipo**

En este capítulo se presentan los diseños mecánicos, electrónicos y ópticos del prototipo con una breve descripción de los componentes diseñados y comerciales utilizados.

#### **2.1 Diseño mecánico**

En esta sección se describen los diseños de los componentes mecánicos del vibrómetro y los componentes opto-mecánicos comerciales utilizados dentro del prototipo. Los diseños mecánicos se realizaron con el uso de un software de CAD y tienen como objetivos: proteger del ambiente a los componentes internos, permitir que el prototipo sea portable (Figura 6) para poder utilizarlo dentro y fuera de laboratorio, y aislar señales externas. Los componentes opto-mecánicos tienen la finalidad de fijar los componentes ópticos.



*Figura 6. Estructura del vibrómetro.*

Los componentes mecánicos diseñados y construidos son los siguientes:

**1. Chasis de fotodiodo**

El chasis del fotodiodo es una parte esencial para dar soporte, estabilidad y seguridad al fotodiodo. El diseño consta de 2 piezas, maquinadas en torno, que se unen ejerciendo una presión, suficiente con las manos, sin necesidad de utilizar tornillos y siendo un diseño simple. Contiene una perforación a la entrada con un diámetro igual al del área activa del fotodiodo y una perforación a 90 grados que permite el ensamblaje con un poste comercial (Figura 7). El diseño está conformado por diferentes diámetros internos, perforados con brocas, que se ajustan al tamaño del fotodiodo seleccionado para el vibrómetro, los cables de conexión y el conector BNC que permitirá conectarlo al amplificador.

Pasos para la construcción:

1. Diseño en software de CAD
2. Creación de planos para el posterior maquinado

3. A partir de una barra de aluminio se maquinaron ambas piezas del ensamblaje hasta la dimensión deseada.
4. Se realizaron las perforaciones necesarias para instalar el fotodiodo, conector BNC y el poste.
5. Se realizó una ranura con el torno para colocar un orring con la finalidad de que al ensamblar ambas piezas se mantengan fijas.



*Figura 7. Chasis del fotodiodo.*

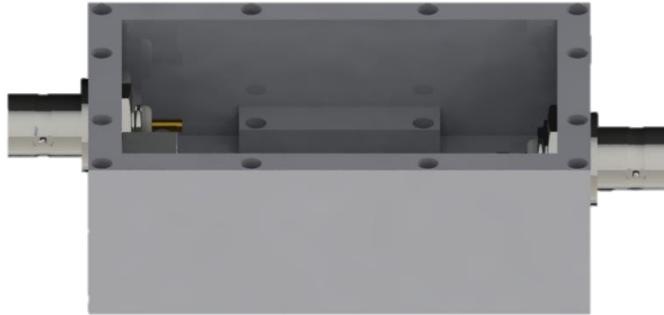
## 2. Chasis de amplificador

Esta pieza (Figura 8) hace la función de proteger al amplificador de los campos eléctricos estáticos ya que, al ser metálico, en su interior, el campo es nulo [4]. El ensamblaje está construido por dos piezas construidas en aluminio que se unen con tornillos, tiene 3 perforaciones (2 traseras y 1 frontal) para colocar terminales de alimentación, entrada y salida.

Pasos para la construcción

1. Diseño en software de CAD.
2. Creación de planos necesarios para el posterior maquinado.
3. A partir de un prisma rectangular se realizó el vaciado correspondiente hasta las medidas de los planos, en una fresadora, donde se colocará la tarjeta del amplificador.

4. Se realizaron las perforaciones necesarias para ensamblar la tapa, tarjeta y conectores correspondientes (alimentación de voltaje y conectores BNC).



*Figura 8. Chasis de amplificador.*

### 3. Chasis general

El chasis general, (Figura 9), tiene la finalidad de que el prototipo del vibrómetro sea portable protegiendo y fijando componentes internos. El ensamblaje está compuesto por:

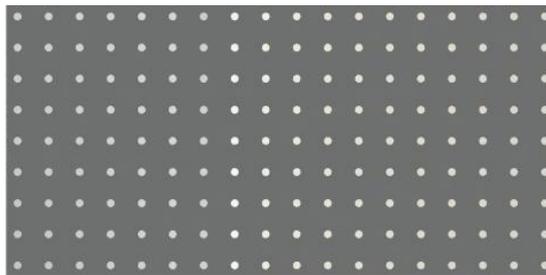
- A) Placa de acero inoxidable perforada: las perforaciones son de  $\frac{1}{4}$ '' separadas por 1'' entre cada una (Figura 10) con el fin de alinear y fijar los componentes.

Pasos para la construcción:

1. Creación de planos en software para el posterior maquinado.
2. A partir de una placa de acero inoxidable, se realizaron cortes hasta las dimensiones deseadas.
3. Se marcaron manualmente los puntos donde se realizó cada una de las perforaciones y posteriormente se perforo con un taladro de banco.
4. Las roscas se maquinaron manualmente con un maneral y machuelo.



*Figura 9. Chasis general construido en aluminio*



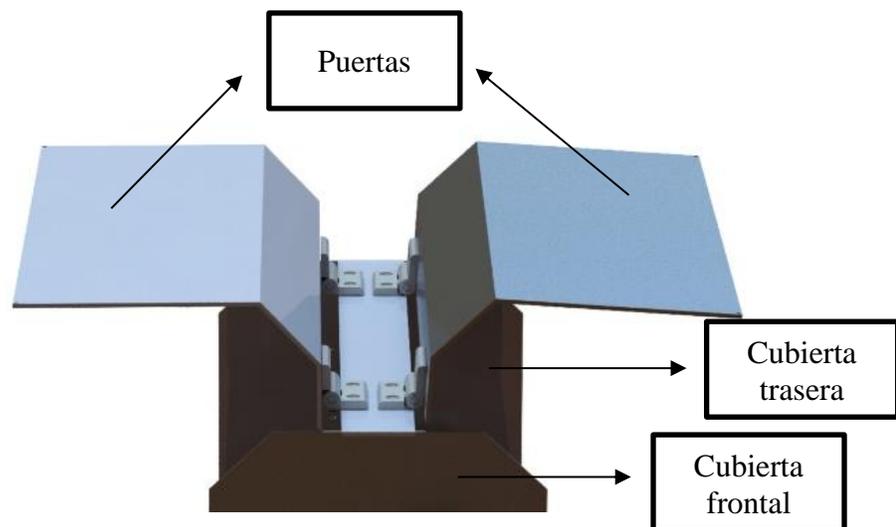
*Figura 10. Base para fijación de componentes ópticos.*

B) Puertas de gran abertura, cubierta frontal y trasera: se diseñaron para tener fácil acceso por ambos laterales a los componentes ópticos y amplio espacio para manipularlos, ya que las puertas incluyen una parte del techo del chasis (Figura 11).

Pasos para la construcción:

1. Diseño en software de CAD.
2. Creación de planos.
3. Se compró una placa de aluminio con la dimensión de ambas puertas y cubiertas frontal y trasera.
4. Se realizó el corte hasta las dimensiones de las puertas.

5. Se doblaron hasta obtener los ángulos deseados con el uso de una dobladora de lámina manual.
6. Se realizaron perforaciones y cuerdas para ensamblar las bisagras.
7. Se cortaron las cubiertas frontal y trasera, con una cortadora de lámina, hasta unos milímetros extra para posteriormente rectificarlas manualmente con un esmeril.
8. Se realizó el corte del soporte superior hasta las dimensiones deseadas con la cortadora de lámina y se maquinaron las roscas manualmente para ensamblar las bisagras.
9. Se realizaron las perforaciones en las cubiertas, en la frontal, donde pasara el haz del láser y en la trasera donde pasaran los cables.



*Figura 11. Puertas de gran apertura.*

#### 4. Componentes opto-mecánicos

A) Montura rotatoria comercial rsp1 (Figura 12) de Thorlabs®: esta montura, mediante una adaptación, permite modificar el ángulo de la rejilla VBG para tener un control preciso del modo longitudinal del láser con el que se desea trabajar.



Figura 12 Montura rotatoria.

B) Postes, porta-postes y bases comerciales (Figura 13) Thorlabs®: estos componentes se ensamblan entre sí y con la base de los componentes ópticos para mantenerlos en una posición fija requerida.

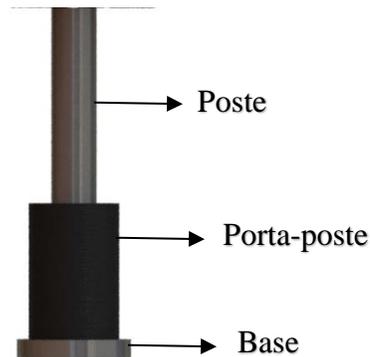


Figura 13. Base, porta-poste y poste de Thorlabs®.

C) Clamps comerciales Thorlabs (Figura 14): permite la sujeción de la base de los porta-postes en la base del vibrómetro.



*Figura 14. Clamps Thorlabs® con ranura para fijar, con un tornillo, los porta-postes a una mesa óptica*

## **2.2 Diseño óptico**

El esquema óptico está conformado por componentes comerciales; la configuración no requiere gran cantidad de componentes y la alineación es simple por ser un interferómetro de un brazo (Figura 15). En la generación de interferencia no se requiere alineación óptica debido a que se produce en un solo brazo. El haz de salida del láser se enfoca con un lente en la superficie que se va a analizar y su amplitud se divide en dos caminos con una ventana de borde, que funciona como divisor de haz (BS), para dirigir uno de los haces reflejados a la rejilla VBG para realizar la conversión FM a IM. El haz con IM es enviado al detector para su posterior análisis.

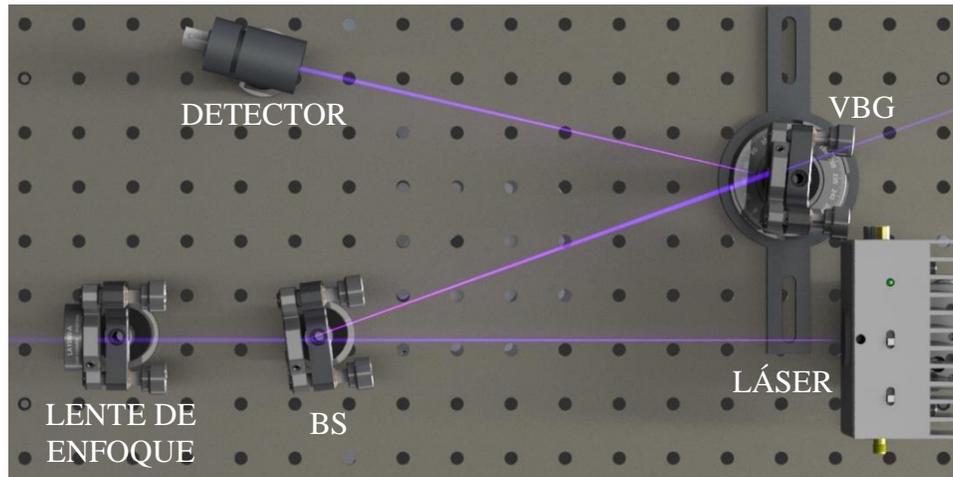


Figura 15. Alineación óptica del vibrómetro.

### ***Instrumentación empleada***

Los instrumentos utilizados para el diseño óptico son los siguientes:

1. Diodo láser: Thorlabs® L405P20

El diodo láser (Figura 16) utilizado tiene un diámetro de 5.6mm, opera a una longitud de onda de  $\lambda=405\text{nm}$  y una potencia de 20mW.



Figura 16. Diodo láser.

2. Ventana de borde

La ventana de borde (Figura 17), o cuña, empleada como divisor de haz permite obtener 2 haces reflejados con un ángulo de 0.5 grados para evitar la interferencia

entre ambos haces como sucede en los divisores de caras paralelas. La ventana transmite aproximadamente el 92% de la potencia incidente.



*Figura 17 Ventana de borde o cuña.*

### 3. Lente de enfoque

Los lentes de enfoque permiten enfocar el haz del láser en el objeto que se pretende analizar a una distancia específica de acuerdo con la distancia focal de la lente. Para distancias relativamente largas se puede utilizar un sistema de lentes en configuración telescópica.

### 4. Filtro pasa banda (BPF) BragGrate™

Se utilizó un BPF BragGrate™, es una Rejilla de Bragg Reflectante (RGB), diseñado para operar con una longitud de onda de  $\lambda=405\text{nm}$  que permite el filtrado espacial de los modos longitudinales del láser.

## 5. Lente colimadora

Permite que el haz de salida de la fuente láser no diverja conforme se propaga hacia el objetivo. Se utilizó una lente esférica C230TMD-A (Thorlabs).

## 2.3 Diseño electrónico

El diseño electrónico del vibrómetro integra el sistema de control del láser para mantener una corriente y temperatura estables, detección por medio de fotodiodos, amplificación de la señal obtenida por el detector y procesamiento gráfico de señal para poder analizarla.

### *Componentes empleados:*

1. Amplificador de trans-impedancia.

El amplificador de trans-impedancia (Figura 18), también conocido como conversor de corriente a voltaje, permite obtener un voltaje proporcional a la corriente que se le induce y con una resistencia ( $R_f$ ) adquiere un factor de proporcionalidad; la relación resultante está dada por:

$$V = -R * I$$

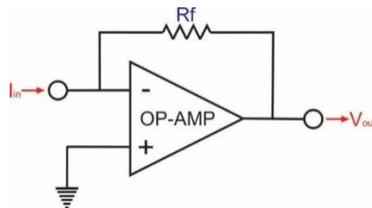


Figura 18. Amplificador de trans-impedancia.

2. Montura Thorlabs® TCLDM9

La montura permite la conexión del control de corriente y temperatura del láser, además de fijarlo a un soporte.

3. Controladores de corriente y temperatura del láser

- Thorlabs® LDC205C

Permite controlar la corriente del diodo láser y fijar una corriente máxima de operación para asegurar que no se exceda el límite de las especificaciones del láser.

- Thorlabs® TED200C

Permite mantener temperatura constante en el láser para mantener la longitud de onda estable.

4. Fotodiodo: S5973 Hamamatsu®

Permite la detección del haz de láser generando una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de fotones que recibe.

5. Procesamiento de señal (OSCILOSCOPIO)

Este equipo recibe el voltaje del detector en función del tiempo y la digitaliza.

## 2.4 Gastos aproximados

Se muestran los gastos aproximados, de materiales que se utilizaron para construir el vibrómetro, debido a que el precio de algunos componentes está disponible en dólares y se estimó una conversión a pesos (1 USD = 18 pesos), y otros componentes ya existían en el laboratorio.

Amplificador .....	\$100
Montura de láser .....	\$11,300
Controlador de corriente .....	\$19,000
Controlador de temperatura .....	\$18,500
Fotodiodo .....	\$679
Diodo láser .....	\$925
Ventana de borde .....	\$2300
Lentes de enfoque .....	\$1500
Filtro pasa-banda (rejilla).....	\$18,500
Lente colimadora .....	\$1,250
Materia prima (aluminio).....	\$1,800
<b>Componentes optomecánicos</b>	
Montura rotatoria .....	\$1,500
Porta-postes x5.....	\$750
Postes x5 .....	\$450
Bases x5 .....	\$170
Clamps x5 .....	\$230
<b>TOTAL.....</b>	<b>\$78,954</b>

## Capítulo 3

### Funcionamiento y Validación

La vibración es un movimiento de vaivén de un objeto en cualquier dirección del espacio, desde su posición de equilibrio. Las características más importantes de las vibraciones son: frecuencia, desplazamiento, velocidad y aceleración. Con SMI es posible detectar y cuantificar la vibración a través de la señal modulada que es representada en una forma de onda, detectada por un fotodetector y analizada por medio de un osciloscopio. Para ejemplificar y validar la medición del vibrómetro se utiliza una bocina acoplada a un generador de funciones, un subwoofer para medir vibraciones de baja frecuencia y un motor a pasos programado para realizar desplazamientos en longitudes específicas en orden de micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). La lectura de señal del vibrómetro se realiza por medio de un osciloscopio y se analiza matemáticamente (Figura 19).

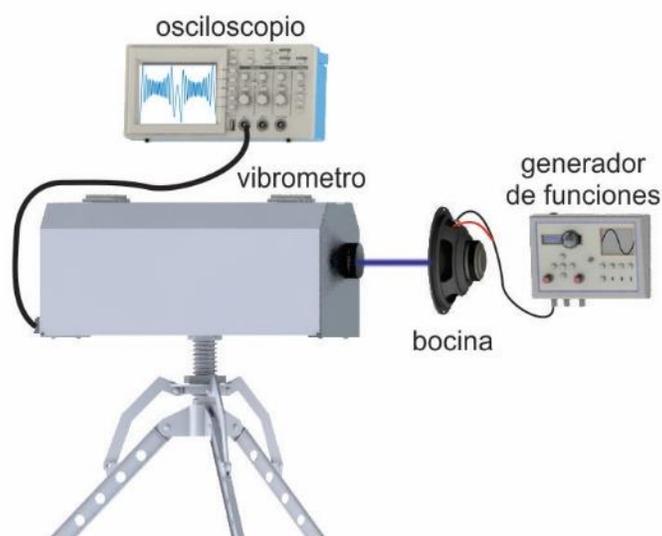


Figura 19. Lectura de señal de vibrómetro SMI.

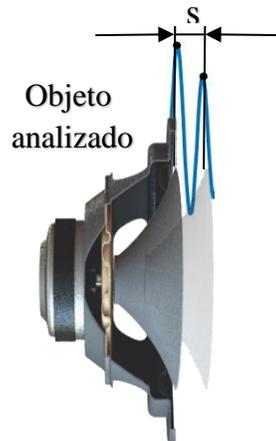
### 3.1 Lectura de señal

En la medición de vibraciones, la señal obtenida es una forma de onda resultante de las condiciones de frecuencia, velocidad y aceleración de la vibración. Un objeto vibrando tendrá una velocidad y aceleración variables. Si hay varias frecuencias la vibración resultante será la suma de todas las frecuencias y la forma de onda será compleja [10].

Particularmente en los vibrómetros láser la señal resultante depende de la superposición de dos ondas con frecuencias ligeramente diferentes, la frecuencia del láser y la frecuencia con el corrimiento Doppler, que se obtiene del haz reflejado por el objeto cuando está vibrando. Al sumarse se produce una forma de onda resultante, modulada en amplitud.

En velocidades constantes se tendrá una modulación constante para cada ciclo de la vibración. Al igual que en otras técnicas de interferometría, la fase de la señal modulada es  $\varphi = 2ks$  donde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  es el vector de onda y  $s$  es la distancia recorrida por el objeto reflejante. El desplazamiento correspondiente a un periodo en la señal modulada representa la resolución de la medición y es proporcional a la longitud de onda del láser, es decir, la resolución espacial del interferómetro es:  $\Delta s = \frac{\lambda}{2}$  (Figura 20).

Posteriormente (Figura 21) se muestra la gráfica de la señal obtenida por el prototipo al dirigir el haz del láser a una bocina, emitiendo ondas senoidales a 100Hz y las gráficas de posición, velocidad y aceleración.



*Figura 20. Desplazamiento (s). Un desplazamiento  $s = \lambda / 2200 \text{nm}$  del objeto analizado, en este caso la membrana de una bocina, es igual a la distancia entre dos crestas (mostradas de color azul) en la señal de vibrómetro.*

En la primera figura se muestra el desplazamiento de un ciclo de la bocina en un periodo de 10ms, valles y crestas de  $\pm 20\text{mV}$  de amplitud que llamaremos mínimos y máximos, respectivamente. Se pueden observar cierto número de ondas de menor amplitud que contaremos a través del número de crestas o picos durante cada medio ciclo de desplazamiento de la bocina. Estas ondas representan corrimientos de franjas de interferencia óptica, el número de picos es proporcional al desplazamiento máximo a máximo en un vaivén de la bocina.

Sabiendo que el láser utilizado opera a una longitud de onda de  $\lambda = 405\text{nm}$  y que el desplazamiento que representa cada franja es:  $s = \frac{\lambda}{2}$ , es posible obtener el desplazamiento en medio ciclo la bocina multiplicando el número de picos que hay en 5ms por 200nm, por lo tanto, la bocina se desplaza  $3\mu\text{m}$ .

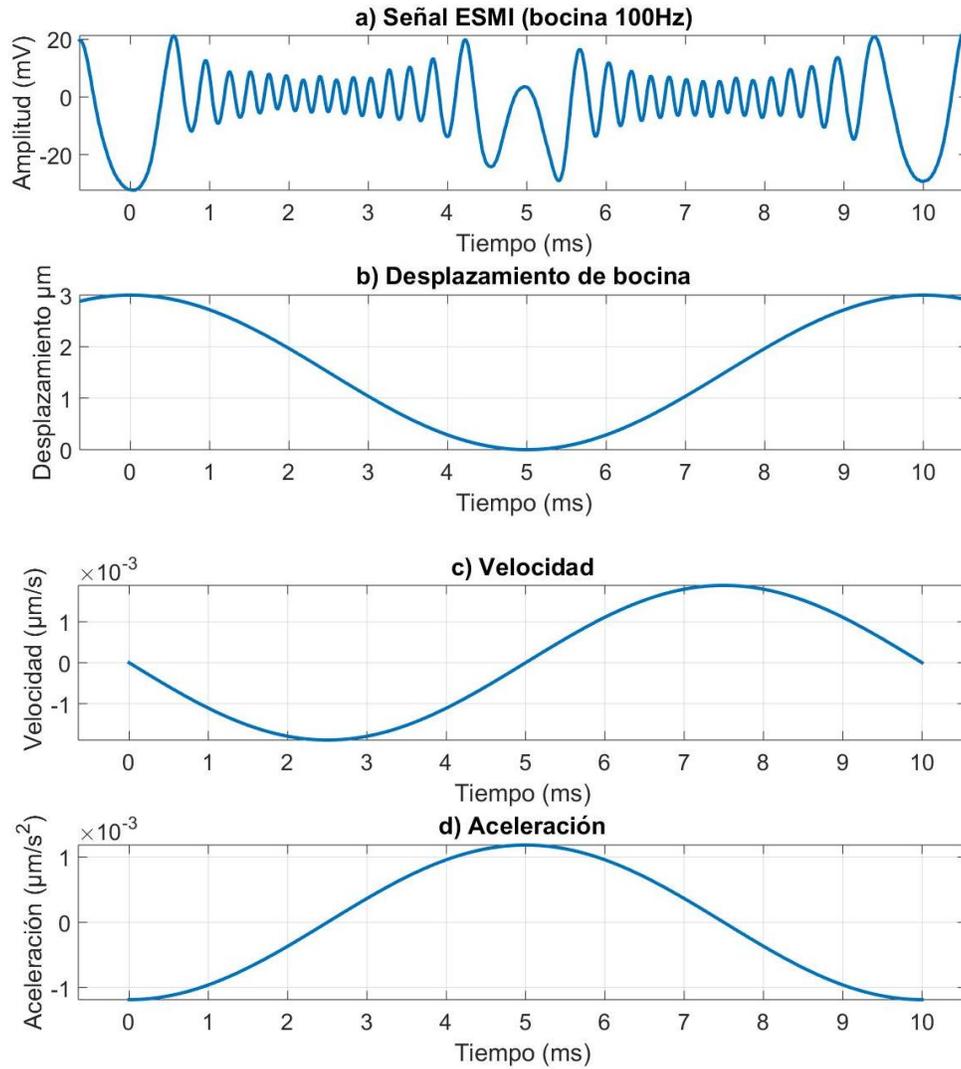


Figura 21. Lectura de señal: graficas de posición, velocidad y aceleración

- a) Señal ESMI obtenida por el Vibrómetro: ciclo completo (vaivén) de bocina con frecuencia = 100Hz.
- b) Desplazamiento de bocina (ciclo completo): en 5 milisegundos la bocina recorre 3 $\mu\text{m}$  en una dirección y en los siguientes 5 milisegundos recorre la misma distancia en dirección opuesta.
- c) Velocidad instantánea de la bocina:  $V_{max} = a\omega = (3\mu\text{m})[2\pi(100 \text{ Hz})] = 1.88 \times 10^{-3} \mu\text{m/s}$
- d) Aceleración:  $A_{max} = a\omega^2 = (3\mu\text{m})[2\pi(100 \text{ Hz})]^2 = 1.18 \times 10^{-3} \mu\text{m/s}^2$ .

Para conocer la posición en el tiempo se utiliza la función de coseno:

$$x(t) = a \cos(\omega t + \delta)$$

Donde  $x(t)$  es el valor de la posición con respecto del tiempo,  $a$  es la amplitud del desplazamiento  $\omega$  es la velocidad angular  $= 2\pi f$ ,  $t$  es el periodo y  $\delta$  es la fase.

En base a la función anterior se puede conocer la velocidad con la primera derivada y aceleración con la segunda derivada.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = -a\omega \text{sen}(\omega t + \delta) \quad \text{Para velocidad}$$

$$A(t) = \frac{dv}{dt} = -a\omega^2 \text{cos}(\omega t + \delta) \quad \text{Para aceleración}$$

### 3.2 Validación

Para validar y demostrar el funcionamiento del vibrómetro se realizaron mediciones de vibraciones mecánicas controladas en:

- a) Un motor a pasos con el fin de poder controlar a voluntad el desplazamiento en orden de micrómetros mediante el software que proporciona el fabricante.
- b) Dos bocinas. La primera fue utilizada para variar linealmente la amplitud del desplazamiento a través del voltaje suministrado por un generador de funciones y así comprobar que el desplazamiento de la membrana varia linealmente. La segunda bocina es utilizada para medir vibraciones a bajas frecuencias y determinar

experimentalmente la frecuencia mínima que se puede leer en la señal que proporciona el vibrómetro.

### 3.2.1 Medición de señales de un motor a pasos

Para demostrar la capacidad de medición del vibrómetro se realizaron lecturas de desplazamiento de un motor a pasos de la marca Zaber Tech® modelo LSM025A (Figura 22). Se desarrolló un código en la interfaz Zaber Console para que el motor realice desplazamientos repetidos de ida y vuelta, en el orden de micrómetros, controlados por un usuario.

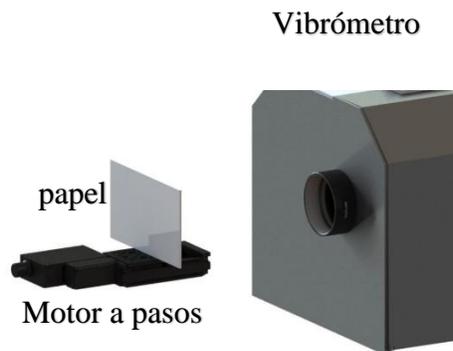


Figura 22. Análisis de desplazamiento controlado con motor a pasos LSM025A.

Las siguientes imágenes (Figuras 23, 24 y 25) muestran las gráficas obtenidas por el osciloscopio al medir desplazamientos controlados del motor a pasos. Se seleccionaron amplitudes de desplazamiento de pocos micrómetros para facilitar el conteo de picos.

En la gráfica de la figura 23 se observa un ciclo de ida y vuelta del motor a pasos. En la primera mitad del ciclo se aprecian 12 picos y en la segunda mitad 10 picos. Se puede

observar que el motor tardo aproximadamente 24ms en desplazarse  $2\mu\text{m}$  y que hay una desaceleración considerable antes y después de llegar a la mitad del ciclo completo.

En la gráfica de la figura 24 se observa un desplazamiento aproximado de  $3\mu\text{m}$  del motor a pasos. En la primera mitad del ciclo se aprecian 17 picos y en la segunda mitad 15 picos. Se puede observar que el motor tardo aproximadamente 29ms en desplazarse  $3\mu\text{m}$  y al igual.

En la gráfica de la figura 25 al igual que las dos anteriores se observa el ciclo del motor con un desplazamiento aproximado de  $5\mu\text{m}$ . En la primera mitad del ciclo se aprecian 24 picos y en la segunda mitad 26 picos. En este desplazamiento, se observa que para llegar a medio ciclo tardo un tiempo aproximado de 35ms. De mismo modo se aprecia la desaceleración antes y después de medio ciclo.

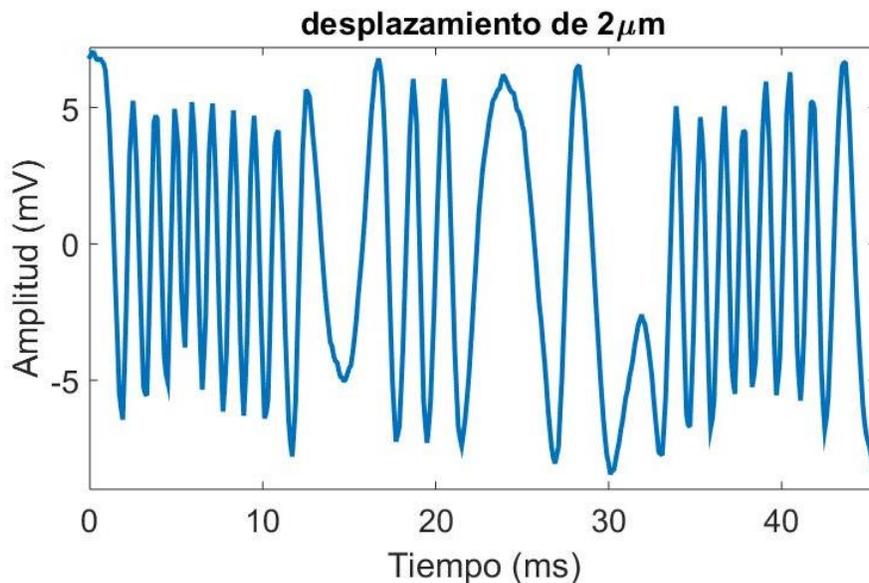


Figura 23. Desplazamiento de  $2\mu\text{m}$ .

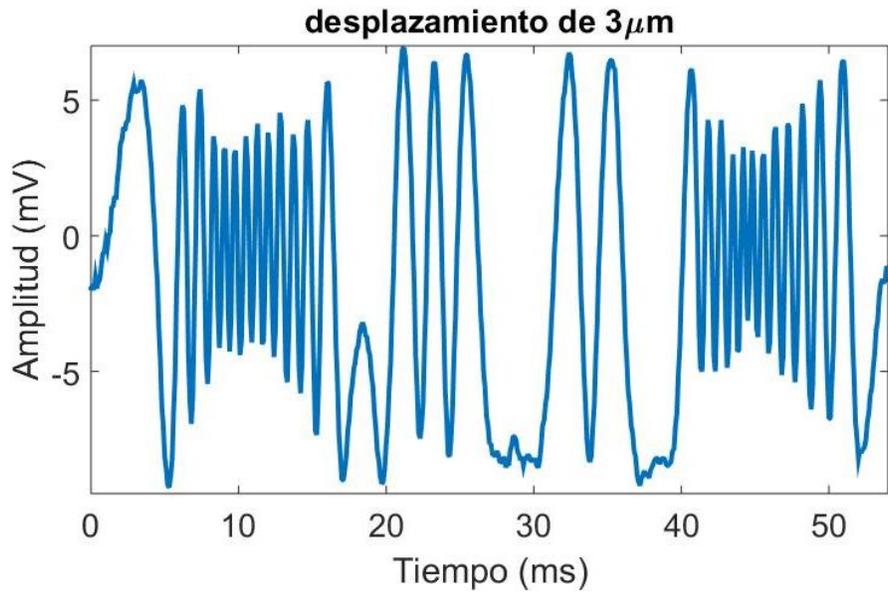


Figura 24. Desplazamiento de  $3\mu\text{m}$ .

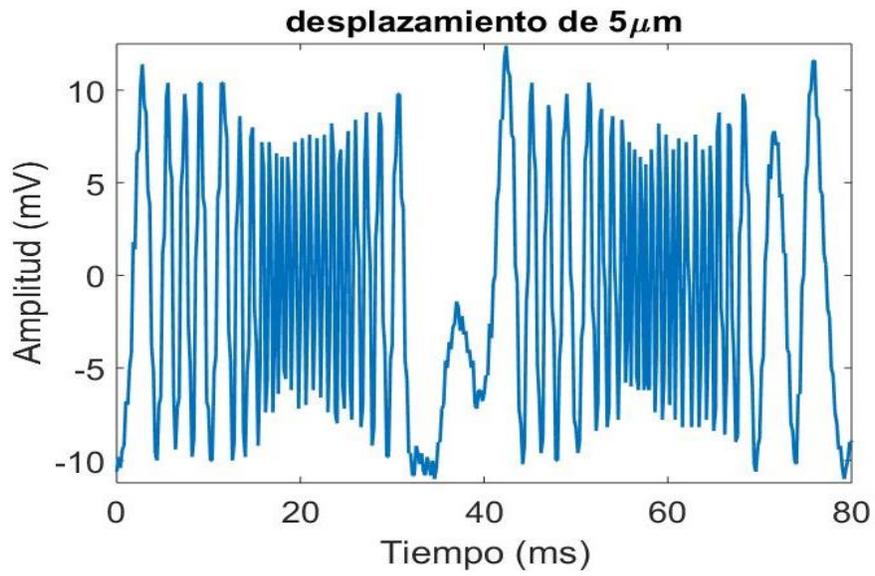


Figura 25. Desplazamiento de  $5\mu\text{m}$ .

### ***Análisis de los resultados***

En esta primera parte de validación se demostró la resolución del vibrómetro con el uso de un motor a pasos (modelo LSM025A) al programar desplazamientos conocidos en orden de micrómetros y correlacionar dicho desplazamiento con el número de picos de la señal interferométrica. En capítulos anteriores se explica que dichos picos equivalen a la mitad de la longitud de onda de la fuente.

- Las gráficas resultantes muestran que, al aumentar el desplazamiento de cada ciclo en el motor a pasos, aumenta proporcionalmente el número de ciclos de la señal del vibrómetro.
- Los desplazamientos programados y de la lectura del vibrómetro son los siguientes:

*Tabla 2. Desplazamientos de motor a pasos.*

<i>Desplazamiento programado</i>	<i>Lectura del vibrómetro (primera mitad)</i>	<i>Lectura del vibrómetro (segunda mitad)</i>
$2\mu m$	$2.4\mu m$	$2\mu m$
$3\mu m$	$3.4\mu m$	$3\mu m$
$5\mu m$	$4.8\mu m$	$5.2\mu m$

- El desplazamiento es mayor en una dirección posiblemente debido a backlash del motor o a un mal funcionamiento del motor.

### 3.2.2 Medición de señales de bocinas

Las bocinas son transductores que convierten una señal eléctrica en una onda mecánica para desplazar una membrana y producir sonido, el movimiento de la membrana es proporcional la amplitud (V) y frecuencia (Hz) de la señal eléctrica.

#### *Primera bocina*

Para validar la medición del vibrómetro láser se mide el desplazamiento de la membrana con respecto al voltaje inducido en la bocina.

Se realizaron mediciones de la vibración de la bocina, de especificaciones desconocidas, aplicándole una onda senoidal producida por un generador de funciones comercial (RIGOL modelo DG1022A) a una frecuencia fija seleccionada aleatoriamente (100Hz) y amplitud variable cada .5V en el rango de 1V a 7V (Figura 26).

La bocina se montó en un soporte fijo a una mesa de pruebas al igual que el vibrómetro para evitar medir vibraciones de otras fuentes.

En la gráfica de la figura 26 se muestra la linealidad del desplazamiento, con datos obtenidos por el vibrómetro, de la bocina con respecto al voltaje.

Tabla 3. Desplazamientos de bocina con respecto a los voltajes inducidos.

Voltaje (V)	No. de picos (medio ciclo)	Desplazamiento $\mu\text{m}$
1.0	4	0.8
1.5	6	1.2
2.0	8	1.6
2.5	9	1.8
3.0	11	2.2
3.5	12	2.4
4.0	15	3.0
4.5	16	3.2
5.0	18	3.6
5.5	19	3.8
6.0	22	4.4
6.5	24	4.8
7.0	26	5.2

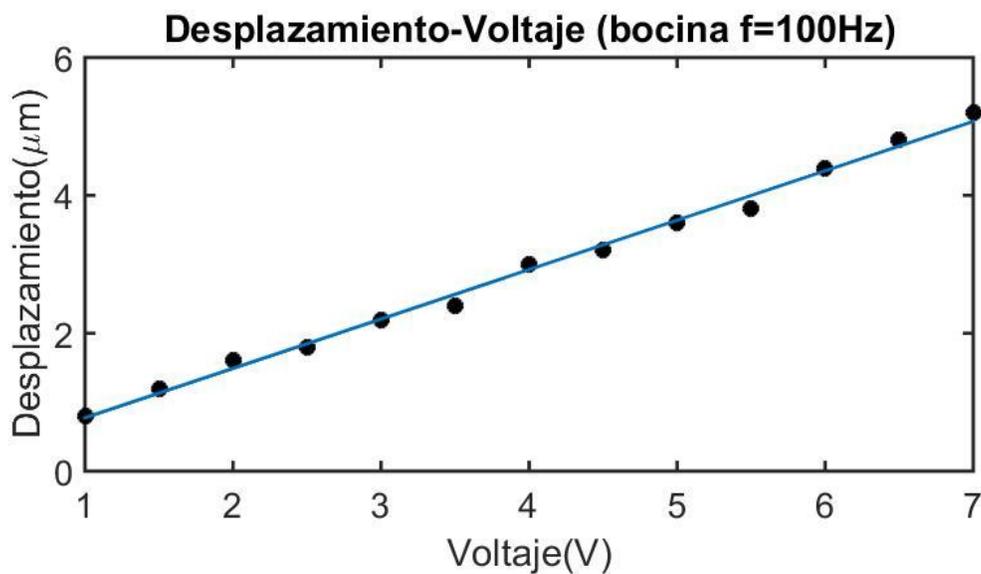


Figura 26. Gráfica desplazamiento-voltaje de bocina a 100 Hz.

### ***Análisis de los resultados***

En esta segunda etapa se validó la lectura del vibrómetro, mediante las pruebas realizadas al medir las vibraciones de la bocina y se logró observar una amplitud mínima de 800nm alimentando a la bocina con 1V.

Con los datos obtenidos por el vibrómetro, al igual que otros estudios de bocinas donde verifican que el desplazamiento de la bocina varia linealmente con el voltaje inducido [13], se obtuvo una respuesta lineal en el desplazamiento de la bocina con el voltaje inducido.

### ***Segunda bocina***

Para determinar la lectura de la frecuencia mínima que aporta el vibrómetro, se utilizó un subwoofer de la marca Logitech modelo Ls21. Mediante el cable de entrada de audio del subwoofer se suministró una señal senoidal, haciendo el uso de una aplicación para teléfonos celulares, donde se puede controlar la frecuencia y amplitud de la señal. Los experimentos se realizaron en orden descendiente desde 30 Hz hasta que la señal se perdió en el ruido; lo que ocurrió en la frecuencia de 6 Hz.

En la siguiente imagen se muestra la gráfica de la medición del subwoofer a 6Hz (1ciclo/166ms) con reconocimiento de picos para determinar el desplazamiento. Esta es la medición con menor frecuencia medida antes de perder la señal en el ruido.

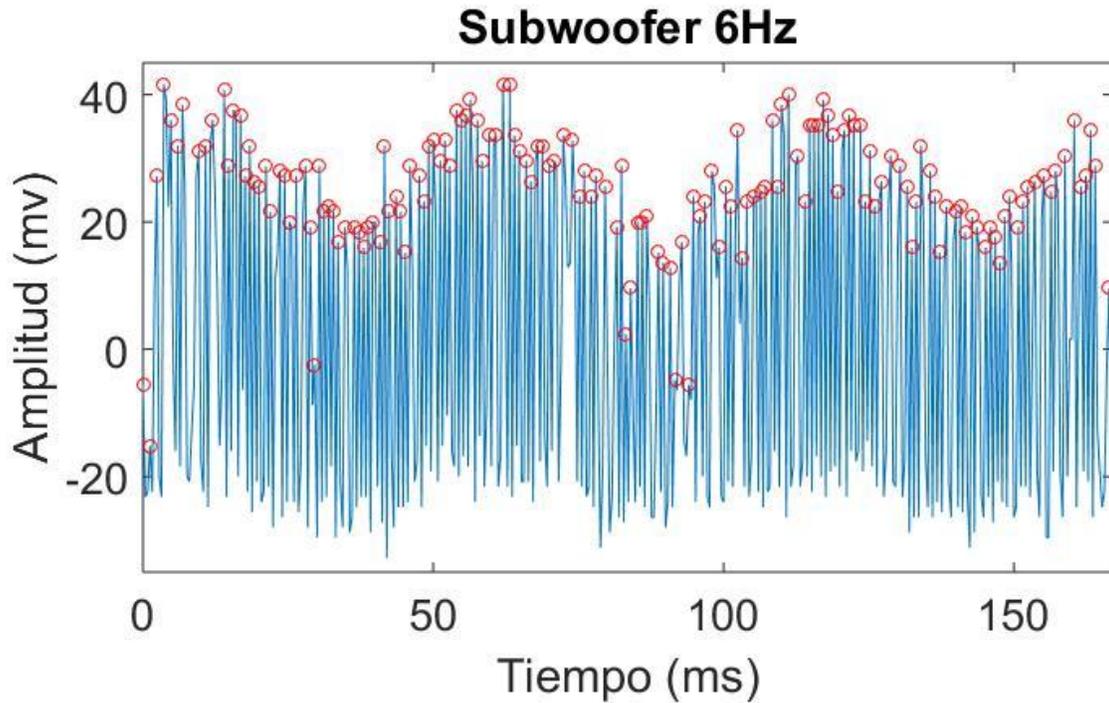


Figura 27. Gráfica de medición a baja frecuencia (6 Hz).

### ***Análisis de los resultados***

En los experimentos realizados al medir el subwoofer a bajas frecuencias se determinó que, con el limitado rango de operación del subwoofer y la resolución al extraer datos del osciloscopio en formato .csvs, solo se permite ver el número de picos equivalente a desplazamientos de  $22.8 \mu\text{m}$  y se logró medir frecuencias desde 6 Hz (Figura 27).

Los desplazamientos de la membrana de un subwoofer se encuentran en ordenes de cientos de micras o hasta milímetros, por lo tanto, el número de picos que se observa en la señal es considerable por lo que es limitada la extracción de información del osciloscopio.

## **Capítulo 4**

### **Aplicaciones**

Los vibrómetros Doppler son utilizados ampliamente para aplicaciones, que requieren una alta confiabilidad, ya que cumplen con casi todos los rangos de medición exigidos en áreas de investigación y principalmente industriales como: en la industria automotriz, calibración de dispositivos más simples de medición de vibraciones, caracterizar generadores de vibraciones electrodinámicos, en análisis modales para aeronáutica, salud y seguridad, medio ambientales y electrónica entre otras aplicaciones[12]. A continuación, se mencionan algunas de las áreas donde es necesario medir vibraciones de alta precisión.

#### **4.1 Industria automotriz**

La medición de vibraciones es un proceso importante para la industria automotriz, por ejemplo, en la eliminación o prevención de sonidos no deseados por aflojamiento de algún componente, balanceo de neumáticos y componentes rotatorios, como el motor o caja de velocidades.

En el motor se dividen 2 fenómenos importantes de vibraciones: la transmisión de vibraciones del motor al chasis, donde existe una vibración normal y constante debido al funcionamiento del motor, pueden existir vibraciones no deseadas por fallas en algún componente que no funcione correctamente

oscilaciones torsionales del cigüeñal y sistemas de ejes: el sistema biela-manivela convierte la energía calorífica en energía mecánica, el movimiento rectilíneo de las bielas se transfiere al cigüeñal para convertir el movimiento en rotacional, los cambios extremos de velocidad y aceleración en estos sistemas pueden generar vibraciones no deseadas, si no se controlan o eliminan pueden dar lugar a fallas en el motor.

## **4.2 Calibración de instrumentos**

Una de las principales aplicaciones de los vibrómetros láser, es la calibración y caracterización de instrumentos, como dinamómetros, acelerómetros e instrumentos de excitación, por ejemplo, en sensores de bajas frecuencias de vibración, donde son importantes para mediciones de sismología y grandes estructuras como: edificios, puentes, presas o incluso en la industria se conoce que la mayoría de máquinas, equipos mecánicos, electrónicos o rotatorios trabajan a frecuencias menores de 50Hz.

Para generar vibraciones en objetos donde se requiere analizar su comportamiento se utilizan instrumentos de excitación, como shakers electrodinámicos, los más comunes operan desde fracciones de Hz hasta 3000Hz.

### **4.3 Salud**

De acuerdo con la NORMA Oficial Mexicana NOM-024-STPS-2001, Vibraciones- Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo.

Tiene como objetivo: Establecer los límites máximos permisibles de exposición y las condiciones mínimas de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se generen vibraciones que, por sus características y tiempo de exposición, sean capaces de alterar la salud de los trabajadores.

Los tiempos límites máximos de exposición en vibraciones permisibles, se definen de acuerdo a la frecuencia, aceleración de la vibración y la dirección de transmisión, van desde 1 minuto hasta 24 horas en un rango de frecuencias de 1Hz a 80Hz.

## Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones del prototipo y las mejoras, que se pueden implementar en el futuro, de acuerdo con las evidencias mostradas en este trabajo.

- Se logró la construcción del vibrómetro con capacidad de medir desplazamientos sub-micrométricos, sin embargo, las dimensiones finales son considerables.
- Los componentes mecánicos se ensamblaron como se esperaba en el diseño y se implementaron 4 postes para dar un mejor soporte a la estructura.
- La instrumentación electrónica desarrollada cumplió los objetivos de amplificar, detectar y procesar la señal como se esperaba.
- El dispositivo se calibro adecuadamente y con buen resultado.
- El prototipo de vibrómetro basado en la técnica ESMI mejora la señal de un vibrómetro SMI hasta 50 veces y una mejora de razón señal a ruido de un orden de magnitud de acuerdo con la referencia [9]
- Se logró construir un vibrómetro portable para utilizarlo dentro y fuera del laboratorio.

## **Recomendaciones para futuros proyectos**

- Es posible exceptuar el uso de los controladores y monturas comerciales del láser, diseñando controladores únicos para las condiciones del láser empleado y por consecuencia el costo de construcción del láser se reducirá un 65%.
- Es necesario crear una interfaz óptima para cualquier usuario que requiera medir vibraciones, como el uso de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), que sustituya el uso del osciloscopio.
- Se recomienda emplear filtros electrónicos para obtener una señal más limpia en ciertos rangos de frecuencia.
- En futuros proyectos se puede crear un vibrómetro con menores dimensiones y menor costo con las recomendaciones anteriores.

## Referencias

- [1] French, A. P. (1974). *Vibraciones y ondas* (Vol. 2). Reverté.
- [2] Mosquera, G., De la Victoria, M., & ARMAS, R. (2001). *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*. Centro de Altos Estudios Gerenciales ISID. Caracas.
- [3] Montanaro, M. I. (2002). Sistemas de control de vibraciones en estructuras de gran altura. *Informes de la Construcción*, 53(477), 31-39.
- [4] Saavedra, P. N. (2011). *La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación*. Facultad de Ingeniería-Universidad de Concepción, Chile.
- [5] Saxena, S. C., & Seksena, S. L. (1989). A self-compensated smart LVDT transducer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 38(3), 748-753.
- [6] Hecht, E., LATORRE, V., VEAS, F., & ZAJAC, A. (1998). *Óptica*. Addison-Wesley Longman.
- [7] Malacara Hernández, D. (2002). *Óptica tradicional y moderna*. México: Fondo de Cultura Económica.
- [8] Giuliani, G., Norgia, M., Donati, S., & Bosch, T. (2002). Laser diode self-mixing technique for sensing applications. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 4(6), S283.

- [9] Contreras, V., Toivonen, J., & Martínez, H. (2017). Enhanced self-mixing interferometry based on volume Bragg gratings and laser diodes emitting at 405-nm wavelengths. *Optics Letters*, 42(11), 2221-2223.
- [10] White, G.: *Introducción al análisis de vibraciones*. Azima DLI, 2009.
- [11] <http://www.polytec.com/us/>
- [12] <http://www.cenam.gob.mx/DVA/Vibraciones/vibraciones.aspx>
- [13] Klippel W. Assessment of voice-coil peak displacement x-max. *J Audio Eng Soc* 2003;51(May):307–23.
- [14] Glebov, A. L., Mokhun, O., Rapaport, A., Vergnole, S., Smirnov, V., & Glebov, L. B. (2012, May). Volume Bragg gratings as ultra-narrow and multiband optical filters. In *Proc. SPIE* (Vol. 8428, No. May, p. 84280C).
- [15] Venus, G. B., Sevian, A., Smirnov, V. I., & Glebov, L. B. (2005, March). High-brightness narrow-line laser diode source with volume Bragg-grating feedback. In *High-Power Diode Laser Technology and Applications III* (Vol. 5711, pp. 166-177). International Society for Optics and Photonics.
- [16] Giuliani, G., Bozzi-Pietra, S., & Donati, S. (2002). Self-mixing laser diode vibrometer. *Measurement Science and Technology*, 14(1), 24.
- [17] Magnani, A., Pesatori, A., & Norgia, M. (2012). Self-mixing vibrometer with real-time digital signal elaboration. *Applied Optics*, 51(21), 5318-5325.
- [18] Azcona Guerrero, F. J., Atashkhoei, R., Royo Royo, S., Gil Espert, L., & Pladellorens Mallofré, J. (2012). Interferometría autorrealimentada para la medición de deformación en

materiales estructurales sometidos a cargas dinámicas. In Reunión Nacional de Óptica: Zaragoza, 4-7 de septiembre 2012: libro de abstracts (pp. 125-128).

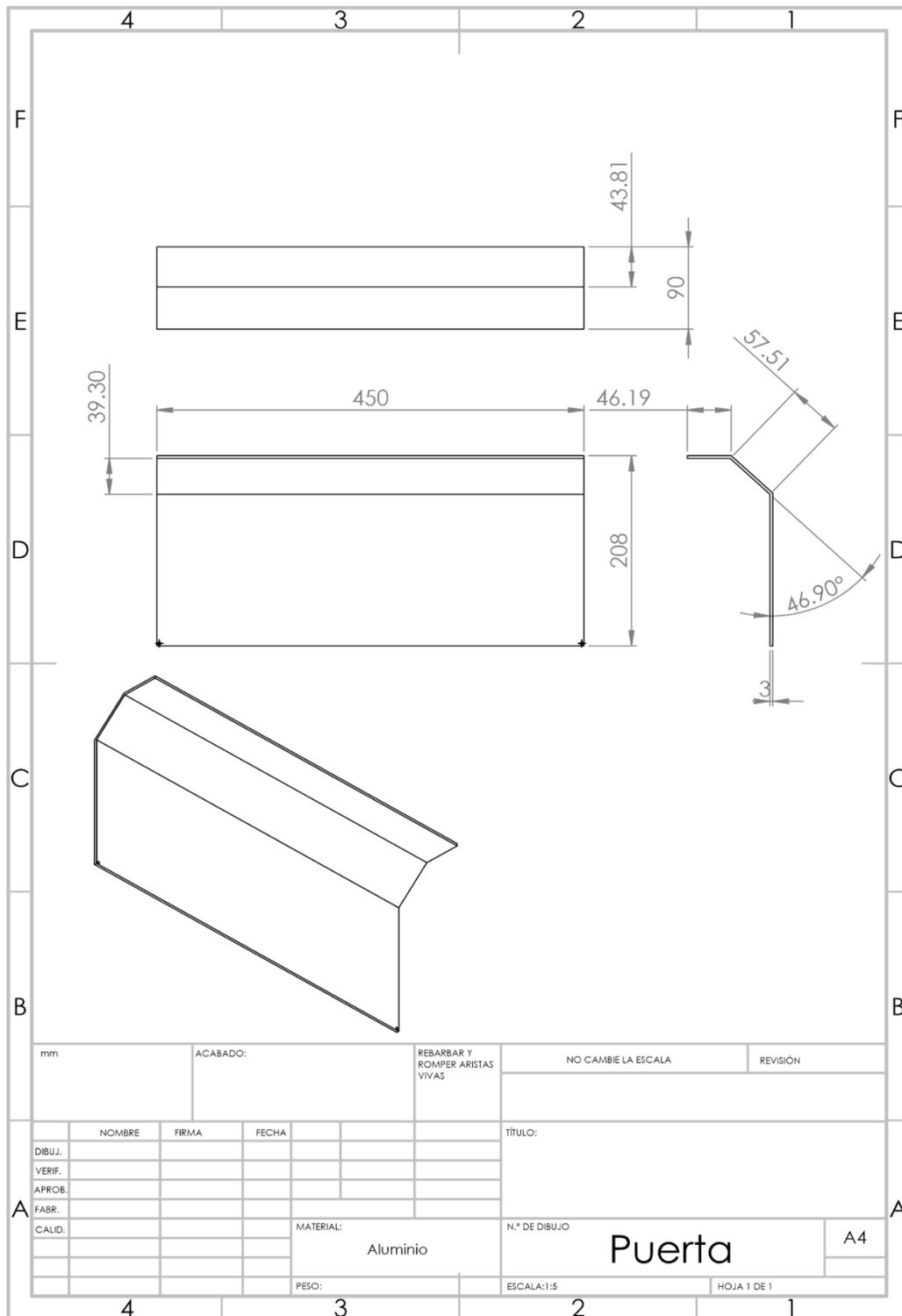
[19] Contreras, V., Lonqvist, J., & Toivonen, J. (2015). Edge filter enhanced self-mixing interferometry. *Optics letters*, 40(12), 2814-2817.

## Anexo 1 hoja de especificaciones motor a pasos LSM025A

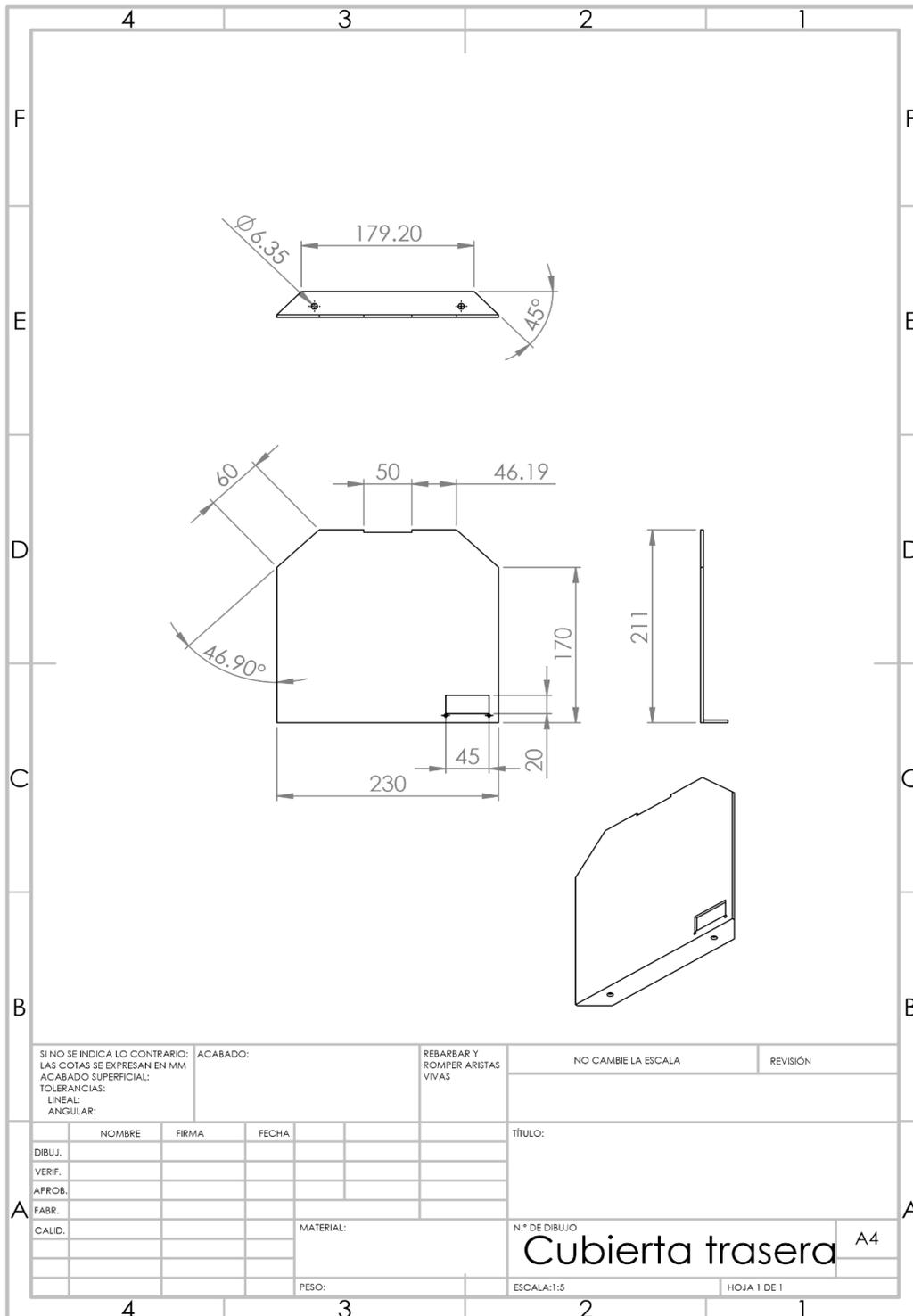
<b>specification</b>	<b>Value</b>	<b>Alternate Unit</b>
<u>Microstep Size (Default Resolution)</u>	0.047625 $\mu\text{m}$	
<u>Built-in Controller</u>	Yes	
<u>Travel Range</u>	25.4 mm	1.000 "
<u>Accuracy (unidirectional)</u>	8 $\mu\text{m}$	0.000315 "
<u>Repeatability</u>	< 1 $\mu\text{m}$	< 0.000039 "
<u>Backlash</u>	< 3 $\mu\text{m}$	< 0.000118 "
<u>Maximum Speed</u>	7 mm/s	0.276 "/s
<u>Minimum Speed</u>	0.00022 mm/s	0.000009 "/s
<u>Speed Resolution</u>	0.00022 mm/s	0.000009 "/s
<u>Encoder Type</u>	None	
<u>Peak Thrust</u>	55 N	12.3 lb
<u>Maximum Continuous Thrust</u>	25 N	5.6 lb
<u>Communication Interface</u>	RS-232	
<u>Communication Protocol</u>	Zaber Binary	
<u>Maximum Centered Load</u>	100 N	22.4 lb
<u>Maximum Cantilever Load</u>	300 N·cm	424.8 oz·in
<u>Guide Type</u>	Needle roller bearing	
<u>Vertical Runout</u>	< 8 $\mu\text{m}$	< 0.000315 "
<u>Horizontal Runout</u>	< 12 $\mu\text{m}$	< 0.000472 "
<u>Pitch</u>	0.02°	0.349 mrad
<u>Roll</u>	0.005°	0.087 mrad
<u>Yaw</u>	0.02°	0.349 mrad

<b>specification</b>	<b>Value</b>	<b>Alternate Unit</b>
<u>Maximum Current Draw</u>	500 mA	
<u>Power Supply</u>	12-16 VDC	
<u>Power Plug</u>	2.1 mm center positive	
<u>Linear Motion Per Motor Rev</u>	0.6096 mm	0.024 "
<u>Motor Steps Per Rev</u>	200	
<u>Motor Type</u>	Stepper (2 phase)	
<u>Inductance</u>	1.5 mH/phase	
<u>Default Resolution</u>	1/64 of a step	
<u>Data Cable Connection</u>	Minidin 6 pin M/F	
<u>Mechanical Drive System</u>	Precision lead screw	
<u>Limit or Home Sensing</u>	Magnetic hall sensor	
<u>Manual Control</u>	Yes	
<u>Axes of Motion</u>	1	
<u>LED Indicators</u>	Yes, Bi-Colour	
<u>Mounting Interface</u>	M3 and M6 threaded holes and M4 threaded center hole	
<u>Vacuum Compatible</u>	No	
<u>Operating Temperature Range</u>	0 to 50 °C	
<u>Stage Parallelism</u>	< 25 µm	< 0.000984 "
<u>RoHS Compliant</u>	Yes	
<u>CE Compliant</u>	Yes	
<u>Weight</u>	0.31 kg	0.683 lb

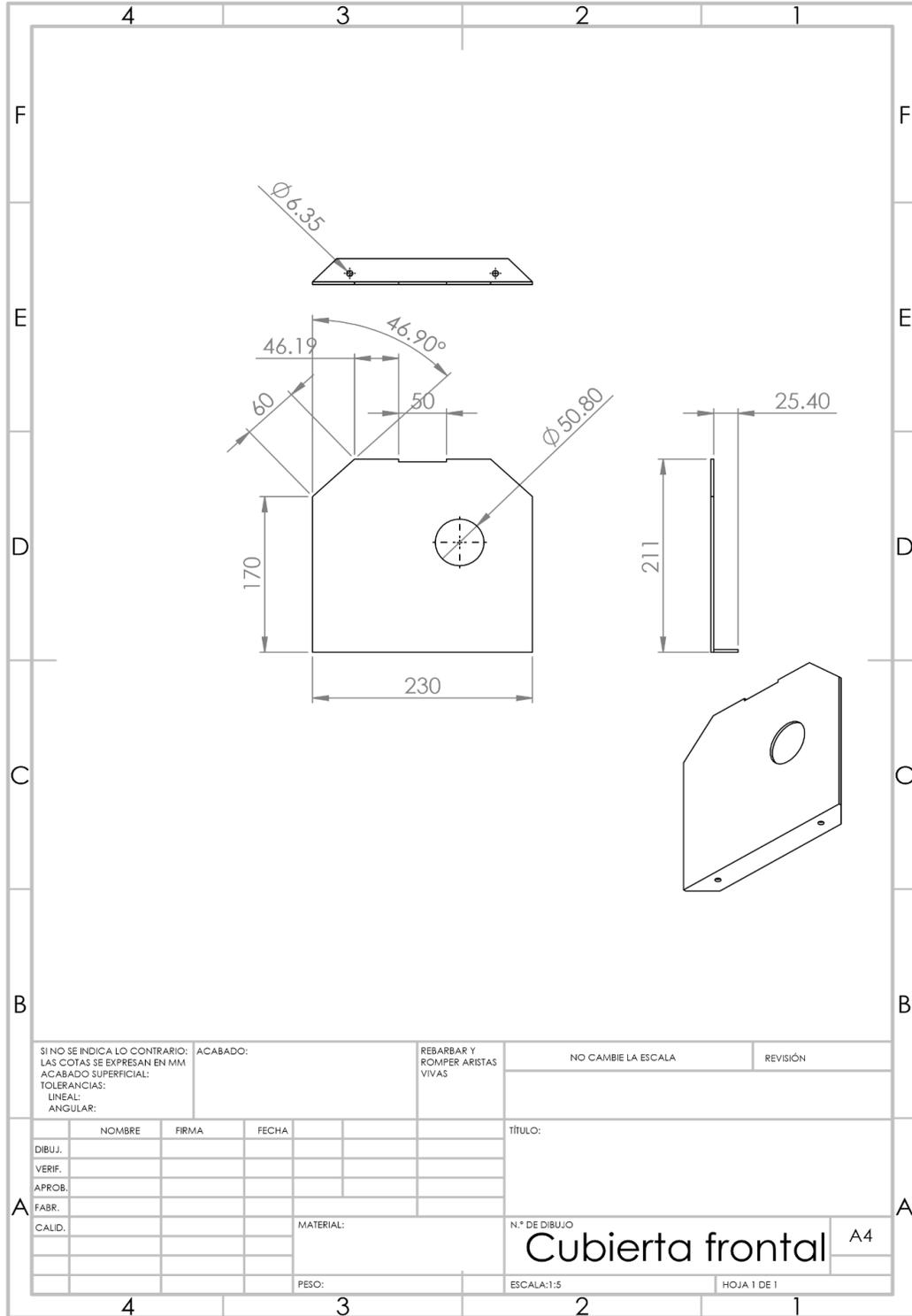
### Anexo 2: Plano de puertas



### Anexo 3: Planos de cubierta trasera



### Anexo 4: Planos de cubierta frontal



### Anexo 5: Planos del chasis del detector

