



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

DESARROLLO DE PROTOTIPOS PARA MEJORAR EL PROCESO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE TEMAS EN EL CAMPO DE LA FÍSICA

PROTOTIPO BÁSICO FUNCIONAL PARA LA INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA DE ONDAS GRAVITACIONALES

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE FÍSICO**

DAVID ALEJANDRO HERRERÍA HOYOS

david.herreria@epn.edu.ec

DIRECTOR: ELIANA MARIBEL ACURIO MÉNDEZ

eliana.acurio@epn.edu.ec

DMQ, FEBRERO DE 2023

CERTIFICACIONES

Yo, DAVID ALEJANDRO HERRERÍA HOYOS, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



David Alejandro Herrería Hoyos

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por David Alejandro Herrería Hoyos, bajo mi supervisión.



Eliana Maribel Acurio Méndez
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el(los) producto(s) resultante(s) del mismo, es(son) público(s) y estará(n) a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

David Alejandro Herrería Hoyos

Eliana Maribel Acurio Méndez

RESUMEN

El proyecto consistió en diseñar y construir un prototipo de interferómetro de Michelson para simular ondas gravitacionales. El prototipo diseñado es un interferómetro portable y de bajo costo, cuyo funcionamiento se controla a través de una interfaz gráfica implementada en LabVIEW y cuya estructura fue impresa en 3D con plástico PLA. Se utilizaron componentes ópticos comerciales para reflejar, transmitir y enfocar la luz, y se colocó un sensor de luz a la salida del interferómetro de manera que sea posible registrar los cambios en la intensidad. El mecanismo para variar la distancia de uno de los brazos del interferómetro fue implementado empleando un potenciómetro digital conectado a un parlante con un espejo fijado a su diafragma. La alineación de uno de los espejos se realizó con el diseño de un soporte ajustable empleando imanes y tornillos. Sin embargo, se determinó que este soporte puede presentar movimientos indeseados y ruido. El contraste del presente diseño fue calculado con un valor de 0.30. Se generaron señales de prueba utilizando funciones lineales y sinusoidales enviadas al potenciómetro determinando que este presenta una respuesta no lineal, lo que impide generar una señal representativa de la cual extraer datos que permitan ser sujetos a un análisis y comparación teórica. El costo de fabricación del prototipo se estima en \$ 71.27 al por menor y \$ 59.44 al por mayor. Se desarrolló un manual de usuario para el prototipo así como una guía de práctica de laboratorio que pretende presentar de forma cualitativa al estudiante la detección de ondas gravitacionales.

Palabras clave: Interferómetro de Michelson, prototipos de bajo costo, detección de ondas gravitacionales, prácticas de laboratorio a nivel de grado.

ABSTRACT

The aim of this project was designing and building a prototype Michelson interferometer to simulate gravitational waves. The designed prototype is a portable and low-cost interferometer, whose operation is controlled through a graphical interface implemented in LabVIEW and whose structure was 3D printed with PLA plastic. Commercial optical components were used to reflect, transmit and focus the beams of light. A light sensor was placed at the output of the interferometer so that it is possible to record changes in intensity. The mechanism for varying the distance of one of the interferometer arms was implemented using a digital potentiometer connected to a speaker with a mirror attached to its diaphragm. The alignment of one of the mirrors was accomplished with the design of an adjustable bracket using magnets and screws. However, it was determined that this bracket may present unwanted movements and noise. The contrast of the present design was calculated with a value of 0.30. Test signals were generated using linear and sinusoidal functions sent to the potentiometer, it was determined that the potentiometer presents a non-linear response, which prevents the generation of a representative signal from which to extract data for analysis and theoretical comparison. The manufacturing cost of the prototype is estimated at \$ 71.27 retail and \$ 59.44 wholesale. A user's manual was developed for the prototype as well as a laboratory practice guide that aims to qualitatively introduce the student to the detection of gravitational waves. **Keywords:** Michelson interferometer, low-cost prototypes, gravitational wave detection, undergraduate laboratory practice.

Índice general

1. Descripción del componente desarrollado	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcance	4
1.4. Marco teórico	4
1.4.1. Antecedentes	5
1.4.2. Ondas gravitacionales	10
1.4.3. Interferencia de ondas electromagnéticas	13
1.4.4. Interferómetro de Michelson	14
2. Metodología	17
2.0.1. Componente de Hardware	17
2.0.2. Componente de Software	23
3. Resultados, conclusiones y recomendaciones	26
3.1. Resultados	26
3.1.1. Hardware	26
3.1.2. Software	28
3.1.3. Interferómetro ensamblado	30
3.2. Conclusiones y recomendaciones	39

3.2.1. Conclusiones	39
3.2.2. Recomendaciones	41
A. Anexos	42
A.1. Planos de las piezas	42
A.2. Código Arduino	45
A.3. Diagrama LabVIEW	49
A.4. Manual de usuario	50
1. Especificaciones	50
1.1. Fototransistor	50
1.2. Láser	52
1.3. Microcontrolador	52
1.4. Parlante	53
1.5. Potenciómetro	53
2. Procedimiento	54
A.5. Práctica de laboratorio	57
1. Lecturas previas a la práctica	58
1.1. Temas	58
1.2. Bibliografía recomendada	58
2. Preguntas previas a la práctica	59
3. Guía de laboratorio	60
3.1. Materiales	60
3.2. Procedimiento	60
4. Preguntas y tareas sugeridas para el análisis	61
Bibliografía	62

Índice de figuras

1.1. Diagrama de un interferómetro de Michelson con brazos y espejos perpendiculares. [30]	6
1.2. Oscilación de masas de prueba por una onda de polarización + [13].	12
1.3. Oscilación de masas de prueba por una onda de polarización × [13].	12
1.4. Diagrama de un sistema binario a una distancia d_L y formando un ángulo ι con la línea de observación	13
1.5. Esquema del interferómetro de Michelson con un solo eje óptico. [35]	15
2.1. (a) Diagrama del circuito encargado de la generación de señales y la toma de datos, (b) ruteo de la placa PCB y (c) modelo 3D de la placa PCB del circuito (sin Arduino).	20
2.2. Esquema de la estructura del interferómetro con: 1) Soporte de espejo M2, 2) Soporte de espejo M1 pt1, 3) Soporte de espejo M1 pt2, 4) Soporte de láser, 5) Soporte de fototransistor, 6) Soporte de splitter y 7) la base del interferómetro.	22
2.3. Diagrama de flujo del programa enviado al microcontrolador.	24
2.4. Diagrama de flujo del código empleado para la interfaz desarrollada diseñada en LabVIEW.	25

3.1. Soportes de: (a) láser (pieza #4), (b) ajustable de espejo (piezas #2 y #3 fijas) y (c) de espejo M1 pt 2 (pieza #3).	27
3.2. Soportes de: (a) parlante (pieza #1), (b) fototransistor (piezas #5) y (c) de splitter (pieza #8).	27
3.3. Vistas de la placa PCB: a) inferior, b) superior sin Arduino y c) superior con Arduino.	28
3.4. Pestañas que conforman la interfáz gráfica.	30
3.5. (a) Haces de luz separados proyectados a la salida del interferómetro, (b) patrón de interferencia circular al hacer coincidir los haces y (c) patrón de interferencia hiperbólico como resultado de una inclinación entre los espejos del interferómetro.	31
3.6. Voltaje registrado por el fototransistor en función del tiempo para un movimiento gradual de los anillos de interferencia (las barras de error son muy pequeñas para ser apreciadas).	32
3.7. Imagen representativa del ruido registrada por el fototransistor para medición con y sin interferencia (la líneas punteada representan el valor medio).	33
3.8. Corriente en función del voltaje medidos a la salida del transistor con su respectivo ajuste lineal (las barras de error son muy pequeñas para ser apreciadas).	34
3.9. Relación funcional entre la intensidad de la luz que ilumina el fototransistor y el voltaje registrado por el mismo.	35
3.10.Voltaje del parlante en función del índice digital escrito en el potenciómetro.	36
3.11 Señales registradas en el fototransistor empleando un función lineal escrita en el potenciómetro para intensidades iniciales (a) mínima y (b) máxima.	37
3.12 Señales registradas en el fototransistor empleando un función senoidal escrita en el potenciómetro.	37
A.1. Base	42
A.2. Soporte de láser	43

A.3. Soporte de espejo 1	43
A.4. Soporte de espejo 2 pt 1	44
A.5. Soporte de espejo 2 pt 2	44
A.6. Soporte de splitter	44
A.7. Esquemático del fototransistor con sus dimensiones y conectores.	50
A.8. Diagrama del láser empleado con sus respectivas dimensiones y componentes.	52
A.9. Esquemático del interferómetro con sus respectivos pines.	53
A.10 Flujo a seguir en la interacción con la interfaz gráfica en la pestaña “Introducción”.	55
A.11 Flujo a seguir en la interacción con la interfaz gráfica en la pestaña “Simulador”.	56

Capítulo 1

Descripción del componente desarrollado

El estudio de las ondas gravitacionales y su detección usualmente es realizado en los cursos de pregrado de manera completamente teórica debido a la alta sensibilidad necesaria para detectar este tipo de deformaciones. Una manera de realizar la detección directa de este fenómeno es con un interferómetro de Michelson como el del laboratorio LIGO. A pesar de que este instrumento es estudiado de forma teórica y práctica en los cursos de óptica, no es usual realizar prácticas de laboratorio con el mismo que complementen la información obtenida en los cursos de relatividad general. Por otro lado, es conocido que los métodos educativos en los que el estudiante participa activamente en la demostración de algún fenómeno son más efectivos que aquellos en los que el profesor es el único involucrado [12, 15, 32], es decir, el visualizar, tomar y analizar datos son procesos que mejoran el aprendizaje. Existen varios prototipos diseñados que pretenden solventar esta problemática, sin embargo, la mayoría de estos se centran en la óptica del sistema en lugar de ilustrar el origen de las ondas gravitacionales y su relación con la deformación del detector. Se han propuesto varios diseños de interferómetros incluyendo algunos sugeridos por el propio detector LIGO [16, 1] dirigidos a estudiantes con estudios secundarios. Además, existen manuales, actividades y tutoriales dedicados a ilustrar teóricamente el origen de las ondas gravitacionales, su detección y el análisis de datos reales obtenidos con LIGO [5, 33, 9]. Sin embargo, los diseños presentados por LIGO hacen énfasis en la óptica

del interferómetro, mientras que los manuales y actividades no contienen el componente experimental necesario. Un prototipo junto con manual es presentado en [19] sin embargo este no se llegó a completar.

Considerando estos antecedentes, este trabajo de integración curricular tiene como objetivo desarrollar un prototipo de un interferómetro de Michelson que permita la enseñanza de la detección de ondas gravitacionales originadas por la rotación de un sistema binario. Se diseñará el prototipo considerando materiales de bajo costo y será implementado teniendo en cuenta su portabilidad y accesibilidad a estudiantes que harán uso del mismo para la recopilación de datos. Además, este será alimentado y controlado por una computadora conectada al mismo. El resultado del presente proyecto podría contribuir a la visualización y comprensión de la astronomía de ondas gravitacionales como suplemento a la teoría recibida en clases, facilitando así el aprendizaje para estudiantes con bases teóricas en relatividad general. Esto será realizado por medio de la observación de la variación en la intensidad de luz en tiempo real como resultado de la interferencia en un haz láser y el análisis de datos recopilados con el interferómetro.

1.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo de interferómetro de Michelson que sea portable, de bajo costo, y que permita la enseñanza de la detección de ondas gravitacionales originadas por un sistema binario por medio de la observación y toma de datos recopilados por un sensor de luz.

1.2. Objetivos específicos

1. Diseño del prototipo:

- Revisar la literatura con los conceptos teóricos necesarios para relacionar la diferencia de camino óptico en el interferómetro con la intensidad registrada en el fotodetector, y a su vez la obtención de la deformación espacio temporal en función de la

intensidad medida.

- Esquematizar el diseño del interferómetro, identificando los materiales necesarios de bajo costo y asequibles.
- Verificar el funcionamiento de los componentes electrónicos empleados por separado: sensor de luz, láser, parlante (o piezoeléctrico) y Arduino.
- Implementar el diseño planteado en una estructura de material ligero pero robusto, verificando el funcionamiento del interferómetro en conjunto con la interfaz gráfica de computadora diseñada.

2. Diseño de la interfaz:

- Verificar la comunicación bidireccional entre los componentes electrónicos del prototipo y el software de computadora LabVIEW empleado para el envío de señales y toma de datos.
- Implementar una interfaz gráfica de usuario que permita controlar el encendido del láser, el tiempo de simulación, la observación en tiempo real de los valores registrados por el sensor de luz y la exportación de los datos a un archivo.

3. Verificar el funcionamiento de los componentes del interferómetro en conjunto, así como la validez de los resultados obtenidos a través de la interfaz diseñada.

4. Redactar un manual de usuario que permita el correcto uso del prototipo, así como el desarrollo de una práctica de laboratorio empleando el prototipo diseñado.

5. Redactar un informe final que contenga toda la información relevante correspondiente a la teoría detrás del interferómetro, componentes empleados, procedimiento para el armado del mismo y resultados obtenidos.

1.3. Alcance

El diseño del prototipo será planteado considerando componentes de bajo costo y asequibles en las tiendas electrónicas locales. Las dimensiones del interferómetro permitirán que este sea portátil y de fácil uso. Además sus componentes serán fijos con una posible excepción para los espejos debido al alineamiento de los mismos, de forma que el envío de señales y toma de datos se realice empleando únicamente una computadora a través de una interfaz gráfica diseñada con el software LabVIEW. El funcionamiento de cada componente electrónico será comprobado por separado, seguido de su implementación en el circuito completo. La comunicación serial necesaria para el registro de datos será realizada utilizando la plataforma Arduino, encargado del encendido del láser, la frecuencia de vibración del espejo móvil y el cálculo de la luminosidad obtenida por el sensor de luz. La metodología para la toma de datos una vez implementado el prototipo será con la escritura del tiempo de simulación por parte del usuario, el microcontrolador hará el cálculo de la función que simulará la onda gravitacional y enviará la señal a un potenciómetro digital conectado a un parlante, moviendo así uno de los espejos y provocando una variación en el camino óptico del haz del láser. Se registrará la luminosidad en función del tiempo a la salida del interferómetro, magnitud que podrá ser apreciada en tiempo real con la interfaz gráfica, además de ser exportada a un archivo de salida para un intervalo temporal definido. Se desarrollará un manual de usuario junto con una guía de laboratorio, en las cuales se encontrarán instrucciones del uso del prototipo y los pasos correspondientes a una práctica de laboratorio empleando el mismo.

1.4. Marco teórico

El 14 de Septiembre del 2015, se realizó la primera detección directa de ondas gravitacionales, provenientes de la fusión de un sistema binario de agujeros negros [11]; esto marcó el inicio de la era de observación gravitacional. Las ondas gravitacionales fueron predichas por Einstein como una solución aproximada de las ecuaciones de campo, empleando mé-

todos similares a los del electromagnetismo [18]. Inicialmente se creían imposibles de detectar debido a la amplitud infinitesimal que se creía deberían tener. Sin embargo, en 1960 Weber sugiere el uso de masas de prueba como materiales piezoeléctricos o barras de metal, que serían afectadas por una deformación como resultado de radiación gravitacional cuadrupolar [37]. El empleo de fuentes láser se consideró un poco más tarde, con la idea de emplear interferencia para la detección de variaciones en el camino óptico del haz. En 1974 se confirma la existencia de ondas gravitacionales de manera indirecta, como resultado de observaciones en el período de rotación de un sistema binario de pulsares [24]. Se observó que el período disminuía a lo largo del tiempo, como resultado de la disipación de energía que coincidía con los resultados de la relatividad general. Alrededor del año 2000 surgen varios interferómetros dedicados a la detección de ondas gravitacionales, entre ellos el proyecto GEO 600 en Alemania, TAMA 300 en Japón, LIGO en Estados Unidos y Virgo en Italia [11]. Los principales problemas encontrados con el uso de interferómetros para este tipo de observaciones fueron el ruido provocado por vibraciones ambientales, estabilización de la frecuencia de las fuentes láser, absorción y disipación mecánica en los espejos empleados, ruido por fluctuaciones cuánticas en el conteo de fotones que llegan a los espejos y dispersión de luz [17]. Los interferómetros realizaron períodos de observación sin detecciones de ondas gravitacionales, y fueron modificados con varias mejoras a lo largo de los años hasta que, en 2015, la colaboración conjunta entre LIGO y Virgo hizo posible la confirmación de la primera detección de ondas gravitacionales en la historia. Esto no solo abre la puerta para la detección de eventos o cuerpos astrofísicos que emiten altas cantidades de energía sino que también se genera un gran aporte tecnológico para la industria e investigación.

1.4.1. Antecedentes

El uso de la interferometría de ondas electromagnéticas para medir distancias muy pequeñas del orden de micrómetros o menos no es reciente, por lo que se han propuesto ya numerosos diseños de interferómetros de Michelson (figura 1.1), algunos más complicados y caros que otros, y empleados en numerosas aplicaciones no solo en el ámbito de la física.

A continuación se discuten algunos de estos diseños, identificando los métodos mas comunes para la alineación de los brazos del interferómetro, la variación del camino óptico, el registro de la señal, o el incremento en la sensibilidad del instrumento. Se discuten también los materiales empleados en su fabricación y las limitaciones de cada uno de ellos.

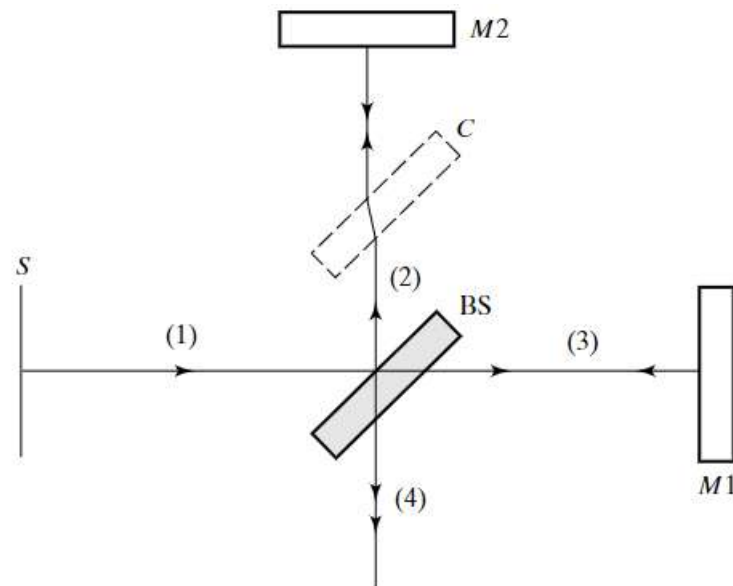


Figura 1.1: Diagrama de un interferómetro de Michelson con brazos y espejos perpendiculares. [30]

LIGO

La primera fuente a consultar al diseñar una versión simplificada del laboratorio LIGO es su pagina web [10], en donde se encuentran varias actividades dedicadas a la enseñanza de las ondas gravitacionales, y dos diseños de interferómetros de Michelson, denominados uno de "goma"[1] y otro "magnético"[16]. Ambos diseños son relativamente caros, siendo el diseño magnético el de mayor costo (\$200) debido principalmente al empleo de componentes ópticos de laboratorio (como el divisor del haz "beamsplitter"), tienen una buena sensibilidad y pueden ser propuestos a estudiantes de pregrado. La principal ventaja entre estos dos diseños es que el realizado con imanes puede ser desmontado y vuelto a armar por otros estudiantes mientras que el de goma es fijo. Los puntos débiles mas importantes son que ninguno de los diseños permiten realizar una toma de datos (por ejemplo, de la intensidad del haz final o un conteo de

franjas), no tienen ningún mecanismo que permita variar la diferencia de camino óptico y, por tanto, ninguno de los dos está enfocado en el tema que pretenden ilustrar, que es la detección de ondas gravitacionales, sino que únicamente se enfocan en la implementación de un instrumento óptico de alta sensibilidad.

DIY

Al tratarse de un instrumento ampliamente conocido es posible encontrar varios diseños de interferómetros de Michelson en el internet del tipo “hazlo tu mismo” (DIY), que llegan a ser muy baratos, sin embargo, la mayoría son muy simplificados, similares a los mencionados en la sección anterior con la diferencia de que los materiales empleados son caseros, por ejemplo, es usual reemplazar el beamsplitter al ser uno de los componentes más caros, por alternativas como plásticos (de la tapa de una caja de CD, por ejemplo) [8], vidrios (como el cubremuestras de un microscopio) [3], o beamsplitters extraídos de algún dispositivo [2]. Un punto en contra de estos diseños es que no se tiene información de su sensibilidad, y tampoco en cuanto al contraste de las franjas de interferencia formadas al no emplear divisores de haz de 50:50. En cuanto al resto de componentes de estos interferómetros, casi siempre se emplean espejos comerciales de fácil obtención. Algunos diseños ni siquiera tienen una estructura en la cual armar el interferómetro, o en el caso de [3] se presenta una estructura portátil y de bajo costo empleando legos. El láser también suele ser comercial y fácil de obtener en cualquier tienda de electrónica. Ninguno de estos diseños implementa un mecanismo para mover de forma controlada uno de los espejos ni para obtener datos cuantitativos.

En esta categoría incluso podrían entrar experimentos como el propuesto por el laboratorio de propulsión jet de la NASA (JPL), en el que, a pesar de no ser un interferómetro, se emplea un láser, gelatina y canicas para ilustrar el choque de agujeros negros [4], o experimentos en el que se usan elásticos y/o agua para observar de forma cualitativa las ondas que se forman en el espacio-tiempo debido al movimiento de cuerpos en

rotación como en [6].

Interferómetros con mecanismos de control para la variación del camino óptico y toma de datos

Existen varias formas de variar el camino óptico en un interferómetro, como el empleo de motores eléctricos, aire comprimido o transductores piezoeléctricos. Este último es el más usado en la literatura presentada, pues proporciona el control necesario al variar longitudes del orden de micrómetros, además no se introducen vibraciones como las que se tendrían con los motores eléctricos.

En [20] se emplea el método del aire comprimido mediante el uso de un soporte para el espejo móvil, obteniendo, según el autor, un movimiento controlado y casi sin fricción. Se presentan además los diagramas de circuitos para el conteo de franjas con un fotodiodo. A pesar de que este diseño es empleado para la calibración de láseres, es de interés pues se presenta una discusión acerca del ruido y la saturación del detector. Finalmente, presentan un modelo de bajo costo y portátil con precisión de 1 pm .

Prototipos más recientes como el de [25] tienen también precisión picométrica, pero en este caso ya se emplean piezoeléctricos para controlar el camino óptico de uno de los brazos del interferómetro. Este diseño es presentado directamente como un proyecto para estudiantes, contiene una discusión más extensa en cuanto a la sensibilidad, filtrado de la señal y precisión del instrumento. El láser preferido fue uno de He-Ne en lugar de los de diodo, y se consideró una alineación no perpendicular de los espejos debido a la presencia de interferencias no deseadas. En este caso el registro de datos se hace también a través de un fotodiodo y se emplea un circuito para bloquear el interferómetro retroalimentando el piezoeléctrico. Otra configuración interesante para evitar problemas de alineación del interferómetro se presenta en [38], en la cuál se emplean lentes para focalizar el haz del láser. Uno de los mecanismos más baratos, sencillos de implementar y que permite variar el camino óptico con preci-

sión micrométrica se encuentra en [29], en donde se emplea un parlante conectado a un potenciómetro que permite aplicar variaciones de voltaje del orden de mV para que el diafragma se mueva según lo deseado.

Enfocados en la astronomía de ondas gravitacionales

Los interferómetros presentados hasta aquí han sido diseñados, al igual que los presentados por LIGO, pensando principalmente en la parte óptica o empleados con fines ajenos a la astronomía de ondas gravitacionales. Sin embargo existen prototipos que no solo han sido planteados enfocados en este tema de interés, sino implementados y expuestos en ferias y museos, como es el caso de [14], expuesto en el Thinktank Birmingham Science Museum y presentado en la feria Royal Society Summer Science Exhibition (RSSE) en el 2017. En este caso el interferómetro es interactivo con el público pues a través de botones las personas pueden enviar ondas gravitacionales originadas por distintos fenómenos y observar las diferencias en los patrones de interferencia en cada caso. La configuración experimental de este diseño es similar a la ya presentada aquí anteriormente: espejos perpendiculares ubicados al final de dos brazos que conforman el camino óptico y empleando piezoeléctricos a los que se les envían señales de voltaje simulando las deformaciones que detectaría LIGO. Además, esta referencia contiene una pagina web [7] en la que se detallan los materiales usados y se presentan los diagramas de circuitos empleados, siendo así uno de los diseños mas completos y referenciales para el presente proyecto.

En [36] se presenta un diseño que aporta un mayor grado de similitud en la configuración experimental de su interferómetro con respecto a LIGO introduciendo cavidades ópticas. Además se exponen tres experimentos con dicho diseño, uno de los cuales consiste en simular una onda gravitacional empleando ondas de sonido. Se enumeran y explican los pasos necesarios para realizar el experimento, desde la alineación del interferómetro hasta la ubicación del fotodiodo para el registro de datos. El artículo también presenta una extensa discusión en cuanto a sensibilidad y filtrado de las señales obtenidas, así como diagramas de circuitos. Finalmente, [19] presenta un proyecto muy similar al que corresponde

a esta revisión bibliográfica, con el fin de diseñar un interferómetro que ilustre de manera cualitativa y cuantitativa la detección de ondas gravitacionales generadas por sistemas binarios en rotación, sin embargo dicho proyecto no logró ser culminado, quedando pendiente por implementar un fotodiodo para la adquisición de datos y un mecanismo para variar el camino óptico.

1.4.2. Ondas gravitacionales

Las ondas gravitacionales pueden ser descritas empleando las ecuaciones de campo de Einstein escribiendo la métrica $g_{\mu\nu}$ como una perturbación de la métrica de Minkowski $\eta_{\mu\nu}$, es decir:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (1.1)$$

donde $h_{\mu\nu}$ son las componentes de dicha perturbación tal que $|h_{\mu\nu}| \ll 1$ y $|\partial_\sigma h_{\mu\nu}| \ll 1$. Esta aproximación es conocida como gravedad linealizada ya que bajo estas condiciones los términos cuadráticos que involucren componentes de h o sus derivadas serán despreciables [13]. Se procede ahora a calcular el tensor de Ricci $R_{\mu\nu}$ y el escalar de curvatura R , cantidades necesarias para definir el tensor de Einstein $G_{\mu\nu}$ en las ecuaciones de campo:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Empleando la métrica definida por (1.1) se obtienen las siguientes relaciones:

$$R_{\sigma\nu} = \frac{1}{2}(\partial_\mu\partial_\sigma h_\nu^\mu + \partial_\nu\partial_\alpha h_\sigma^\alpha - \square h_{\nu\sigma} - \partial_\nu\partial_\sigma h) = \partial_\mu\partial_\sigma h^{\mu\nu} - \square h$$

donde $\square = \eta^{\mu\alpha}\partial_\mu\partial_\alpha = \partial_\mu\partial^\mu$ es el operador D'Alembertiano. Definiendo un nuevo tensor $\bar{h}_{\mu\nu}$ como

$$h_{\mu\nu} = \bar{h}_{\mu\nu} + \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$$

y empleando un cambio de coordenadas tal que $\partial_\beta\bar{h}^{\alpha\beta} = 0$ (gauge de

Lorenz) se puede simplificar el tensor de Einstein de manera que $G_{\mu\nu} = -\frac{1}{2}\square\bar{h}_{\mu\nu}$. Considerando ahora una región del espacio en el vacío ($T_{\mu\nu} = 0$) junto con el tensor de Einstein obtenido se llega a la siguiente relación

$$\square\bar{h}_{\mu\nu} = 0 \quad (1.2)$$

que es fácilmente reconocible como una ecuación de onda. Las soluciones mas simples estarán dadas por ondas monocromáticas planas $\bar{h}_{\mu\nu} = \text{Re}[A_{\mu\nu}e^{i(k_\sigma x^\sigma)}]$. Dado que la onda gravitacional es una perturbación de la métrica y esta es simétrica, las 16 componentes de $A_{\mu\nu}$ pueden reducirse a 10. Sin embargo es posible reducir este tensor a solo dos componentes independientes considerando un observador con cuadrivelocidad U^μ que experimenta ondas transversales, es decir $A_{\mu\nu}U^\mu = 0$, e imponiendo que la amplitud de la onda sea simétrica $A^\mu_\mu = A = 0$. A estas condiciones se las conoce como el gauge transversal sin traza [28] que permiten identificar las polarizaciones de la onda: Para una onda viajando en la dirección z con vector de onda $\vec{k} = (\omega/c, 0, 0, \omega/c)$ y un observador $\vec{U} = (c, 0, 0, 0)$, se tiene que las dos componentes independientes de la amplitud corresponden a ondas con polarización $+$ y \times , pues un anillo de partículas de prueba oscilará según las figuras 1.2 y 1.3 . Las soluciones de esta ecuación de onda en el dominio del tiempo para un sistema binario de masas m_1, m_2 ubicadas a una distancia r estarán dadas por [26, 34]:

$$h_+(t) = \frac{1}{r} \left(\frac{GM_c}{c^2} \right)^{5/4} \left(\frac{5}{c\tau} \right) \frac{1 + \cos^2(\iota)}{2} \cos[\Phi(\tau)] \quad (1.3)$$

$$h_\times(t) = \frac{1}{r} \left(\frac{GM_c}{c^2} \right)^{5/4} \left(\frac{5}{c\tau} \right)^{1/4} \cos(\iota) \sin[\Phi(\tau)] \quad (1.4)$$

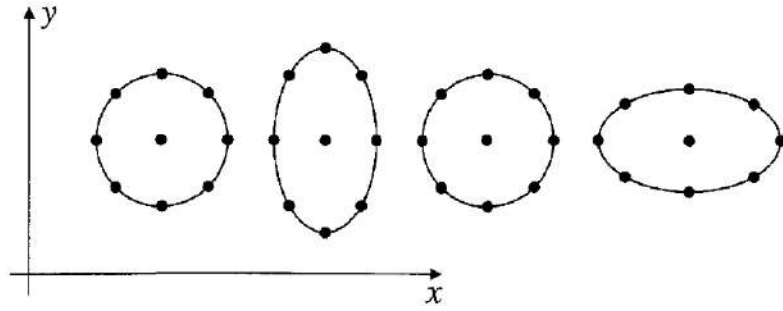


Figura 1.2: Oscilación de masas de prueba por una onda de polarización + [13].

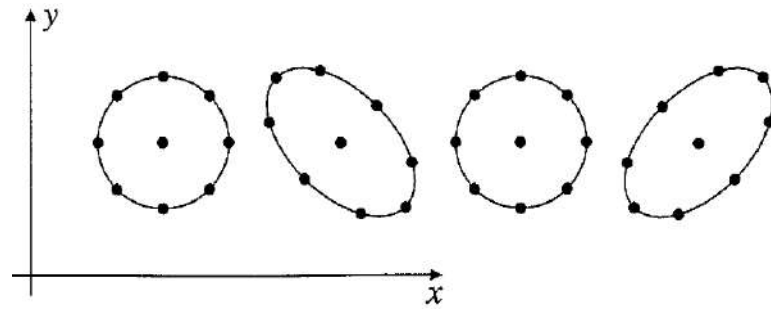


Figura 1.3: Oscilación de masas de prueba por una onda de polarización \times [13].

con G la constante de gravitación universal, ι (iota) el ángulo de inclinación del sistema respecto a la línea de observación, $\tau = \Delta t$ el tiempo registrado hasta la unión de los cuerpos, M_c y $\Phi(\tau)$ (la fase) definidos por:

$$M_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

$$\Phi(\tau) = -2 \left(\frac{5GM_c}{c^3} \right)^{-5/8} \tau^{5/8} + \phi_0 \quad (1.5)$$

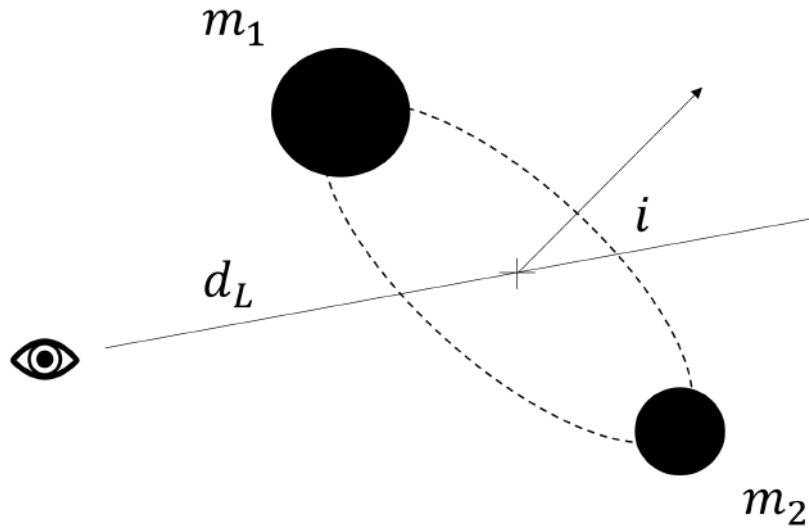


Figura 1.4: Diagrama de un sistema binario a una distancia d_L y formando un ángulo i con la línea de observación

1.4.3. Interferencia de ondas electromagnéticas

La solución mas sencilla de las ecuaciones de Maxwell [22] está dada por ondas monocromáticas planas que, en notación compleja, pueden ser escritas como

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathcal{E}e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)} = \mathcal{E}e^{i\psi} \quad (1.6)$$

con \mathcal{E} un vector de componentes complejas, ω la frecuencia angular, \mathbf{k} , \mathbf{r} los vectores de onda y de posición, respectivamente, y $\psi = \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t$ la fase. El campo con significado físico estará dado por la parte real de (1.6):

$$\text{Re}(\mathbf{E}) = \frac{1}{2}\mathbf{E} + \frac{1}{2}\mathbf{E}^* \quad (1.7)$$

Si dos ondas de este tipo con la misma frecuencia y polarización, $\mathbf{E}_1 = \mathcal{E}_1e^{i\psi_1}$ y $\mathbf{E}_2 = \mathcal{E}_2e^{i\psi_2}$, se superponen en una región del espacio de manera que $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$, su intensidad, empleando (1.6) y (1.7), estará dada por [35, 30]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \langle \cos \Delta\psi \rangle \quad (1.8)$$

con $\langle \rangle$ representando el promedio temporal sobre un período y $\Delta\psi = k\delta$ la diferencia de fase, donde δ es la diferencia de camino óptico. Si $\Delta\psi$ no depende del tiempo, se dice que las ondas son coherentes, por tanto se tendrá un término de interferencia en la intensidad. La interferencia será constructiva cuando $\Delta\psi = 2\pi m$ y destructiva para $\Delta\psi = (2m + 1)\pi$ donde $m = 0, 1, 2, \dots$.

1.4.4. Interferómetro de Michelson

Un dispositivo empleado para provocar interferencia por división de amplitud, es el interferómetro de Michelson [23], empleado originalmente para estudiar la existencia del *aether* [27]. Una posible configuración para este interferómetro consiste en una estructura con brazos perpendiculares entre sí (figura 1.1), a lo largo de los cuales se propagan haces de luz originados de un único haz incidente en el sistema y dividido por un dispositivo separador (beam splitter), que permite que la mitad de radiación lo atraviese mientras que el resto es reflejado. Los haces son reflejados nuevamente hacia el beam splitter mediante espejos ubicados en los extremos de los brazos, de manera que lo atraviesan y se superponen nuevamente en un solo haz. Uno de los haces atravesará tres veces el beamsplitter mientras que el otro solo lo hará una vez, de manera que para tener una diferencia de camino óptico nula se debería introducir una placa compensadora idéntica y paralela al beamsplitter. Para el caso de fuentes altamente monocromáticas esto no es necesario debido a que no se tendrá dispersión en otras longitudes de onda y el camino óptico se podrá ajustar únicamente con la distancia entre los espejos.

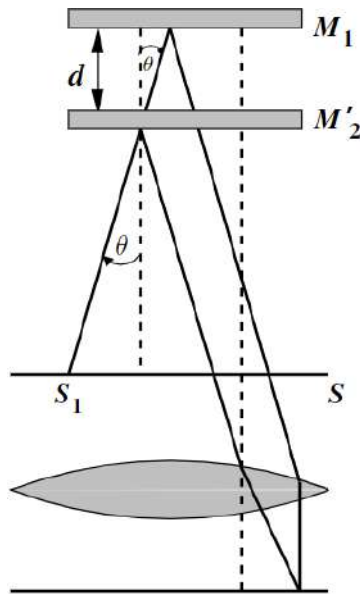


Figura 1.5: Esquema del interferómetro de Michelson con un solo eje óptico. [35]

Un sistema óptico equivalente al de la figura 1.1 de un solo eje óptico se encuentra en la figura 1.5. En este caso S representa la fuente extendida, S_1 un punto de emisión sobre la fuente y M'_2 la imagen virtual del espejo M_2 en el beamsplitter. En este esquema un haz emitido desde S_1 inclinado un ángulo θ con la horizontal será parcialmente reflejado y transmitido por el beamsplitter, generando así imágenes virtuales cuya diferencia de camino óptico a la salida del interferómetro estará dada por

$$\delta = 2d \cos \theta$$

Considerando un haz paralelo al eje óptico ($\theta = 0$) de longitud de onda λ , se tiene entonces que $\delta = 2d$ es decir, se observará interferencia constructiva por cada $\lambda/2$ de diferencia entre las distancias relativas de los espejos con el beamsplitter. Dada la simetría del arreglo experimental el patrón de interferencia obtenido serán franjas circulares concéntricas que se alejarán o acercarán al centro según d aumente o disminuya. Además, para pasar de un pico a un mínimo de intensidad se tendrá que mover los espejos tal que $d = \lambda/4$. Si una onda gravitacional de longitud de onda mayor a la longitud de los brazos del interferómetro atraviesa el mismo, la deformación inducida en sus brazos estará dada por:

$$h = \Delta L/L \quad (1.9)$$

donde L es la longitud nominal de uno de los brazos del interferómetro y ΔL la diferencia en la longitud de los mismos. Empleando la ecuación (1.8) con $I = I_{det}$ la intensidad total registrada en el detector, $\Delta\psi = k\delta = 2k\Delta L$ la diferencia de fase, I_0 la intensidad de la fuente, $I_1 = \alpha I_0$ y $I_2 = \beta I_0$ las intensidades de cada haz a la salida del interferómetro con $\alpha + \beta \leq 1/2$, se tiene que para un promedio realizado en un tiempo suficientemente largo:

$$I_{det} = I_0[(\alpha + \beta) + 2\sqrt{\alpha\beta} \cos(2khL)] \quad (1.10)$$

Capítulo 2

Metodología

Considerando que el desarrollo de un prototipo es de carácter experimental este fue el enfoque para la realización del presente proyecto. En las siguientes secciones se describen detalladamente los componentes empleados, la implementación y funcionamiento del interferómetro

2.0.1. Componente de Hardware

Diseño electrónico

Los dispositivos electrónicos empleados están tabulados en la tabla 2.1. El dispositivo central que realiza la comunicación entre las partes del circuito es un microcontrolador Arduino alimentado por una computadora. Este dispositivo recibe como entrada el tiempo de simulación para calcular la función correspondiente a una onda gravitacional (ecuación (1.3)) con los siguientes valores:

- $m_1 = 20M_{sol}$
- $m_2/m_1 = 1$
- $\iota = \pi/4$

Dispositivo	Modelo	Propiedades
Fototransistor	BPX43-4	Respuesta $\approx 10 \mu s$
Láser	SYD1230	$\lambda = 650 \text{ nm}$
Microcontrolador	Arduino Nano	ATmega328 de 32 KB
Parlante	-	$\varnothing = 65 \text{ mm}$, 8Ω
Potenciómetro	MCP41010	Resistencia: $10 \text{ k}\Omega$

Cuadro 2.1: Componentes electrónicos empleados junto con sus propiedades relevantes.

Una vez realizado el calculo se envía una señal analógica correspondiente a esta función a un parlante a través de un potenciómetro digital (figura 2.1), de esta manera un espejo que se encuentre pegado al diafragma del parlante se moverá según esta función. Se describe a continuación los detalles del funcionamiento de cada componente por separado.

- Fototransistor:

El sensor de luz fue elegido considerando principalmente su tiempo de respuesta, teniendo a disposición como posibles candidatos el LDR (fotoresistencia) y fototransistores. Se eligió este último sobre el primero debido a una respuesta de $10 \mu s$ sobre una de 100 ms . Se realizó una conexión en configuración de colector común de este sensor con una resistencia equivalente de $7.480 \text{ k}\Omega$ ya que el modo de funcionamiento deseado para este caso es en modo activo. Si V_{cc} es el voltaje con el que se alimenta al fototransistor, I_c la corriente máxima esperada y R_L la resistencia de carga entonces se debe cumplir que $V_{cc} > I_c R_L$ de manera que el voltaje de salida máxima no supere V_{cc} y el fototransistor actúe como sensor de luz en lugar de actuar como un switch. En el presente caso V_{cc} corresponde a la salida de 5 V del microcontrolador e I_c a la corriente máxima esperada con un valor de $\approx 0,6 \text{ mA}$. Tomando $I_c = 0,65 \text{ mA}$ por seguridad, se obtiene una resistencia máxima de $R_L^{mx} = 7,6 \text{ k}\Omega$. Se elige así un valor de $R_L = 7,480 \text{ k}\Omega$ para permitir una ventana de error. Como se aprecia en la figura 2.1 los datos que se registran en la entrada analógica A1 corresponden al voltaje obtenido del divisor de voltajes conformado por el fototransistor y las resistencias. Para

relacionar este valor con la intensidad de la luz incidente sobre el sensor se midió la corriente I y el voltaje V variando la intensidad del láser empleando un filtro polarizador, rotándolo entre 0° y 90° en pasos de $4,5^\circ$. Con los datos registrados se obtuvo una relación lineal $I = I(V)$ por medio de un ajuste. La dependencia de la corriente con la intensidad E aplicada al fototransistor $I = I(E)$ fue extraída de la hoja de especificaciones del fabricante empleando el software WebPlotDigitizer, en la que se presenta una relación lineal en escala logarítmica. Se calculó así la pendiente m y el punto de intersección b empleando los puntos inicial y final de la recta, parámetros de los que dependerá el siguiente modelo de potencias:

$$I(E) = 10^b E^m \quad (2.1)$$

- Láser:

Para la fuente de luz se buscó una fuente monocromática de fácil adquisición y de potencia moderada de manera que la intensidad de salida del interferómetro sea fácilmente apreciable, consiguiendo así un diodo láser de potencia de 5mW de color rojo ($\lambda = 650$ nm) con un diámetro de salida de 7 mm, dando como resultado una intensidad de 12,99 [mW/cm²]. El encendido y apagado del láser es controlado desde el microcontrolador a través de un puerto digital con voltajes de salida de 0 a 5 V. El perfil de láser es relevante en cuanto a la longitud de coherencia [30] del mismo, pues esto facilitará el posicionamiento de los espejos. Según la literatura la longitud de coherencia de los diodos láser aumenta según aumenta su corriente de alimentación [21, 31], sin embargo se optó por alimentar el láser con la salida directa del microcontrolador con un valor de 16 mA.

- Microcontrolador:

Como controlador del sistema electrónico del prototipo se buscó un microcontrolador de dimensiones pequeñas y de bajo costo, siendo Arduino nano el que cumple con dichas especificaciones. El dispositivo empleado aquí contiene un ATmega328.

- Parlante:

El movimiento de uno de los espejos se realizó empleando un parlante-

te comercial de diámetro 65 mm y una resistencia de 8Ω , alimentado por el potenciómetro digital.

- Potenciómetro digital:

Se diseñó un generador de funciones considerando que arduino nano no tiene salidas analógicas, de manera que esto se recreó empleando un potenciómetro digital de 8 bits con resistencia nominal de $10 \text{ k}\Omega$ (min. $8 \text{ k}\Omega$, máx. $12 \text{ k}\Omega$). Para obtener la respuesta conjunta entre este integrado y el parlante se tomaron valores del voltaje aplicado sobre este ultimo en función del valor digital enviado al potenciómetro desde arduino, en pasos de 20 desde 0 a 200 y de 5 desde 200 a 250.

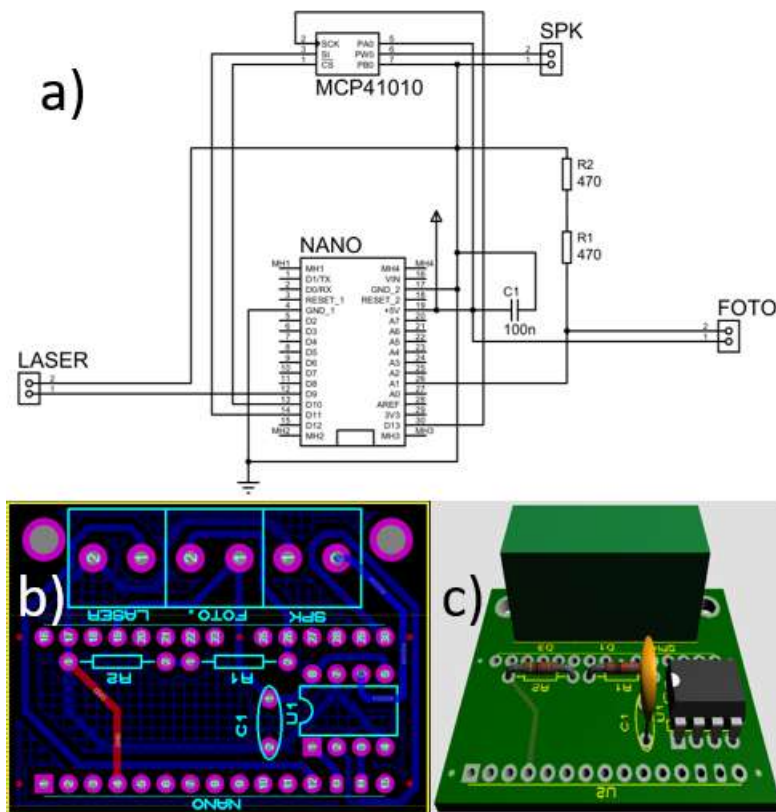


Figura 2.1: (a) Diagrama del circuito encargado de la generación de señales y la toma de datos, (b) ruteo de la placa PCB y (c) modelo 3D de la placa PCB del circuito (sin Arduino).

Elementos ópticos

La aparición y contraste de anillos de interferencia estarán determinados por la calidad de los espejos, beamsplitter, potencia del láser y distancia relativa entre los espejos. Los dos primeros parámetros pueden ser relajados si se mantiene una divergencia pequeña del láser en el interior del interferómetro, mientras que la potencia del láser usualmente es suficiente con la proporcionada por láseres comerciales. Es por esto que los componentes ópticos empleados (tabla 2.2) fueron comerciales y de bajo costo siendo los espejos obtenidos en una vidriería local y como beamsplitter una placa delgada de acrílico transparente. El último parámetro puede ser el de mayor dificultad ya que los diodos láser generalmente tienen una longitud de coherencia pequeña (<1 mm).

Componente	Descripción	Dimensiones (mm)
Espejo M1	Comercial	40x40x3
Espejo M2	Comercial	40x23x1.5
Beamsplitter	Lámina de acrílico	50x40x3

Cuadro 2.2: Componentes ópticos empleados y sus dimensiones.

Diseño estructural

La estructura del interferómetro fue diseñada considerando su portabilidad y robustez. Se optó por el empleo de impresiones 3D en plástico PLA debido a la facilidad que implica el modelado de las piezas necesarias y el bajo costo de las mismas. Se emplearon un total de 7 piezas descritas en la tabla 2.3 con sus respectivos pesos aproximados; el esquema en 3D del interferómetro puede ser apreciado en la figura 2.2 mientras que el diseño de cada pieza por separado junto con sus especificaciones se pueden encontrar en el anexo A.1 (para replicar las piezas se debe considerar la calibración de la impresora que se va a emplear pues de esto dependerán las dimensiones deseadas del objeto y en particular de las cavidades diseñadas en el mismo).

#	Pieza	Peso (g)
1	Soporte de espejo M2	21
2	Soporte de espejo M1 pt 1	20
3	Soporte de espejo M1 pt 2	10
4	Soporte de láser	22
5	Soporte de fototransistor	22
6	Soporte de splitter	11
7	Base	200

Cuadro 2.3: Piezas impresas diseñadas junto con sus pesos aproximados. El número de pieza (#) la identifica en referencia a la figura 2.2.

El tamaño de la base se eligió de 25x25 cm² garantizando la portabilidad y fácil armado del interferómetro. El soporte láser es simple y su única función es la de fijar el mismo a través de un tornillo milimétrico M4.

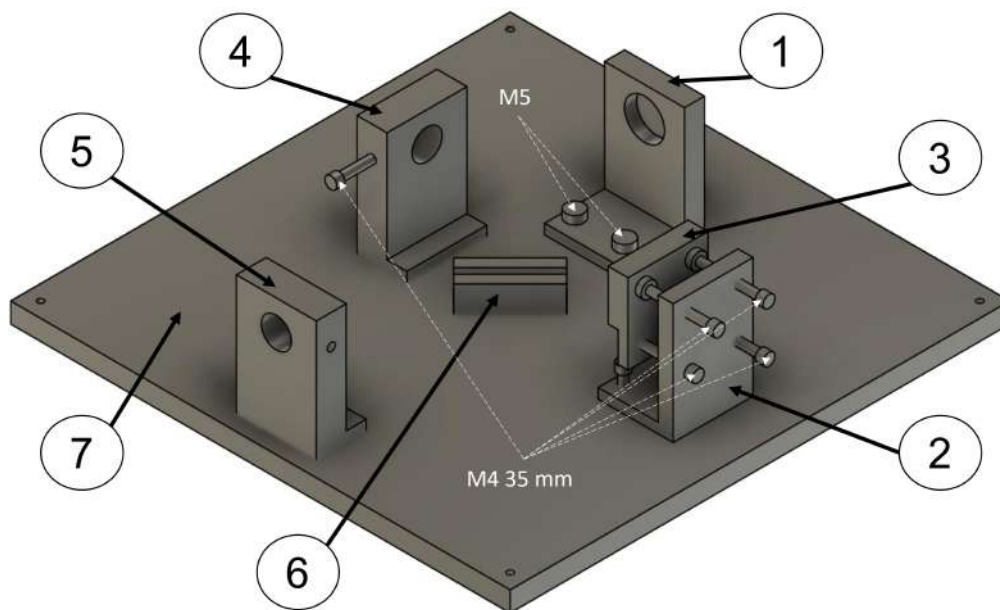


Figura 2.2: Esquema de la estructura del interferómetro con: 1) Soporte de espejo M2, 2) Soporte de espejo M1 pt1, 3) Soporte de espejo M1 pt2, 4) Soporte de láser, 5) Soporte de fototransistor, 6) Soporte de splitter y 7) la base del interferómetro.

La forma del patrón de interferencia proyectado depende además de la inclinación relativa de los espejos siendo circular para espejos perpendiculares entre sí como los obtenidos en el presente caso. Para esto

se diseñaron dos soportes: un soporte sostiene al parlante con el espejo M2 (ver la figura 1.1 como referencia) adherido a su diafragma permitiendo la movilidad del espejo a lo largo de su propio eje y un segundo soporte ajustable que permite variar la inclinación del espejo M1. Para este último se realizó un diseño inspirado en los soportes encontrados comercialmente conformados por un pivote y tornillos ajustables, junto con algunos diseños presentados en la literatura en los que se emplean imanes en lugar de resortes para impedir la separación de las partes del soporte. Se dividió así el diseño en dos piezas: un soporte fijado a la base del interferómetro y una pieza móvil a la cual se encuentra adherido el espejo M1. Estas piezas son conectadas empleando 3 imanes de neodimio de 5 mm de diámetro y 3 tornillos milimétricos (tabla 2.4), permitiendo así ajustar la inclinación del espejo.

Componente	Cantidad	Dimensiones
Tornillos M4	3	$\varnothing = 4$ mm, Longitud = 20 mm
	5	$\varnothing = 4$ mm, Longitud = 35 mm
Tornillos M5	2	$\varnothing = 5$ mm, Longitud = 15 mm
Imanes Nd	3	$\varnothing = 3$ mm

Cuadro 2.4: Elementos empleados para la unión, movimiento y ajuste de algunos de los componentes del interferómetro.

2.0.2. Componente de Software

Los diagramas de flujo de los programas realizados en Arduino y LabVIEW pueden ser apreciados en las figuras 2.3, 2.4, mientras que el código y diagrama de bloques se encuentran detallados en los anexos A.2 y A.3, respectivamente. A continuación se presenta una descripción de los mismos.

Arduino

El microcontrolador fue programado empleando el IDE de arduino y se comunica con la computadora a través de una interfaz gráfica desarrollada con el software LabVIEW. Se definen primero variables relevantes

establecidas en la sección 1.4.2, luego se asignan los pines que serán empleados por el resto de componentes electrónicos y se realiza la inicialización del puerto serial así como la comunicación SPI para el potenciómetro digital. Se da inicio al ciclo tal que en cada iteración registra primero la consola serial en busca de un carácter determinado, este será escrito en la consola desde LabVIEW a través de la interacción con la interfaz gráfica y el programa escrito en Arduino tomará una decisión al comparar este carácter. Dependiendo del carácter o conjunto de caracteres ingresados es posible controlar el encendido o apagado del láser, la generación de una señal que simule el paso de una onda gravitacional y el registro de datos. En particular, para la generación de la señal, el programa recibe como entrada el tiempo de simulación τ . Estos valores son ingresados desde la interfaz y escritos en la consola para posteriormente ser empleados en realizar el cálculo de la deformación $h_+(t)$.

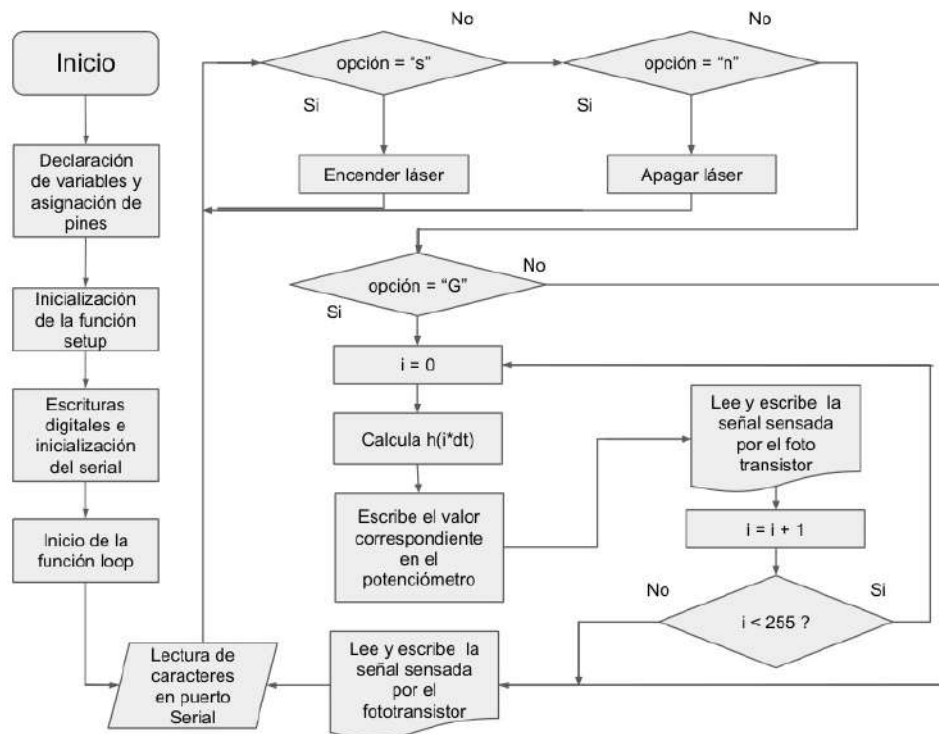


Figura 2.3: Diagrama de flujo del programa enviado al microcontrolador.

LabVIEW

Mientras que Arduino se encarga del cálculo y procesamiento de los valores ingresados o enviados, la interfaz gráfica desarrollada en Lab-

VIEW es la encargada de comunicar al usuario con el programa. Para esto la interfaz hace uso de botones, indicadores, una gráfica 2D y una tabla de datos que permiten al usuario enviar parámetros y recibir valores registrados por los sensores. Primero se especifica al programa el puerto Serial con el que se va a comunicar con el microcontrolador a través de la aplicación NI-VISA y luego comienza un ciclo que termina únicamente cuando el usuario desea finalizar el programa. En el interior de este ciclo se encuentran distintos bloques que cambian sus estados dependiendo de la interacción con los botones en la interfaz: el primero controla el envío al puerto serial de parámetros ingresados por el usuario, el segundo bloque realiza la lectura y representación gráfica de los valores enviados por el fototransistor y registrados en el serial en cada iteración, así como el encendido y apagado del láser. El tercer bloque realiza la visualización de datos en una tabla y la exportación de estos a un archivo xlsx.

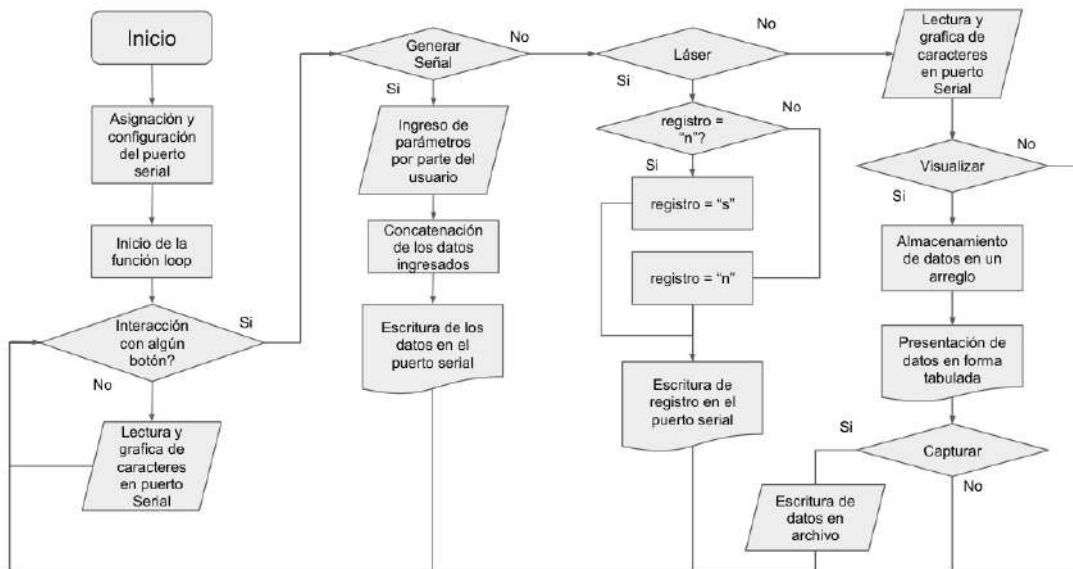


Figura 2.4: Diagrama de flujo del código empleado para la interfaz desarrollada diseñada en LabVIEW.

Capítulo 3

Resultados, conclusiones y recomendaciones

3.1. Resultados

3.1.1. Hardware

Estructura

Los modelos 3D fueron impresos con densidades del 20% a excepción de la base, para la cual se empleó una densidad del 10% para disminuir su peso debido a sus dimensiones. Para facilitar el ingreso de los tornillos algunos orificios fueron ensanchados con la ayuda de un taladro y el plástico en exceso indeseado fue lijado en los lugares necesarios. Se fijaron las piezas a la base con excepción de la pieza 3 (está es empleada junto con la pieza 2 para el armado del soporte de espejo 2) empleando tornillos para las piezas 1, 2 (de ser necesario se pueden calentar los tornillos para facilitar su introducción) y goma de fijación rápida para las piezas 4, 5 y 6. Se introdujo un tornillo M3 en la pieza 4 para el ajuste del láser y cuatro en la pieza 2 para el armado del soporte ajustable. Empleando goma se fijaron 3 imanes de neodimio en las 3 esquinas opuestas al orificio de la pieza 2 cómo se observa en la figura 3.1. Con los imanes adheridos se unió esta pieza empleando la atracción entre los imanes y tres de los tornillos, además de fijarla con el tornillo que sobra haciendo la función de pivote (figura 3.1.b).

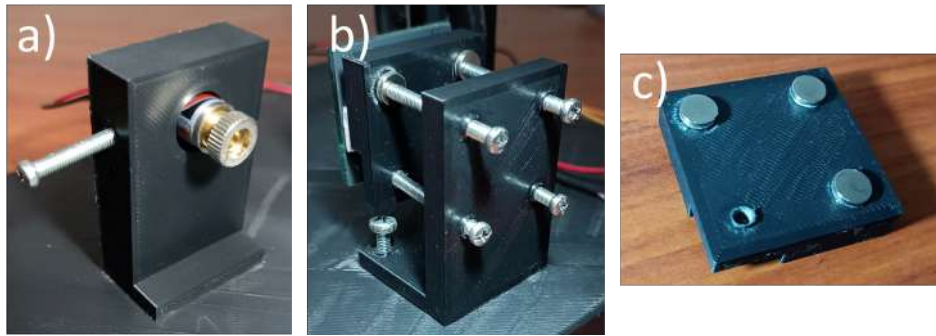


Figura 3.1: Soportes de: (a) láser (pieza #4), (b) ajustable de espejo (piezas #2 y #3 fijas) y (c) de espejo M1 pt 2 (pieza #3).

Con la estructura del interferómetro completa se procedió al montaje de los componentes ópticos: uno de los espejos fue adherido al diafragma del parlante (figura 3.2.a), el otro a la pieza 3 y el beamsplitter se colocó en el centro de la pieza 6 (figura 3.2.c). En cuanto a la ubicación de los componentes eléctricos se comenzó ajustando el láser en la pieza 4 con el tornillo introducido previamente en la misma (figura 3.1.a), la parte anterior del parlante fue adherida al espacio circular de la pieza 1 y el fototransistor fue introducido en el orificio de la pieza 5. Se colocó además cartulina blanca en la superficie de esta última pieza de manera que permita visualizar las franjas de interferencia facilitando el proceso de alineación del interferómetro (figura 3.1.b).

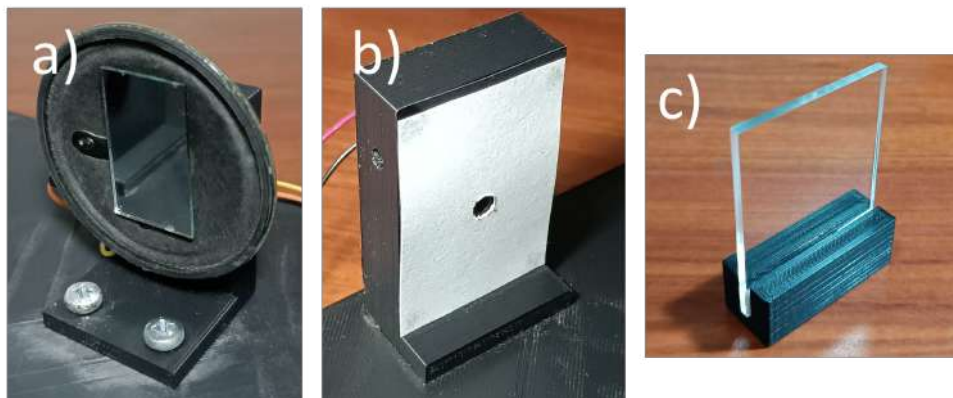


Figura 3.2: Soportes de: (a) parlante (pieza #1), (b) fototransistor (piezas #5) y (c) de splitter (pieza #8).

Electrónica

La placa PCB resultante basada en los diseños de la figura 2.1 se aprecia en la figura 3.3. La conexión del microcontrolador y el potenciómetro con la placa se realiza a través de zócalos, permitiendo así extraer estos dispositivos en caso de que sufran algún daño o presenten un funcionamiento erróneo. Es posible además conectar y desconectar el resto de componentes eléctricos empleando borneras que permiten ajustar fácilmente los cables de estos sin comprometerlos. La placa fue fijada a la base del interferómetro con el uso de dos tornillos milimétricos.

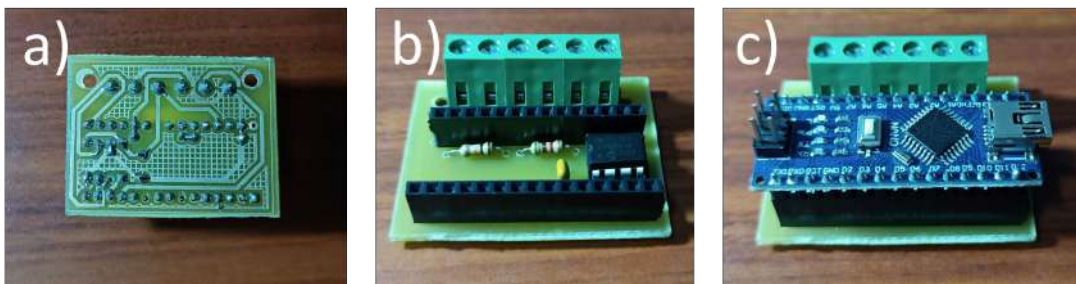
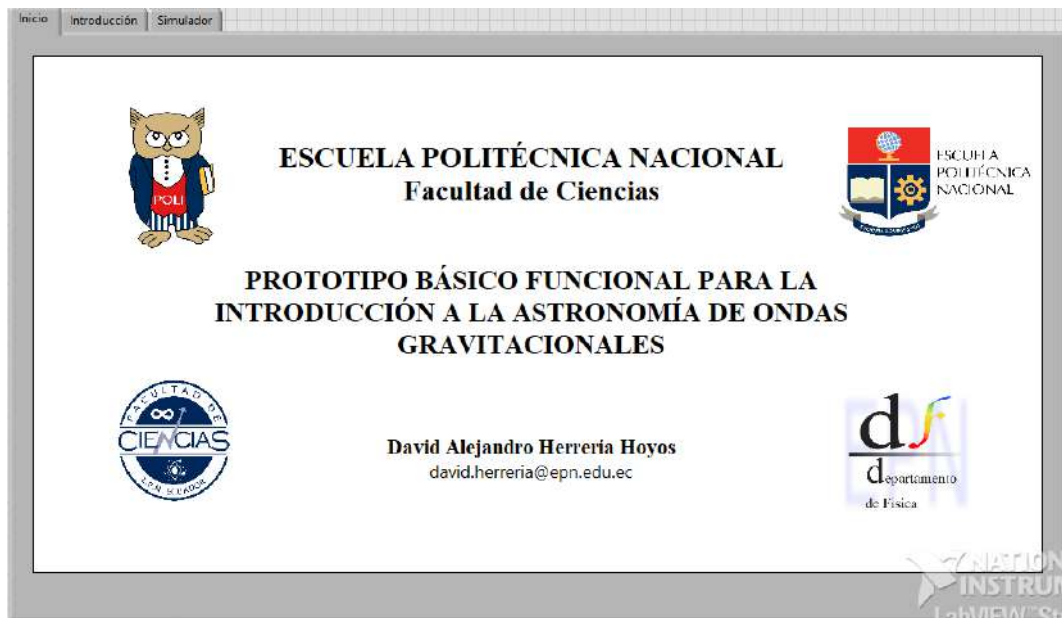


Figura 3.3: Vistas de la placa PCB: a) inferior, b) superior sin Arduino y c) superior con Arduino.

3.1.2. Software

La interfaz de usuario fue diseñada de forma que sea autoexplicativa y fácil de usar. Ésta consta de tres pestañas: la primera “Inicio” corresponde a una portada que contiene el título del presente proyecto; la segunda “Introducción” presenta una breve descripción de lo que hace el programa, los parámetros que debe ingresar el usuario y un botón que permite acceder al manual de usuario a través del navegador web; la tercera pestaña “Simulador” contiene la parte operativa del software donde están descritos los pasos a seguir para simular una onda gravitacional a través del interferómetro diseñado. Tal como se indica en la figura 3.4 los pasos que se espera siga el usuario una vez ubicado en la última pestaña son: escoger el puerto con el que se realizará la comunicación serial y la ruta del archivo en el que serán escritos los datos recopilados por los sensores. El segundo paso corresponde al encendido del láser que será seguido por una alineación manual del interferómetro. Luego el usuario debe ingresar

los parámetros empleados para el cálculo de la deformación gravitacional $h_+(t)$ a través de cuadros de texto etiquetados con su respectivo parámetro y la unidad en la que deben ser ingresados. En el siguiente paso el botón “Visualizar” debe ser activado de manera que permita la impresión de los datos registrados por los sensores en la tabla de datos. La tabla esta formada por dos columnas: la primera presenta el tiempo desde que se presionó el botón visualizar tomando como referencia el tiempo que lleva corriendo el programa, mientras que la segunda columna presenta la intensidad que registra el fototransistor, valor que es además presentado en tiempo real mientras el programa está en funcionamiento. Para enviar la correspondiente señal que inducirá una variación en el camino óptico a través del movimiento del diafragma del parlante se debe presionar el botón “Generar Señal” y, una vez registrados los datos deseados el usuario puede capturarlos en un archivo .xlsx con el botón “Capturar”.



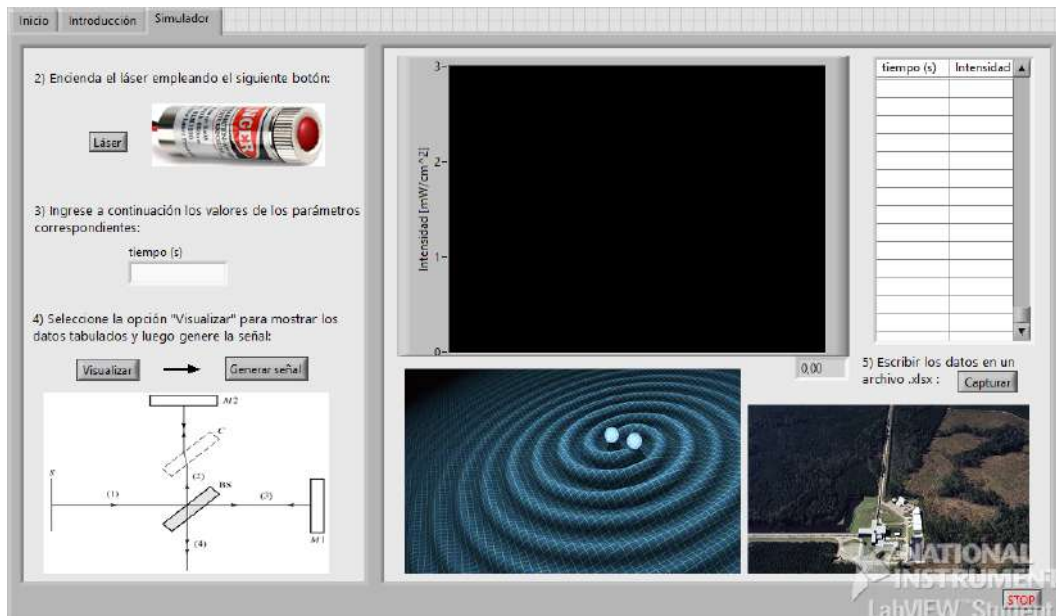
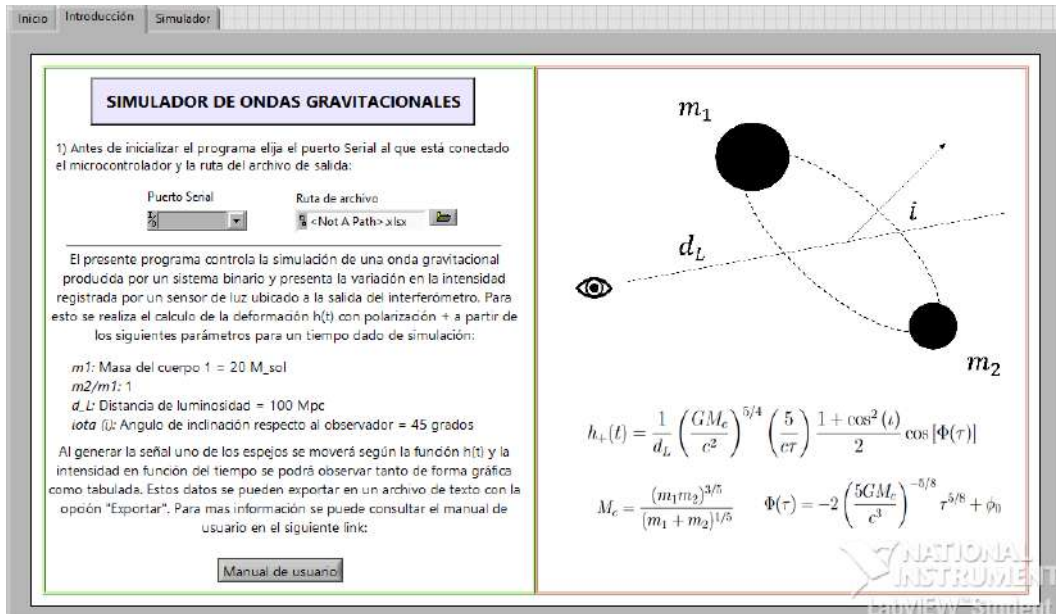


Figura 3.4: Pestañas que conforman la interfáz gráfica.

3.1.3. Interferómetro ensamblado

Una vez armado el interferómetro su alineación se realizó con la ayuda de un calibrador para determinar las distancias entre los espejos y se ajustó la inclinación del espejo M1 con ayuda de los tornillos del soporte ajustable. En la figura 3.5.a se puede apreciar la salida de los haces que recorren el interferómetro proyectados sobre la hoja blanca en el soporte del fototransistor, siendo la mancha superior la que corresponde a

la reflexión del espejo M2 y la inferior al espejo M1. Al coincidir ambas manchas se apreciaron a simple vista patrones de interferencia que son visibles incluso en un cuarto iluminado. En las figuras 3.5.b y 3.5.c se pueden apreciar patrones de interferencia circulares e hiperbólicos, respectivamente.

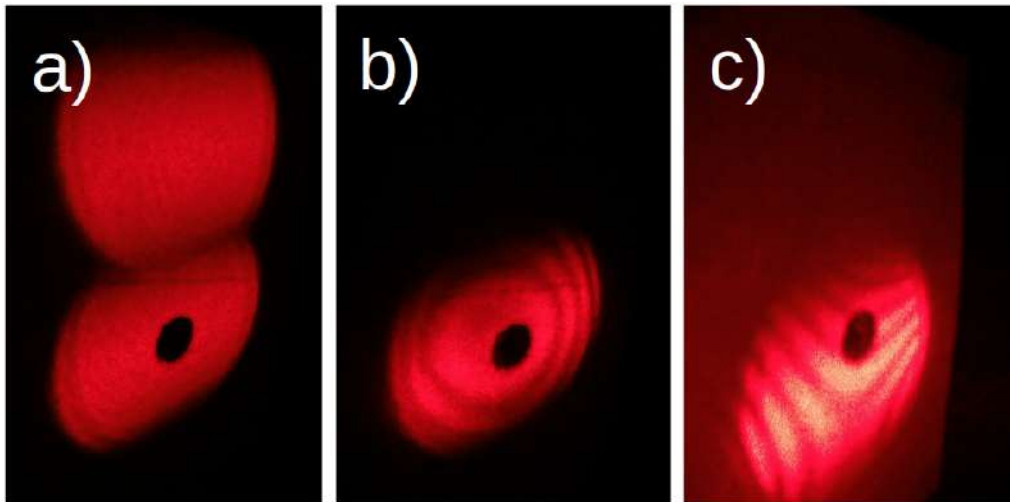


Figura 3.5: (a) Haces de luz separados proyectados a la salida del interferómetro, (b) patrón de interferencia circular al hacer coincidir los haces y (c) patrón de interferencia hiperbólico como resultado de una inclinación entre los espejos del interferómetro.

Para la obtención de los resultados que se presentan a continuación, se empleó interferencia con patrón circular haciendo coincidir el centro de los anillos con el orificio del soporte para el fototransistor. Además se eligió referirse a la intensidad con la letra E para evitar confusiones con la corriente I . Se encontró que en ocasiones el soporte ajustable produce movimientos indeseados del espejo debido a la interacción entre los imanes y los tornillos luego de ser alineado. Como resultado es posible que las franjas de interferencia se muevan hacia dentro o fuera de la circunferencia hasta que el soporte se estabilice y mantenga al espejo estático. Esto puede ser apreciado en la figura 3.6 en la que cada pico representa un máximo de interferencia y cada valle un mínimo.

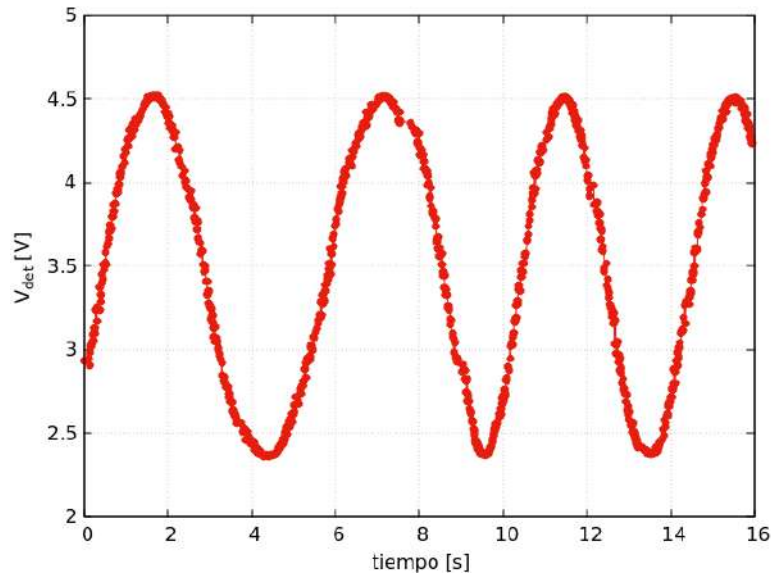


Figura 3.6: Voltaje registrado por el fototransistor en función del tiempo para un movimiento gradual de los anillos de interferencia (las barras de error son muy pequeñas para ser apreciadas).

Una vez estable y sin cambiar la distancia entre los espejos en el caso de la interferencia, se registraron los datos de voltaje medidos por el fototransistor de manera que estos representen el ruido del interferómetro con y sin interferencia (figura 3.7) en ausencia de perturbaciones externas significativas. Debido a la cantidad de datos se optó por realizar la presentación con líneas continuas para facilitar la visualización de la tendencia de los datos. La media y la desviación estándar de ambas curvas fue calculada y empleada para estimar sus relaciones de señal/ruido $SNR = 10 \log_{10} (\mu/\sigma)$:

$$SNR_{\text{interf.}} = 24,072 ; SNR_{\text{sin interf.}} = 26,638 \quad (3.1)$$

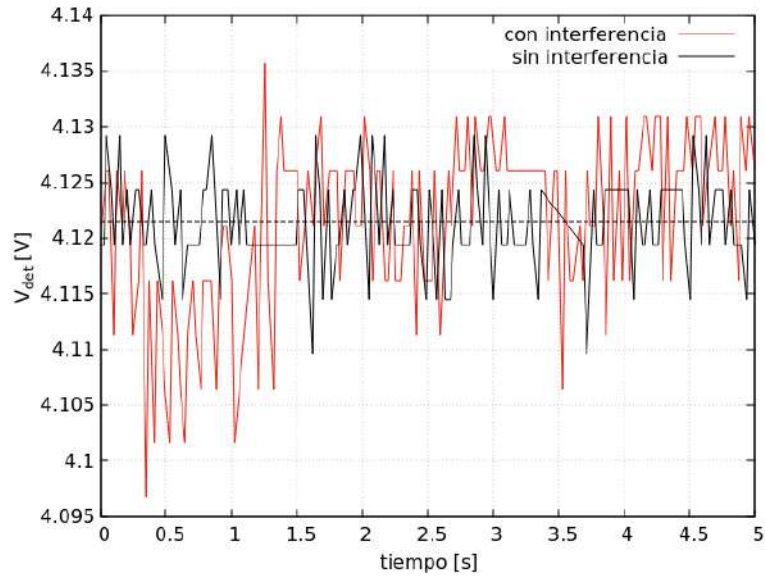


Figura 3.7: Imagen representativa del ruido registrada por el fototransistor para medición con y sin interferencia (la líneas punteada representan el valor medio).

La respuesta del fototransistor con respecto a la intensidad de luz fue obtenida según el modelo de la ecuación (2.1), donde los valores de los parámetros calculados fueron de $m = 1,0331$ y $b = 0,0219$, es decir:

$$I(E) = 1,05 E^{1,03} \text{ [mA]} \quad (3.2)$$

con E en unidades de $[\text{mW}/\text{cm}^2]$. Los datos recopilados para la corriente del fototransistor en función del voltaje de salida junto con su ajuste lineal se encuentran en la figura 3.8, donde los parámetros estimados junto con sus incertidumbres son las siguientes:

$$m = 0,6744 \pm 0,001836; \quad b = 0,004421 \pm 0,002199 \quad (3.3)$$

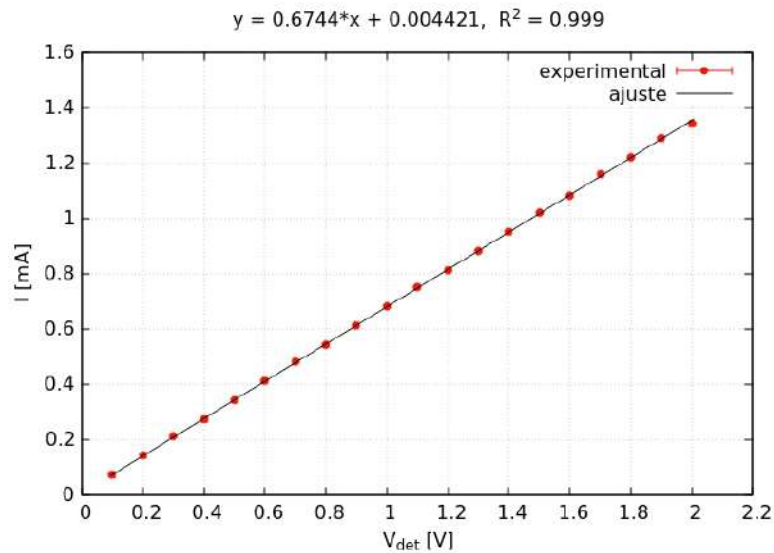


Figura 3.8: Corriente en función del voltaje medidos a la salida del transistor con su respectivo ajuste lineal (las barras de error son muy pequeñas para ser apreciadas).

La ecuación (3.2) y el ajuste lineal de la figura 3.8 permiten encontrar la dependencia entre la intensidad de luz incidente sobre el fototransistor y el voltaje que registra el microcontrolador:

$$E(V_{det}) = (0,64V_{det} + 0,004)^{0,97} \text{ [mW/cm}^2\text{]} \quad (3.4)$$

El comportamiento de esta ecuación para el rango de voltajes en el que se trabajó puede apreciarse en la figura 3.9 donde se observa una tendencia aproximadamente lineal. Considerando que los parámetros estimados en la ecuación (3.3) y los valores registrados por el sensor V_{det} tienen un rango de error, se puede estimar que la incertidumbre máxima al transformar de voltaje a intensidad será de:

$$\sigma_E^{max} = 6,22 \times 10^{-3} \text{ [mW/cm}^2\text{]} \quad (3.5)$$

La visibilidad v del interferómetro [35] es un parámetro de interés pues permite cuantificar el contraste entre las franjas de interferencia producidas. Este puede ser calculado a partir de la figura 3.6 y la ecuación (3.4), donde esta última es empleada para obtener la intensidades máxima E_{max} y mínima E_{min} :

$$v = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} = 0,3044 \quad (3.6)$$

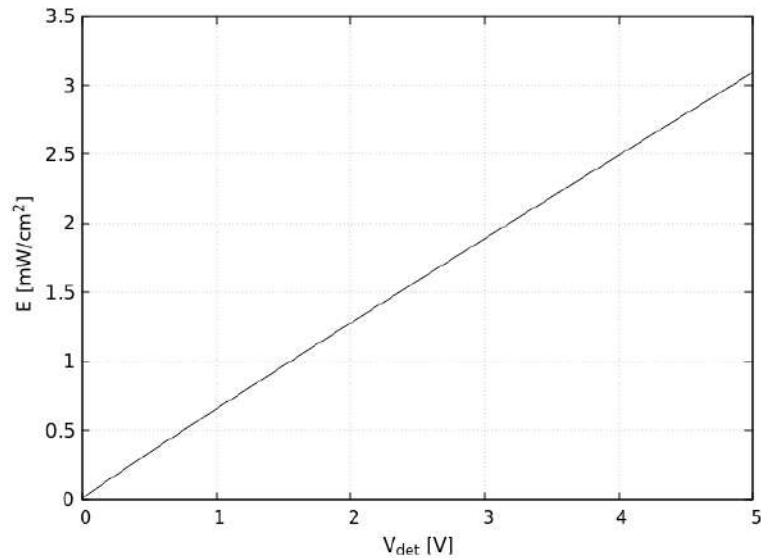


Figura 3.9: Relación funcional entre la intensidad de la luz que ilumina el fototransistor y el voltaje registrado por el mismo.

Al graficar los datos recopilados correspondientes al voltaje aplicado al parlante por el potenciómetro en función del valor digital enviado desde arduino (figura 3.10) se observa un comportamiento no lineal. Este no es el comportamiento esperado del potenciómetro y se cree que se debe a un error de calibración del mismo, a un valor muy bajo en la resistencia del parlante frente a la resistencia nominal del potenciómetro o a que el parlante no es un elemento puramente resistivo. Esto presenta un problema pues implica que el potenciómetro no responderá según la función de entrada y por tanto el parlante no se moverá de forma deseada con la excepción de que se aplique una corrección al calculo o se realice una calibración correcta.

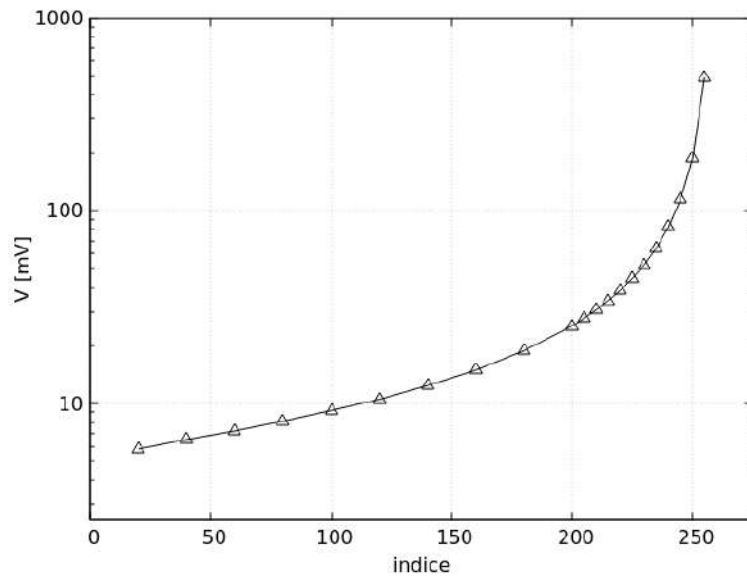


Figura 3.10: Voltaje del parlante en función del índice digital escrito en el potenciómetro.

Como resultado del comportamiento observado en la figura 3.10, al alinear el interferómetro y enviar una función lineal en función del tiempo al potenciómetro, se observan curvas como las obtenidas en las figuras 3.11 pero se esperarían tener picos y valles de intensidad separados de forma constante correspondientes al movimiento de los anillos de interferencia. En la figura 3.12 se aprecia este efecto no lineal con una función sinusoidal. El paso de un pico a un valle o viceversa en las gráficas implica un movimiento de $\lambda/4 = 0,1625 \mu\text{m}$ del diafragma del parlante lo que implica que es posible variar la diferencia en la longitud de los brazos del interferómetro en el orden micrométrico. Se observó además que el interferómetro es altamente sensible a las vibraciones externas, lo que puede dificultar la toma de datos.

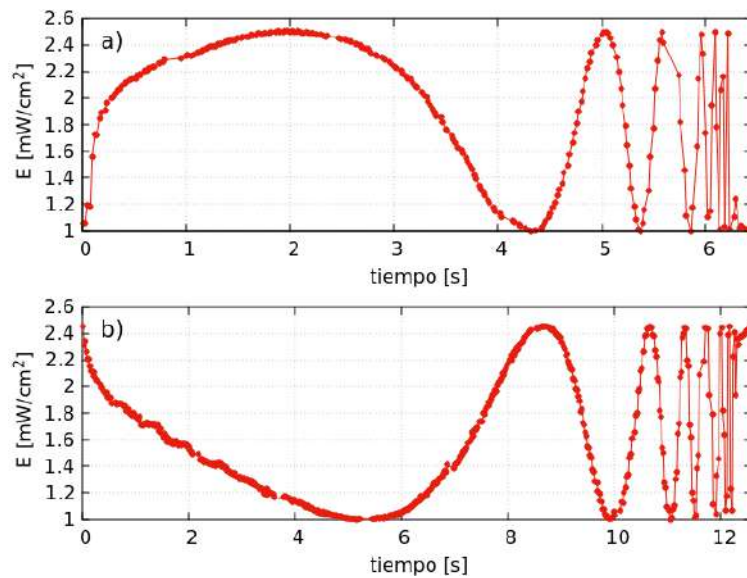


Figura 3.11: Señales registradas en el fototransistor empleando un función lineal escrita en el potenciómetro para intensidades iniciales (a) mínima y (b) máxima.

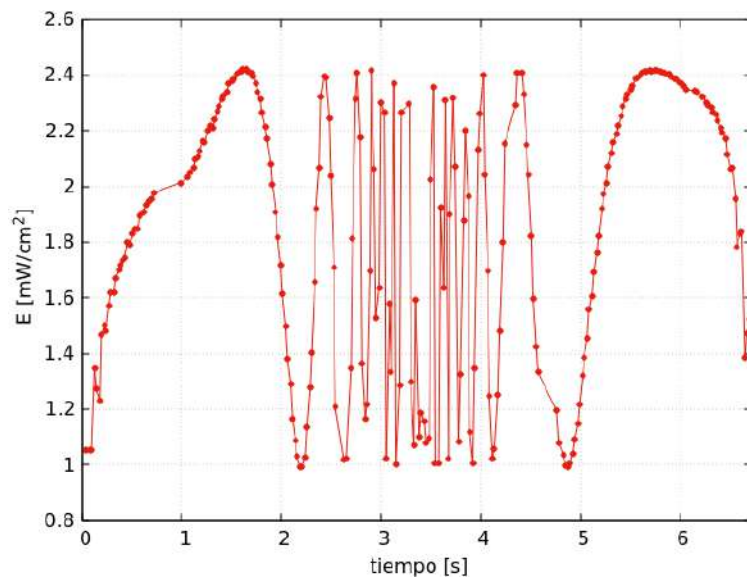


Figura 3.12: Señales registradas en el fototransistor empleando un función senoidal escrita en el potenciómetro.

Al obstruir el camino óptico en alguno de los brazos del interferómetro se pueden encontrar las constantes α (correspondiente al camino óptico del brazo con parlante) y β (correspondiente al camino óptico del brazo con soporte de espejo ajustable) de la ecuación (1.10), obteniendo así los siguientes valores:

$$\alpha = 0,0706; \beta = 0,0737 (\pm 0,0005) \quad (3.7)$$

Costos

Los precios al por menor y al por mayor de los componentes que conforman el interferómetro diseñado se encuentran en la tabla 3.1. El precio correspondiente a las piezas plásticas que conforman la estructura fue de 10 ctvs. el gramo. Un rollo de PLA de 1 kg tiene un precio de \$20 por menor y de hasta \$ 7.8. por mayor. Considerando esto y asumiendo que el precio por el servicio de impresión es el mismo se estimó el costo de la estructura al por mayor con un valor de \$ 26.87. Para la placa PCB del circuito se tomó en cuenta un precio de 15 ctvs x cm². Considerando que las dimensiones de la placa son de 4.5cmx3.5cm y estimando un descuento del 10% para su producción al por mayor se estimó un costo de \$ 2.13. En total, se estima el costo de elaboración del interferómetro en \$ 71.27. En comparación, un interferómetro de alta resolución para prácticas educativas de laboratorio puede costar hasta \$ 5022.49 (por ejemplo [Michelson interferometer - High Resolution](#) del fabricante Phywe), mientras que entre los interferómetros menos costosos similares al presente proyecto se tiene por ejemplo a [29] con un valor de \approx \$ 50, en el que se emplea un potenciómetro analógico en lugar de uno digital. Dada la funcionalidad del presente prototipo diseñado y tomando en cuenta que es posible realizar mejoras que permitan disminuir el costo del mismo, se considera que este diseño es asequible y se podría implementar sin mayor dificultad en un laboratorio.

Dispositivo	por menor (\$USD)	por mayor (\$USD)
Fototransistor	3	2.1
Láser	7.5	6.03
Microcontrolador	12	10.8
Parlante	3.25	2.27
Potenciómetro	3	2.06
Resistencias x 2	0.16	0.14
Capacitor 100 nF	0.2	0.06
Borneras x 3	1.23	0.45
Zócalo 8 pines	0.1	0.09
Zócalo 40 pines	0.32	0.29
Placa PCB	2.36	2.13
Imanes Nd x 3	1.8	1.62
Tornillos M4 x 5	2.15	1.6
Tornillos M5 x 2	1.1	0.68
Espejos x 2	1	0.9
Beamsplitter	1.5	1.35
Estructura PLA	30.6	26.87
TOTAL	71.27	59.44

Cuadro 3.1: Componentes empleados en el interferómetro junto con sus precios referenciales al por mayor (según mouser.ec, made-in-china.com) y por menor.

3.2. Conclusiones y recomendaciones

3.2.1. Conclusiones

- Se realizó el diseño e implementación de un prototipo de interferómetro de Michelson. El prototipo es portable, de bajo costo (\approx \$72,27) y su funcionamiento se controla a través de una interfaz gráfica diseñada en el software LabVIEW. La estructura del prototipo fue impresa en 3D con plástico PLA mientras que el circuito diseñado fue impreso en una placa PCB. Los componentes electrónicos empleados son de fácil adquisición en las tiendas locales por precios

asequibles. El envío y lectura de datos se controla empleando un microcontrolador Arduino nano. El registro de la intensidad de luz es realizado a través de un fototransistor y el mecanismo que varia la diferencia de camino en el interferómetro fue realizado empleando un potenciómetro digital conectado a un parlante con un espejo fijado a su diafragma. Para la alineación del interferómetro un soporte ajustable de espejo fue diseñado empleando imanes y tornillos. El soporte presenta imperfecciones que introducen error en las mediciones y efectos no deseados como el desplazamiento del origen de las franjas de interferencia. A pesar de que los componentes ópticos utilizados no son de alta precisión, se obtuvieron franjas de interferencia fácilmente visibles con patrones circulares e hiperbólicos, en las que el contraste máximo fue de $v = 0,3044$. Se encontró además que el interferómetro es muy sensible a los ruidos y vibraciones externas, lo que puede dificultar el correcto funcionamiento de este.

- Se diseñó una interfaz gráfica de usuario que permite la comunicación bidireccional entre los dispositivos que conforman el circuito electrónico del interferómetro. Por medio de esta interfaz es posible controlar el encendido del láser, la generación y visualización de una señal, y la exportación de los datos registrados a un archivo.
- Tanto el fototransistor como el potenciómetro fueron caracterizados encontrado así sus respuestas en función de la intensidad de luz para el primero y entrada digital desde arduino para el segundo. Se encontró una relación aproximadamente lineal para el fototransistor lo que permitió transformar su voltaje registrado a intensidad. Para el potenciómetro se encontró una relación no lineal que impidió el movimiento del diafragma del parlante de forma deseada. Se cree que esto puede deberse a un error de calibración del mismo o a la falta de componentes estrictamente resistivos que conforman el parlante.
- Se realizó la redacción de un manual de usuario junto con una guía de laboratorio para la ejecución de una práctica empleando el prototipo aquí presentado. En el manual se describieron en detalle las especificaciones de los componentes electrónicos empleados junto

con los pasos a seguir para poner al prototipo en funcionamiento. La guía de laboratorio fue diseñada considerando el uso de la misma para prácticas de laboratorio de nivel de grado. En esta guía se puede encontrar un breve resumen de la teoría necesaria, objetivos de la práctica, lecturas previas, materiales necesarios, procedimiento y tareas sugeridas para el análisis.

A pesar de los problemas técnicos aquí descritos, se concluye que el prototipo permite generar señales que inducen movimientos del parlante del orden micrométrico así como la extracción de datos por medio de la interfaz gráfica diseñada. Además se cree que es necesaria una cantidad de trabajo mínima para corregir los defectos en la implementación del circuito y en el soporte de espejo ajustable que permitan producir señales representativas de una onda gravitacional.

3.2.2. Recomendaciones

Se recomienda implementar un método que permita mover el diafragma del parlante de forma deseada así como amortiguar la base del prototipo de manera que sea menos propenso a movimientos externos. Se cree que es posible disminuir el peso de la estructura disminuyendo la densidad de las partes impresas o modificando el diseño. El soporte ajustable de espejo podría ser mejorado considerablemente modificando el diseño o implementando resortes en lugar de imanes. La dificultad en la alineación del interferómetro podría disminuir si se amplifica la corriente con la que se alimenta el láser o se emplea una alternativa con mayor longitud de coherencia.

Capítulo A

Anexos

A.1. Planos de las piezas

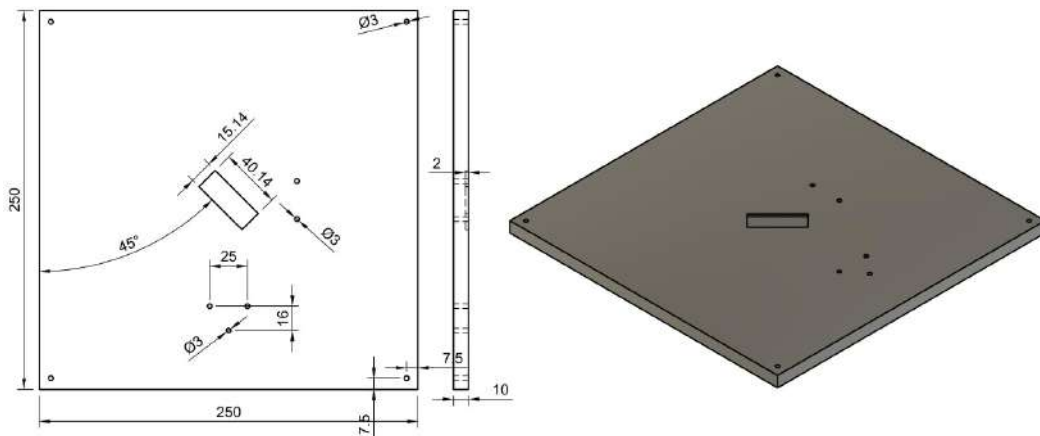


Figura A.1: Base

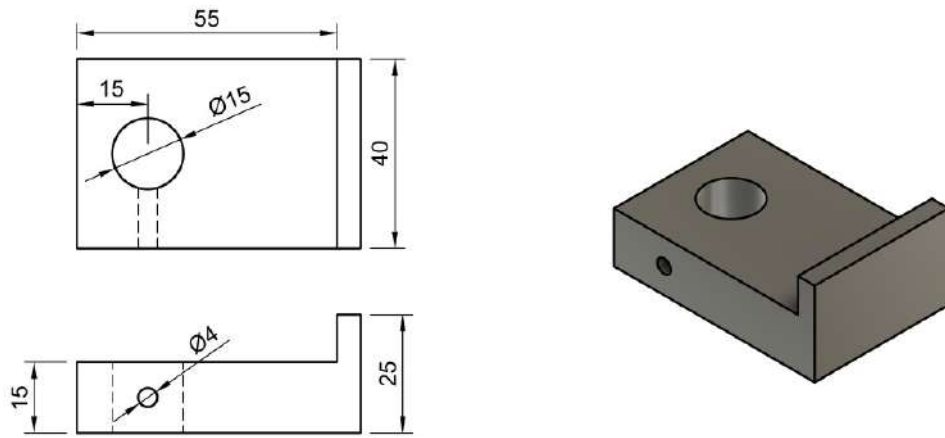


Figura A.2: Soporte de láser

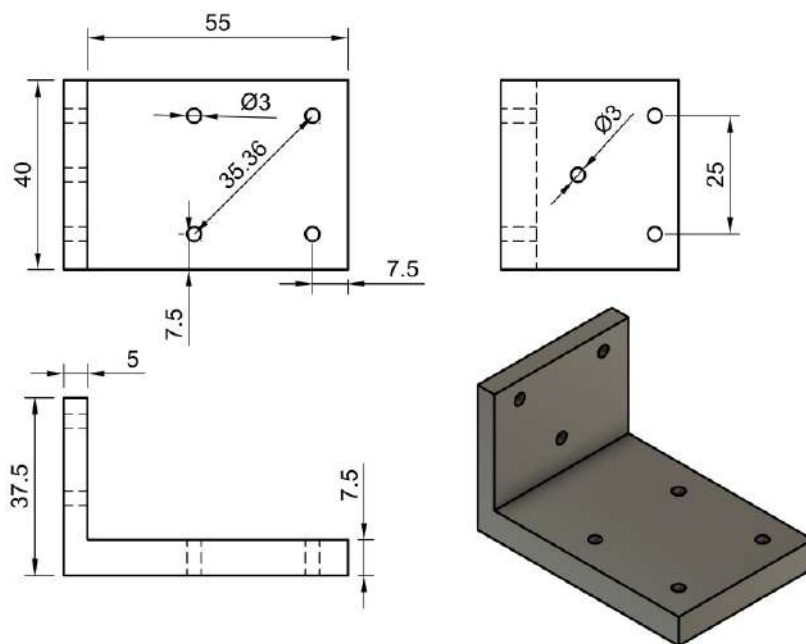


Figura A.3: Soporte de espejo 1

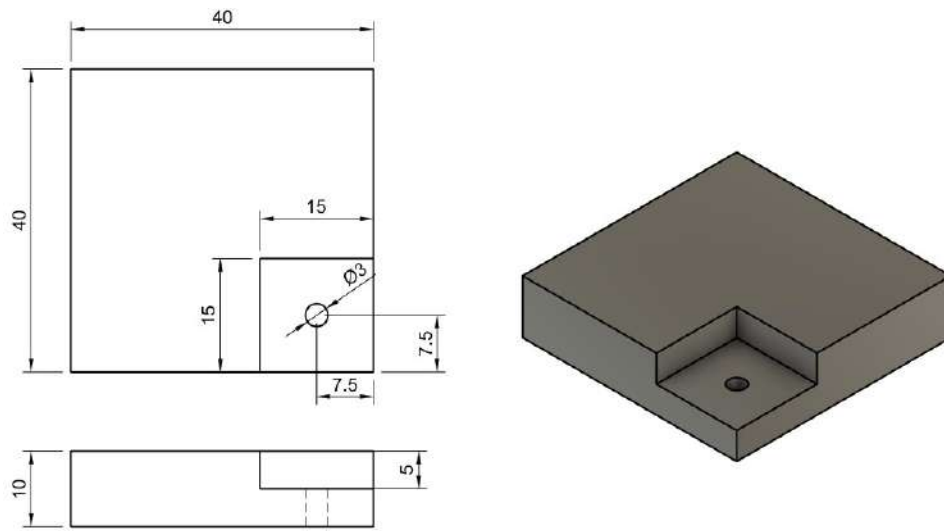


Figura A.4: Soporte de espejo 2 pt 1

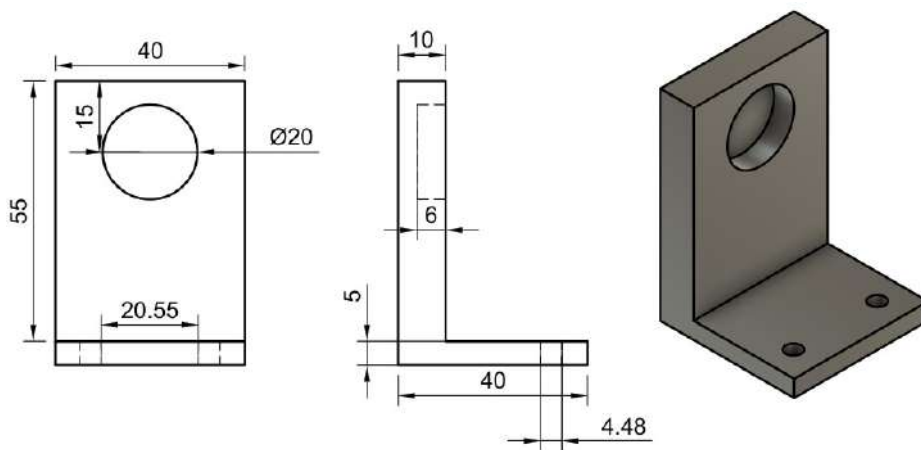


Figura A.5: Soporte de espejo 2 pt 2

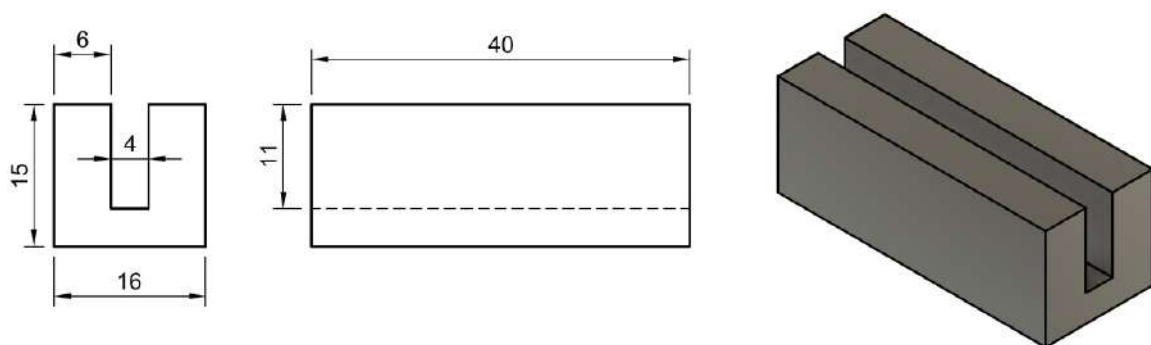


Figura A.6: Soporte de splitter

A.2. Código Arduino

A continuación se presenta el código desarrollado para el control de los componentes electrónicos en el interferómetro:

```
1 #include <SPI.h>
2 #include <math.h>
3
4 ////Definición de variables:
5
6 // Potenciometro:
7 byte address = 0x11;
8 int CS = 10; // Configura puerto digital D10.
9 int value;
10
11 // Fototransistor:
12 double foto;
13 double intensity;
14 String str;
15
16 // Laser:
17 int laserPin=9; //Configura puerto digital D9
18
19 // Onda gravitacional:
20 double d_1;
21 double G = 6.674e-11; //(m /Kgs )
22 double c = 2.99e8; //(m/s)
23 double m1 = 20*1.989e30; //20 M_sol (kg)
24 double m2;
25 float ratio;
26 double Mc;
27 double iota;
28 double Phi_o = 0.;
29 double dt, dx, t;
30 String tStr;
31 double A;
32 double B;
33 double normalize;
34
35 void setup() {
36     pinMode (CS, OUTPUT);
37     SPI.begin();
```

```

38
39     digitalPotWrite(0x00);
40     digitalPotWrite(0x80);
41     digitalPotWrite(0xFF);
42
43     pinMode(laserPin,OUTPUT);
44
45     Serial.begin(9600);
46 }
47
48 void loop() {
49
50     char option = Serial.read(); // Lectura de carácter en puerto
        serial.
51
52     // Toma de decisión en función del carácter ingresado:
53     if(option=='s')
54     {
55         digitalWrite(laserPin,HIGH); // prende laser.
56     }
57     else if(option=='n')
58     {
59         digitalWrite(laserPin,LOW); // apaga laser
60     }
61     else if (option == 'G')
62     {
63         ///// Generación de señal:
64         Serial.readStringUntil('\n');
65         tStr = Serial.readStringUntil('\n'); // lectura del tiempo.
66
67         // Asignación de valores a variables.
68         ratio = 1.;
69         d_l = 100.*3.08567758e22;
70         iota = 0.25*M_PI;
71         t = tStr.toFloat();
72
73         dt = t/244.; // t = 0.6 - 0.005 = 0.595 s
74         m2 = ratio*m1;
75         Mc = m1*pow(ratio,(3./5.))/pow((1+ratio),(1./5.));
76         A = 1./(2.*d_l)*pow(G*Mc/pow(c,2),5./4.)*pow(5./c,1./4.);
77         B = 2*pow(5*G*Mc/pow(c,3),-5./8.)*0.01;
78         normalize = A*(1+cos(iota)*cos(iota))/pow(dt,1./4.); // factor
        de normalización para h(t)

```

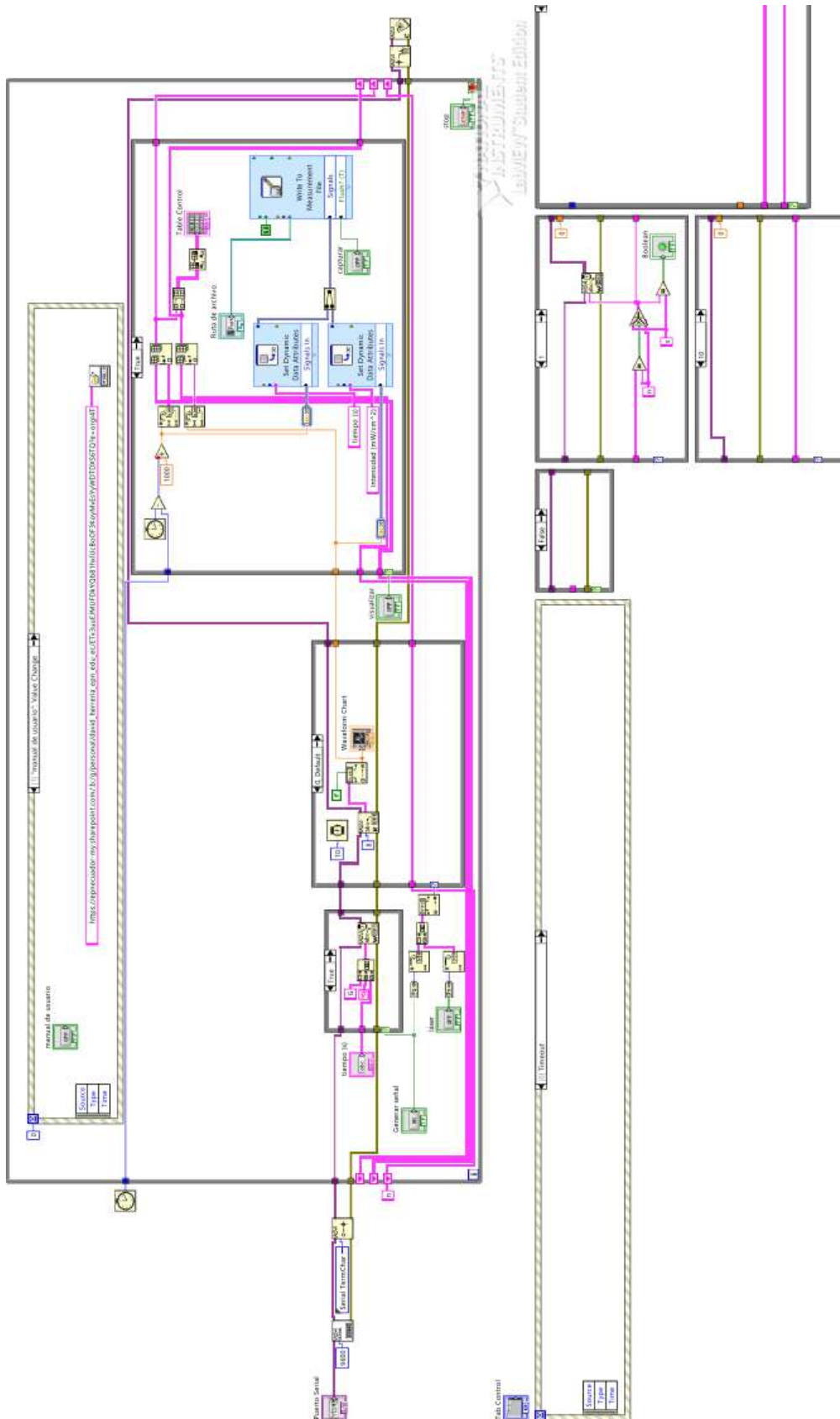
```

79
80 // Ciclo para el calculo de h(t) en cada paso y escritura en
    el potenciometro.
81 for (int i = 0; i <= 255; i++) {
82     value = round(((h_mas(-i*dt+t)/normalize)+1.)*25); //
    calculo del valor digital a enviarl al potenciometro en
    funcion de h(t)
83
84
85     digitalPotWrite(value); // escritura en el potenciometro.
86
87     // lectura y calculo de intensidad del fototransistor:
88     foto = analogRead(A1)*5./1024.;
89     intensity = pow(0.64*foto + 0.0004,0.97);
90     Serial.println(intensity,4);
91
92     delay(10); // sin() de frecuencia 1/(10ms*256) = 0.39 Hz (
    periodo = 2.56s)
93 }
94 }
95 else
96 {
97     // lectura y calculo de intensidad del fototransistor:
98     foto = analogRead(A1)*5./1024.;
99     intensity = pow(0.64*foto + 0.0004,0.97);
100    Serial.println(intensity,4);
101
102    delay(10);
103 }
104 }
105
106 // Funcion para la escritura del potenciometro
107 int digitalPotWrite(int value) {
108     digitalWrite(CS, LOW);
109     SPI.transfer(address);
110     SPI.transfer(value);
111     digitalWrite(CS, HIGH);
112 }
113
114 // Funcion para el calulo de la fase Phi(t)
115 double Phi(double t){
116     return -B*pow(t,5./8.) + Phi_o;
117 }

```

```
118
119 // Funci n para el calculo de la deformaci n h_mas(t)
120 double h_mas(double t){
121     return A/pow(t,1./4.)*(1+cos(iota)*cos(iota))*cos(-B*pow(t,5./8
        .));
122 }
```

A.3. Diagrama LabVIEW



A.4. Manual de usuario

Manual de usuario

PROTOTIPO BÁSICO FUNCIONAL PARA LA INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA DE ONDAS GRAVITACIONALES

En esta guía se describen las especificaciones técnicas de los principales componentes electrónicos empleados y el manual para el correcto funcionamiento del prototipo de interferómetro de Michelson para la introducción a la astronomía de ondas gravitacionales.

1. Especificaciones

1.1. Fototransistor

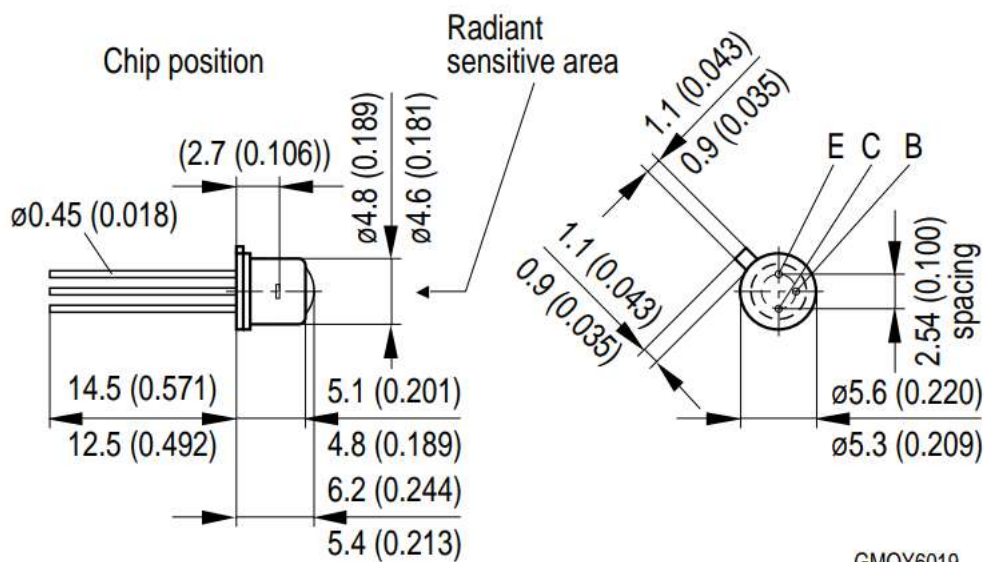


Figura A.7: Esquemático del fototransistor con sus dimensiones y conectores.

El fototransistor BPX43-4 de OSRAM es un componente electrónico que se utiliza para detectar y amplificar la luz en diversos dispositivos y sistemas. El dispositivo es muy sensible a la luz y ofrece una excelente relación señal-ruido. El dispositivo es relativamente barato en comparación con otros tipos de sensores de luz, lo que lo hace una opción popular para aplicaciones de bajo costo y alta producción. Su rápida respuesta a la luz, alta sensibilidad y estabilidad mecánica y térmica hacen que sea una opción que destaca entre otras mas comunes como los LDR.

- Tipo de dispositivo: Fototransistor de silicio NPN
- Sensibilidad espectral: 550 nm (pico)
- Ángulo de recepción: +/- 10 grados
- Tiempo de respuesta: 1,5 μ s
- Ganancia de corriente: mínimo 100
- Potencia de entrada óptica: 1 mW
- Voltaje de colector a emisor máximo (VCEO): 70 V
- Corriente de colector continua máxima (IC): 50 mA
- Potencia disipada máxima (PD): 200 mW
- Temperatura de operación: -40°C a +85°C
- Tipo de montaje: THT (pasante)

1.2. Láser

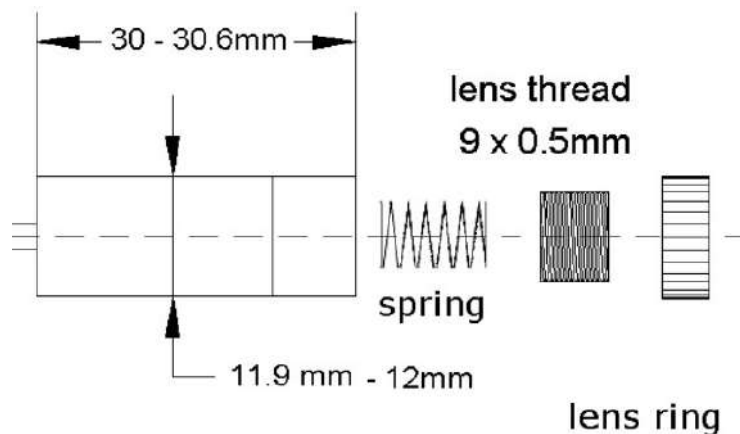


Figura A.8: Diagrama del láser empleado con sus respectivas dimensiones y componentes.

El láser SYD1230 se basa en la tecnología de diodos bombeados por láser (DPSS, por sus siglas en inglés), que utiliza un láser de diodo como fuente de energía para excitar un medio activo de cristal sólido. El medio activo es generalmente un cristal de Nd:YAG (itrio-aluminio-granate dopado con neodimio) que se utiliza para producir luz láser en el rango de longitud de onda de 1064 nanómetros.

1.3. Microcontrolador

- Procesador:
 - Microcontrolador: ATmega328P
 - Velocidad: 16 MHz
- Memoria:
 - Memoria flash: 32 KB (2 KB utilizados por el bootloader)
 - SRAM: 2 KB
 - EEPROM: 1 KB
- Entrada/salida:
 - Pines de entrada/salida digitales: 14, de los cuales 6 pueden utilizarse como salidas PWM

- Pines de entrada analógica: 8 máxima de salida de cada pin: 40 mA
- Comunicaciones:
 - Puerto serie, interfaz I2C y SPI.
- Alimentación:
 - Voltaje de entrada recomendado: 7-12V
 - Voltaje de entrada límite: 6-20V
 - Regulador de voltaje integrado: sí (5V o 3.3V)
- Dimensiones:
 - Tamaño: 45 x 18 mm
 - Peso: 5 g (aproximadamente)

1.4. Parlante

El parlante a emplear puede ser cualquier parlante comercial considerando un diámetro lo suficientemente grande para fijar uno de los espejos en su diafragma. Para el presente prototipo se usó uno con las siguientes propiedades:

- Diámetro: 65 mm
- Resistencia: 8 Ω

1.5. Potenciómetro

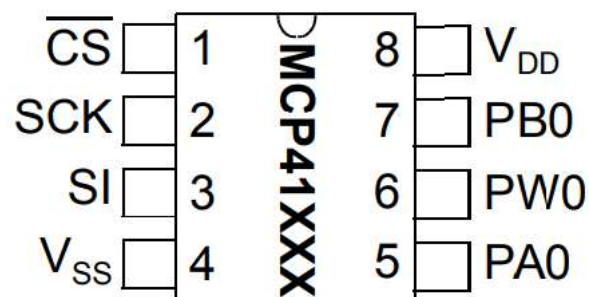


Figura A.9: Esquemático del interferómetro con sus respectivos pines.

El MCP41010 es un potenciómetro digital fabricado por Microchip Technology Inc. Este componente es un dispositivo de una sola vía, lo que significa que solo permite ajustes en una dirección, y tiene una resistencia nominal de 10 k. El MCP41010 también tiene una alta resolución, lo que permite una gran precisión en la configuración de la resistencia. La interfaz SPI permite enviar comandos de control y datos al MCP41010, lo que permite ajustar la resistencia en tiempo real.

- Rango de resistencia: 10 kOhm.
- Resolución: 256 pasos.
- Tensión de alimentación: 2.7V a 5.5V.
- Interfaz: SPI de 3 hilos.
- Consumo de corriente: 80 uA (típico).
- Temperatura de operación: -40°C a 85°C.
- Paquete: SOIC de 8 pines.

2. Procedimiento

1. [Descargar](#) el programa: Descarga el software ejecutable que te permitirá comunicar el interferómetro con tu computadora a través de una interfaz gráfica.
2. Preparación del equipo: antes de utilizar el prototipo, asegúrate de que el Arduino Nano y tu computadora estén conectados correctamente. Además se debe comprobar que el láser esté ajustado, el parlante fijo y que el fototransistor BPX43-4 esté ubicado en el orificio de su soporte de forma correcta y sin obstrucciones para detectar la luz del láser.
3. Alineación del espejo con soporte ajustable: para obtener resultados precisos con el prototipo, asegúrate de que los espejos estén alineados correctamente. Ajusta la posición del espejo con soporte ajustable moviendo los tornillos de manera que la distancia que hay

entre el espejo del parlante y el beamsplitter sea aproximadamente la misma que hay entre este ultimo y el espejo ajustable. Este ajuste se puede realizar empleando un calibrador.

- Configuración de la interfaz gráfica: Al abrir la interfaz podrás recorrer las diferentes pestañas de la que está compuesta. La primera corresponde a la portada con el nombre del autor, la segunda a una breve introducción del programa y los parámetros que definen el calculo de la onda gravitacional. Además en esta pestaña deberán seleccionarse el puerto al que se conectó el microcontrolador y el archivo de salida en el se almacenarán los resultados (este debe ser creado con anterioridad). Luego se debe dar inicio al programa empleando la flecha en la parte superior del mismo (los pasos están señalados en la figura A.10)

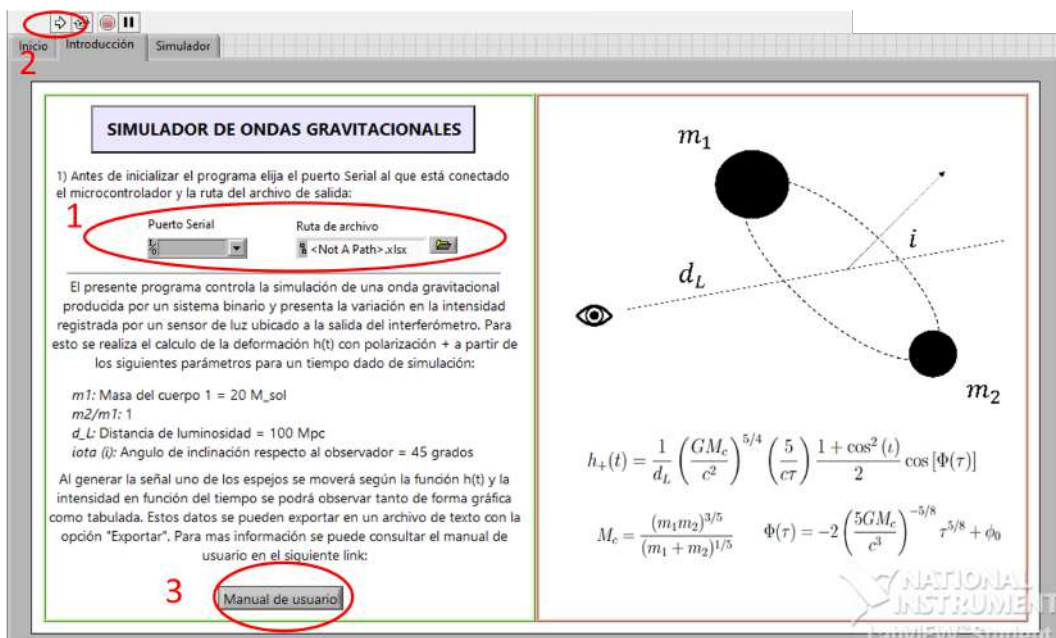


Figura A.10: Flujo a seguir en la interacción con la interfaz gráfica en la pestaña “Introducción”.

- Interferencia: para utilizar el prototipo, enciende el láser empleando el botón con el mismo nombre que se encuentra en la pestaña “Simulador” (paso 4 en fig. A.11) y verifica que se proyecten franjas de interferencia visibles alrededor del orificio del soporte del sensor de luz. De no ser este el caso repite el paso 3 hasta obtener una correcta alineación entre los espejos.

6. Ingresar los parámetros: Una vez que las franjas de interferencia sean claramente visibles y su origen alineado con el fototransistor, se deben ingresar el tiempo con el que se simulará el paso de una onda gravitacional (paso 5 en A.11).
7. Generación de la señal y toma de datos: Luego de escribir los parámetros deseados que describirán la deformación gravitacional se debe presionar el botón “Visualizar” para activar el registro de datos y su visualización en la tabla de la figura A.11 (paso 6) . Luego se debe presionar el botón “Generar señal” (paso 7) de manera que se mande la señal al potenciómetro y este mueva el diafragma del parlante. Luego de observar en la gráfica de la interfaz la variación en la intensidad correspondiente a la señal enviada, se debe presionar el botón “Capturar” (paso 8), así los datos registrados hasta ese momento serán almacenados en el archivo .xlsx elegido al inicio. El programa sobrescribe por defecto el archivo elegido, por lo que se deberá tener precaución en caso de que se deseen realizar varias tomas de datos.
8. Para finalizar, se debe detener la captura de datos, apagar el láser y detener el programa con el botón “STOP”.



Figura A.11: Flujo a seguir en la interacción con la interfaz gráfica en la pestaña “Simulador”.

A.5. Práctica de laboratorio

Simulación de una onda gravitacional con un interferómetro de Michelson

En este experimento se observa la interferencia en un interferómetro de Michelson y se simula el paso de una onda gravitacional a través del mismo dados los parámetros iniciales relevantes.

Teoría: La detección de ondas gravitacionales con interferómetros de Michelson se basa en la idea de que las ondas gravitacionales, que son perturbaciones en el tejido del espacio-tiempo causadas por objetos masivos en movimiento, pueden ser detectadas midiendo las pequeñas fluctuaciones h que causan en la distancia ΔL entre dos espejos separados a lo largo de brazos perpendiculares entre sí. La relación entre estas variables estará dada por $h = \Delta L/L$ mientras que para un sistema binario de cuerpos en rotación ubicado a una distancia r , la solución de la ecuación de onda con polarización $+$ para una perturbación en la métrica está descrita por:

$$h_+(t) = \frac{1}{r} \left(\frac{GM_c}{c^2} \right)^{5/4} \left(\frac{5}{c\tau} \right) \frac{1 + \cos^2(\iota)}{2} \cos[\Phi(\tau)]$$

donde G es la constante de gravitación universal, M_c la masa “chirp”, τ el intervalo de tiempo, c la velocidad de la luz, ι el ángulo de inclinación y Φ la fase. Un interferómetro de Michelson es un dispositivo que divide un haz de luz en dos caminos perpendiculares y luego los vuelve a unir para medir la diferencia de fase $\Delta\psi$ entre ellos a partir de la intensidad I registrada a la salida del interferómetro:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\psi$$

con I_1 y I_2 las intensidades de salida de cada brazo. La diferencia de fase puede ser calculada en función de la diferencia de camino óptico δ como $\Delta\psi = k\delta$, siendo k el número de onda.

Objetivos generales

1. Desarrollar un entendimiento básico de como se genera una onda gravitacional.
2. Entender el funcionamiento de un interferómetro de Michelson.
3. Relacionar la intensidad registrada por un interferómetro y la variación en las distancias de sus brazos inducida por el paso de una onda gravitacional.
4. Simular una onda gravitacional con el prototipo y analizar cualitativamente lo observado.

1. Lecturas previas a la práctica

1.1. Temas

1. Interferencia de ondas electromagnéticas.
2. Deformación del espacio-tiempo por objetos masivos.
3. Detectores de ondas gravitacionales.
4. Fuentes de ondas gravitacionales
5. Momento cuadrupolar.

1.2. Bibliografía recomendada

1. Secciones 6.1 y 6.2 de *Optics Principles and Applications* - K. Sharma, Elsevier, 2006. Se sugieren además las secciones 8.1 y 8.10 de *Introduction to Optics* - Frank L. Pedrotti, Leno M. Pedrotti, and Leno S. Pedrotti, 3 edition, 2017, donde además se presentan cálculos simples referentes a los interferómetros de ondas gravitacionales.

2. Capítulo 8 de *General Relativity and Gravitational Waves - Essentials of Theory and Practice* - Sanjit Mitra Sanjeev Dhurandhar, UNITEXT for Physics, Springer Nature Switzerland AG, 1 edition, 2022. En particular la sección 8.7.
3. En *Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments* - Michele Maggiore, Oxford University Press, USA, 2007, se presenta una extensa discusión sobre la teoría y métodos de detección de las ondas gravitacionales. En particular se sugieren los capítulos 3, 4 y 9.
4. Capítulo 7 de *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity* - Sean Carroll, 2004. En particular la sección 7.7.
5. Secciones 6.4 y 9.6 de *Gravitation: Foundations and Frontiers* - T. Padmanabhan, Cambridge University Press, 2010.

2. Preguntas previas a la práctica

1. ¿Qué es una onda gravitacional?
 - a Una onda electromagnética generada por la aceleración de cargas eléctricas.
 - b Una onda mecánica generada por la vibración de partículas en un medio elástico.
 - c Una onda producida por la perturbación del espacio-tiempo causada por la aceleración de masas.
2. ¿Cómo se detectan las ondas gravitacionales?
 - a A través de un telescopio de rayos X.
 - b A través de un telescopio de radio.
 - c A través de un interferómetro láser.
3. ¿Qué es un interferómetro de ondas gravitacionales?
 - a Un dispositivo que mide la deformación del espacio-tiempo causada por ondas gravitatorias
 - b Un dispositivo que mide la velocidad de las ondas gravitatorias

- c Un dispositivo que genera ondas gravitatorias
4. La amplitud de una onda gravitacional varía según la distancia a la que se encuentra un sistema binario según la forma:
- a $\frac{1}{r}$
 - b $\frac{1}{r^2}$
 - c $\frac{1}{r^3}$

3. Guía de laboratorio

3.1. Materiales

- Interferómetro de Michelson con simulador de onda gravitacional (utilizando el arduino nano, potenciómetro MCP41010, parlante, fototransistor BPX43-4 y láser).
- Espejos planos.
- Beamsplitter.
- Calibrador.
- Cable USB Mini-B a USB.
- Computadora con la interfaz gráfica correspondiente al interferómetro.

3.2. Procedimiento

1. Asegurarse de que todos los componentes del circuito estén conectados y configurados correctamente.
2. Verificar que la distancia entre los espejos y el beamsplitter sea aproximadamente la misma.
3. Conectar el interferómetro a la computadora y ejecutar la interfaz gráfica.
4. Elegir el puerto al que se conectó el dispositivo y el archivo .xlsx (previamente creado) en el que los datos serán capturados.

5. Encender el láser y alinear el interferómetro con el soporte ajustable hasta observar franjas de interferencia circulares.
6. Generar la señal gravitacional y observar la intensidad registrada por el fototransistor.

4. Preguntas y tareas sugeridas para el análisis

1. Para la obtención de franjas de interferencia visibles a la salida del interferómetro la diferencia entre las distancias de los espejos al beamsplitter debe ser:
 - a Lo mas grande posible.
 - b Lo mas pequeña posible.
 - c La mitad de la longitud de uno de los brazos del interferómetro.
2. Para obtener un patrón circular de interferencia los espejos deben estar ubicados de forma:
 - a Inclínados con un ángulo menor a 45° .
 - b Paralelos.
 - c Perpendicular.
3. Para pasar de un máximo a un mínimo de intensidad el diafragma del parlante tuvo que haberse movido una distancia igual a:
 - a 0.1625 nm
 - b 0.325 nm
 - c 0.525 nm
4. Sugiera un método para estimar los parámetros de la onda gravitacional a partir de los datos recopilados con el sensor de luz.

Referencias bibliográficas

- [1] Build your own michelson interferometer. URL: https://dcc.ligo.org/public/0117/T1400762/001/interferometer_2014.pdf.
- [2] Desktop michelson-morely interferometer : 5 steps (with pictures) - instructables. URL: <https://www.instructables.com/Desktop-Michelson-Morely-Interferometer/>.
- [3] Diy lego light interferometer : 7 steps - instructables. URL: <https://www.instructables.com/DIY-LEGO-Light-Interferometer/>.
- [4] Educator guide: Dropping in with gravitational waves | nasa/jpl edu. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/dropping-in-with-gravitational-waves/>.
- [5] Gravitational wave open science center. URL: <https://www.gw-openscience.org/>.
- [6] Gravitational waves. URL: https://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/programs/cosmictimes/downloads/lessons/1993/Gravitational_Waves.pdf.
- [7] Interactive michelson exhibit. URL: <http://www.sr.bham.ac.uk/exhibit/partslist.html>.
- [8] Make your own *really* cheap interferometer : 5 steps (with pictures) - instructables. URL: <https://www.instructables.com/Make-Your-Own-Really-Cheap-Interferometer/>.

- [9] Searching for gravitational waves in noisy data - a classroom activity | quarknet. URL: <https://quarknet.org/content/searching-gravitational-waves-noisy-data-classroom-activity-0>.
- [10] Try this at home | ligo lab | caltech. URL: <https://www.ligo.caltech.edu/page/activities-try-home>.
- [11] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, and *et al.* Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, 116(6), feb 2016. arXiv:1602.03837, doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102.
- [12] M.C. Buncick, P. G. Betts, and D. D. Horgan. Using demonstrations as a contextual road map: Enhancing course continuity and promoting active engagement in introductory college physics. *International Journal of Science Education*, 23(12):1237–1255, 2001. arXiv:<https://doi.org/10.1080/09500690010025030>, doi:10.1080/09500690010025030.
- [13] Sean Carroll. *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. 2004.
- [14] S. J. Cooper, A. C. Green, H. R. Middleton, C. P. L. Berry, R. Buscicchio, E. Butler, C. J. Collins, C. Gettings, D. Hoyland, A. W. Jones, J. H. Lindon, I. Romero-Shaw, S. P. Stevenson, E. P. Takeva, S. Vinciguerra, A. Vecchio, C. M. Mow-Lowry, and A. Freise. An interactive gravitational-wave detector model for museums and fairs. *American Journal of Physics*, 89:702–712, 7 2021. URL: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/10.0003534>, doi:10.1119/10.0003534.
- [15] Catherine Crouch, Adam P. Fagen, J. Paul Callan, and Eric Mazur. Classroom demonstrations: Learning tools or entertainment? *American Journal of Physics*, 72(6):835–838, 2004. arXiv:<https://doi.org/10.1119/1.1707018>, doi:10.1119/1.1707018.
- [16] Ewan Douglas and Ligo Hanford Observatory. Laser interferometer gravitational wave observatory the magnetic michelson interferometer. the magnetic michelson interferometer, ligo-t0900393. 2009. URL: <http://www.ligo.caltech.edu/>.

- [17] R. W. P. Drever. *Quantum Optics, Experimental Gravitation, and Measurement Theory*, volume 94. Plenum Press, 1984. doi:10.1080/713821601.
- [18] Albert Einstein. *Akademie-Vorträge*. 1978.
- [19] Tyco Mera Evans. Demonstration / Lecture Plan for the Introduction of Gravitational Wave Astronomy. (May), 2020.
- [20] P J Fox, R E Scholten, M R Walkiewicz, and R E Drullinger. A reliable, compact, and low-cost michelson wavemeter for laser wavelength measurement. *Citation: American Journal of Physics*, 67:624, 1999. URL: <http://dx.doi.org/10.1119/1.19335><http://scitation.aip.org/content/aapt/journal/ajp/67/7?ver=pdfcov>, doi:10.1119/1.19335.
- [21] Timothy Gfroerer and Morgan Bergthold. Laser diode coherence. *American Journal of Physics*, 88:740–745, 09 2020. doi:10.1119/10.0001487.
- [22] David J. Griffiths and Colin Inglefield. *Introduction to Electrodynamics*. 4 edition, 2013. doi:10.1119/1.4766311.
- [23] Eugene Hecht. *Optics*. 4 edition, 2002.
- [24] R. A. Hulse and J. H. Taylor. Discovery of a pulsar in a binary system. *The Astrophysical Journal*, 195:L51, 1 1975. URL: <http://adsabs.harvard.edu/doi/10.1086/181708>, doi:10.1086/181708.
- [25] Kenneth G. Libbrecht and Eric D. Black. A basic michelson laser interferometer for the undergraduate teaching laboratory demonstrating picometer sensitivity. *American Journal of Physics*, 83:409–417, 5 2015. doi:10.1119/1.4901972.
- [26] Michele Maggiore. *Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments*. Oxford University Press, USA, 2007.
- [27] A. A. Michelson and E. W. Morley. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, s3-34:333–345, 1887. doi:10.2475/ajs.s3-34.203.333.

- [28] T. Padmanabhan. *Gravitation: Foundations and Frontiers*. Cambridge University Press, 2010. URL: <https://books.google.com.ec/books?id=BSfe2MjbQ3gC>.
- [29] Shirish Pathare and Vikrant Kurmude. A new design , low cost michelson interferometer (\$50). *Physics Education*, 51, 09 2016. doi:10.1088/0031-9120/51/6/063001.
- [30] Frank L. Pedrotti, Leno M. Pedrotti, and Leno S. Pedrotti. *Introduction to Optics*. 3 edition, 2017. doi:10.1017/9781108552493.
- [31] James R Rotge, Douglas A Christensen, Andrew T Klemas, Gary C Loos, and David Merriman. Laser diode coherence length variation with drive current: a tool for dispersion measurements. In *Design, Modeling, and Control of Laser Beam Optics*, volume 1625, pages 350–358. SPIE, 1992.
- [32] Wolff-Michael Roth, Campbell J. McRobbie, Keith B. Lucas, and Sylvie Boutonné. Why may students fail to learn from demonstrations? a social practice perspective on learning in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(5):509–533, 1997. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291098-2736%28199705%2934%3A5%3C509%3A%3AAID-TEA6%3E3.0.CO%3B2-U>,
- [33] Louis J. Rubbo, Shane L. Larson, Michelle B. Larson, and Dale R. Ingram. Hands-on gravitational wave astronomy: Extracting astrophysical information from simulated signals. *American Journal of Physics*, 75:597–601, 10 2006. URL: <http://arxiv.org/abs/physics/0610028><http://dx.doi.org/10.1119/1.2721587>, doi:10.1119/1.2721587.
- [34] Sanjit Mitra Sanjeev Dhurandhar. *General Relativity and Gravitational Waves - Essentials of Theory and Practice*. UNITEXT for Physics. Springer Nature Switzerland AG, 1 edition, 2022.
- [35] K Sharma. *Optics Principles and Applications*. Elsevier, 2006.
- [36] Dennis Ugolini, Hanna Rafferty, Max Winter, Carsten Rockstuhl, and Antje Bergmann. Ligo analogy lab—a set of undergradua-

te lab experiments to demonstrate some principles of gravitational wave detection. *American Journal of Physics*, 87:44–56, 1 2019. doi:10.1119/1.5066567.

[37] J. Weber. Detection and generation of gravitational waves. *Physical Review*, 117:306–313, 1960. doi:10.1103/PhysRev.117.306.

[38] E. Alanís y G. Romero y C. Martínez y L. Álvarez y G. Salazar. Dispositivo interferométrico de bajo costo para medir desplazamientos microscópicos. *ANALES AFA*, 14(1), 2013. URL: <https://afan.df.uba.ar/journal/index.php/analesafa/article/view/668>.