



DIVISIÓN DE ESTUDIOS POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Opción 1.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

SISTEMA DE ILUMINACIÓN PARA EQUIPO DE ESPECTROSCOPIA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

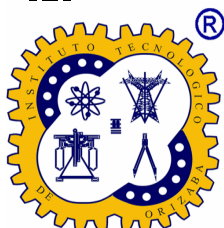
ING. FRANCISCO JAVIER CASTILLO ROMERO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSE DE JESUS AGUSTIN FLORES CUAUTLE

CODIRECTOR DE TESIS:

DRA. GEMIMA LARA HERNANDEZ





Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, **22/octubre/2025**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. FRANCISCO JAVIER CASTILLO ROMERO
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E.-

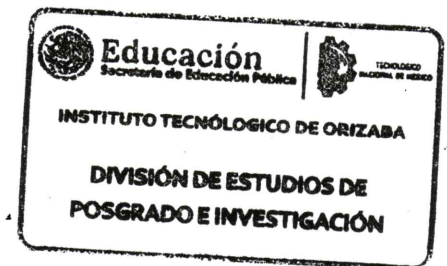
De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

“SISTEMA DE ILUMINACIÓN PARA EQUIPO DE ESPECTROSCOPIA”

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, **20/octubre/2025**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

FRANCISCO JAVIER CASTILLO ROMERO

La cual lleva el título de:

“SISTEMA DE ILUMINACIÓN PARA EQUIPO DE ESPECTROSCOPIA”

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES
CUAUTLE

SECRETARIO: DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA

VOCAL: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR

VOCAL SUP.: DRA. GEMIMA LARA HERNÁNDEZ

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-18



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





Lista de contenido

ABSTRACT	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
RESUMEN	6
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	8
1.1. INTRODUCCIÓN	8
1.2. PROBLEMÁTICA	12
1.3. JUSTIFICACIÓN	12
1.4. HIPÓTESIS	12
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.5.1. OBJETIVO GENERAL	12
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	14
2.1. METODOLOGÍA	14
2.2. ESTADO DEL ARTE	16
2.2.1 ESPECTROSCOPIA FOTOACÚSTICA	20
2.3. ESTADO DEL CAMPO	23
CAPÍTULO III. DESARROLLO	27
3.1 DISEÑO DE LAS FUENTES DE ILUMINACIÓN	29
3.1.1 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO ELÉCTRICO DE LA FUENTE DE ILUMINACIÓN	32
3.1.2. DISEÑO Y DISTRIBUCIÓN DE LAS VÍAS Y PADS DEL PCB	34
3.2. DISEÑO DEL DISPOSITIVO ESPECTROSCÓPICO	37
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	44
CONCLUSIONES	51
PRODUCTOS DE LA TESIS	52
Anexos	56
ANEXO A: ARTICULO CIENTÍFICO	56
ANEXO B: LISTA DE COMANDOS PARA EL CONTROL DEL DISPOSITIVO	57
ANEXO C: MANUAL DE USUARIO	58



Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de principio físico del efecto fotoacústico que ocurre en PAS. Elaboración propia (2025). .	8
Figura 2. A) La muestra es irradiada con la luz pulsada que atraviesa una ventana de cuarzo y la luz que es transmitida es absorbida por la muestra, esta luz lo que produce es un efecto térmico y que provoca una vibración periódica que produce ondas presión de acústica en la cavidad de resonancia, B) Línea espectral de la señal fotoacústica de la muestra respecto al cambio de longitud de onda. Elaboración propia (2025).	9
Figura 3. Montaje experimental del Sistema de Espectroscopía fotoacústica para sólidos y líquidos, usando como fuente de luz una lampara de Xenón. Elaboración propia (2025).	10
Figura 4. Montaje experimental del Sistema de Espectroscopía fotoacústica para sólidos y líquidos, usando como fuente de luz un láser. Elaboración propia (2025).	10
Figura 5. Montaje experimental del Sistema de Espectroscopía fotoacústica para gases. Elaboración propia (2025).	11
Figura 6. Metodología de investigación usada en el trabajo de tesis. Elaboración propia (2025).	15
Figura 7 Captura de pantalla de la plataforma Pico Portal en donde se muestran los criterios de inclusión de trabajos para la revisión del estado del arte. Elaboración propia (2025).	16
Figura 8 Captura de pantalla de la plataforma Pico Portal en donde se muestra a detalle el número de resúmenes evaluados por cada participante en la revisión del estado del arte de la presente tesis. Elaboración propia (2025).	17
Figura 9 Captura de pantalla de la plataforma Pico Portal en donde se muestra a detalle el número de trabajos a texto completo evaluados por cada participante en la revisión del estado del arte de la presente tesis. Elaboración propia (2025).	18
Figura 10 Etapas de la guía PRISMA empleada para llevar a cabo la búsqueda sistemática de literatura para ser incluida en la presente tesis. Elaboración propia (2025).	19
Figura 11 Captura de pantalla de la plataforma Pico Portal, A) título del trabajo seleccionado para ser analizado a texto completo, B) evaluación recibida por parte de los revisores, C) notas personales que permiten facilitar el análisis del texto en etapas posteriores. Elaboración propia (2025).	20
Figura 12. Longitud de onda en la región visible en las que absorben diferentes tipos de muestras. Elaboración propia (2025).	22
Figura 13. Montaje experimental del Sistema de Espectroscopía fotoacústica para sólidos y líquidos, usando como fuente de luz Leds que emiten a diferentes longitudes de onda en el rango visible. Elaboración propia (2025).	27
Figura 14. Diseño de fuente de iluminación en Multisim. Elaboración propia (2024).	29
Figura 15. Espectro de emisión de los leds empleados para este trabajo, Elaboración propia a partir de datos de los fabricantes [42].....	30
Figura 16. Esquema de Circuito diseñado en EasyEDA para operar los Leds. Elaboración propia (2024).	32
Figura 17. Circuito de la fuente de iluminación en protoboard. A) Elementos principales y B) Funcionamiento del circuito.	33
Figura 18. Diseño de placa circular diseñado en EasyEDA para operar los Leds. Elaboración propia (2025). .	34
Figura 19. Diseño de placa circular con segunda capa incluida. Elaboración propia (2025).	35
Figura 20. Vista en 2D de PCB diseñada. A) Vista de la primera capa y B) Vista de la segunda capa. Elaboración propia (2025).	36
Figura 21. Diseño de PCB usando EasyEDA. Elaboración propia (2025).	36
Figura 22. Diseño de la estructura de soporte. Elaboración propia (2025).	37
Figura 23. Vista del ensamble del sistema de enfoque con la estructura de soporte. Elaboración propia (2025).	38



Figura 24. Detalle del sistema de enfoque, en donde es posible apreciar el cono para posicionar una lente redonda. Elaboración propia (2025).	39
Figura 25. Vista inferior de la PCB con detalle de la ubicación de los leds. Elaboración propia (2025).	39
Figura 26. Vista superior de la PCB con la ubicación del demultiplexor. Elaboración propia (2025).	40
Figura 27. Sistema de piñón-engrane para reducción de velocidad del motor. Elaboración propia (2025).	40
Figura 28. Esquema del motor 28BYJ. Elaboración propia (2025).	41
Figura 29. Ubicación del sistema mecánico de movimiento de la PCB. Elaboración propia (2025).	41
Figura 30. Ensamble del sistema de enfoque, sistema mecánico y PCB sobre la estructura de soporte. Elaboración propia (2025).	42
Figura 31. Vista axonométrica: A) Estilo de vista Realista: líneas de cómo se embonan los tornillos con líneas puntadas de color azul. B) Estilo de vista shaded with edges.	43
Figura 32. PCB de conexión arduino con el conector flexible. Elaboración propia (2025).	44
Figura 33. Fotografía de la PCB, sistema mecánico y conexión con Arduino. Elaboración propia (2025).	44
Figura 34. Puerto serial de dispositivo de iluminación conectado. Elaboración propia (2025).	45
Figura 35. Captura de pantalla de la interfaz de control del sistema de iluminación. Elaboración propia (2025).	46
Figura 36. Imágenes del sistema de iluminación (centro) y ejemplos de las diferentes longitudes de onda emitidas. Elaboración propia (2025).	47
Figura 37. Fotografía del sistema de iluminación compacto, conectado a la computadora y detalle de dicho sistema. Elaboración propia (2025).	48
Figura 38. Sistema de iluminación con una celda con sensor piezoeléctrico. Elaboración propia (2025).	48
Figura 39. Diseño de celda la PA para muestras sólidas, líquidas y geles. Elaboración propia (2025).	49
Figura 40. Construcción de la celda PA. Elaboración propia (2025).	49
Figura 41. Diseño del ensamble de la fuente de luz con la celda fotoacústica. A) Vista general del diseño (en la parte superior se muestra la fuente de luz y en la parte inferior la celda fotoacústica) y B) Sección transversal del montaje de la fuente de luz led y la celda fotoacústica. Elaboración propia (2025).	50
Figura 42. Sistema de iluminación led ensamblado a cavidad de celda PA. Elaboración propia (2025).	50



Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Publicaciones de investigaciones científicas referentes a la espectroscopia fotoacústica. Elaboración propia (2025).</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2. Patentes de dispositivos y métodos referentes a la espectroscopia fotoacústica. Elaboración propia (2025).</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Tipos de fuentes de iluminación usadas en fotoacústica. Elaboración propia (2025).</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4 Dopantes empleados en la fabricación de leds, así como la longitud de onda de emisión</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 5. Lista de partes leds con longitudes de onda y características.</i>	<i>31</i>



RESUMEN

La espectroscopia fotoacústica es una técnica de análisis cualitativo que se basa en la absorción de diversas longitudes de onda por parte de la muestra bajo análisis. Posteriormente se detectan las variaciones de presión en el medio circundante a la muestra y que se generan mediante fenómenos no radiativos como consecuencia de la absorción de energía luminosa. Este tipo de estudios son cada vez más empleados en el análisis de diversas muestras. Una de las limitantes de esta técnica es que, los equipos empleados suelen ser voluminosos, debido principalmente a la fuente de iluminación. En el presente documento se reporta el diseño y construcción de un sistema de iluminación con miras a ser empleado en un sistema de espectroscopia fotoacústica de reducido tamaño.

El objetivo de esta tesis es mostrar el diseño y construcción de un sistema de iluminación que abarque el espectro visible, y que cumpla con las especificaciones para ser empleado en un sistema de espectroscopia fotoacústica.

En el diseño del sistema de iluminación se tomaron en cuenta aspectos de manufactura, así como posibilidad de replicar los diseños, por lo cual se empleó preferentemente la impresión 3D. Como fuente de iluminación se emplearon leds de mediana potencia, debido al ángulo de emisión de los leds empleados, así como la posibilidad de ajustar la distancia de enfoque de la luz emitida, el sistema de iluminación se dotó de una lente de enfoque. El control de la longitud de onda puede realizarse mediante el cambio del led que vaya a emitir. Por otro lado, debido a que la espectroscopia fotoacústica emplea luz modulada en frecuencia, el sistema puede emitir luz modulada en un rango de frecuencias de entre 0.2 Hz y 100 Hz.

El sistema construido puede adaptarse a celdas de medición para líquidos y gases, así mismo es posible emplear esta fuente de iluminación en los modos de transmisión y absorción.

Debido a que las mediciones fotoacústicas quedan fuera del alcance de esta tesis, los resultados se limitaron a la construcción del sistema de iluminación y las pruebas de emisión de los leds, sistema de enfoque, y automatización del sistema. Como trabajo futuro se trabajará en la incorporación de leds de mayor potencia para incrementar la relación señal a ruido.

ABSTRACT

The photoacoustic spectroscopy is a qualitative analytic technique based on the optical absorption of several wavelengths of light by the sample under analysis. Afterwards, is detected the pressure variations and the surrounding environment due to non-radiative phenomena as a consequence of luminous energy absorption. This kind of study is more frequent in diverse samples analysis. One of the limitations of this study is that the light sources employed in the experimental setup are bulky. In this document it is reported the design and construction of a light source devoted to being used in a reduced-size spectroscopy system.

The target of this thesis is to show the design and construction of the illumination system on the visible spectrum, that accomplish with the technical requirements for being employed in a photoacoustic spectroscopy system.

En the system design manufacture and repeatability aspects were taken into account; therefore, the 3D printing was preferred. Light emitting diodes (led) were employed as primary light sources, due to the emission angle and the necessity of changing the focal point, the system was provided with a focus mechanism. The wavelength control is carried out by changing the emitting diode. On the other hand, because photoacoustic spectroscopy uses a frequency-modulated light, this system can handle light modulation frequencies in the 0.2 to 100 Hz range.



The constructed system is capable of being assembled to measuring cells for liquids and gases and, at the same time, it is possible to use this light source in the transmission and absorption modes.

Because the photoacoustic measurements are out of the thesis scope, the results are limited to the system construction, led emission test, focus system trials, and the system automation. As future work it is proposed to incorporate high power emitting diodes to increase the signal to noise ratio.



CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

La espectroscopia fotoacústica está basada en la técnica espectroscópica, en esta se utiliza tanto la energía de luz como la del sonido para el estudio de la composición y propiedades de diversos tipos de materiales. Esta técnica se basa en la generación de ondas sonoras como consecuencia de la absorción de pulsos de luz a determinadas longitudes de onda [1]. Debido a que esta técnica es no destructiva y que presenta buenos resultados en el análisis de muestras altamente dispersivas, además de que en esta técnica las muestras a analizar no requieren una preparación más laboriosa, que con otras técnicas tendrían que tener. Incluso, es posible utilizar esta técnica para estudios en muestras biológicas. Esta técnica tan importante se ha convertido en una herramienta de valía en el campo de la investigación debido a su capacidad única para analizar muestras con alta sensibilidad y selectividad, sobre todo por su característica de no destructiva.

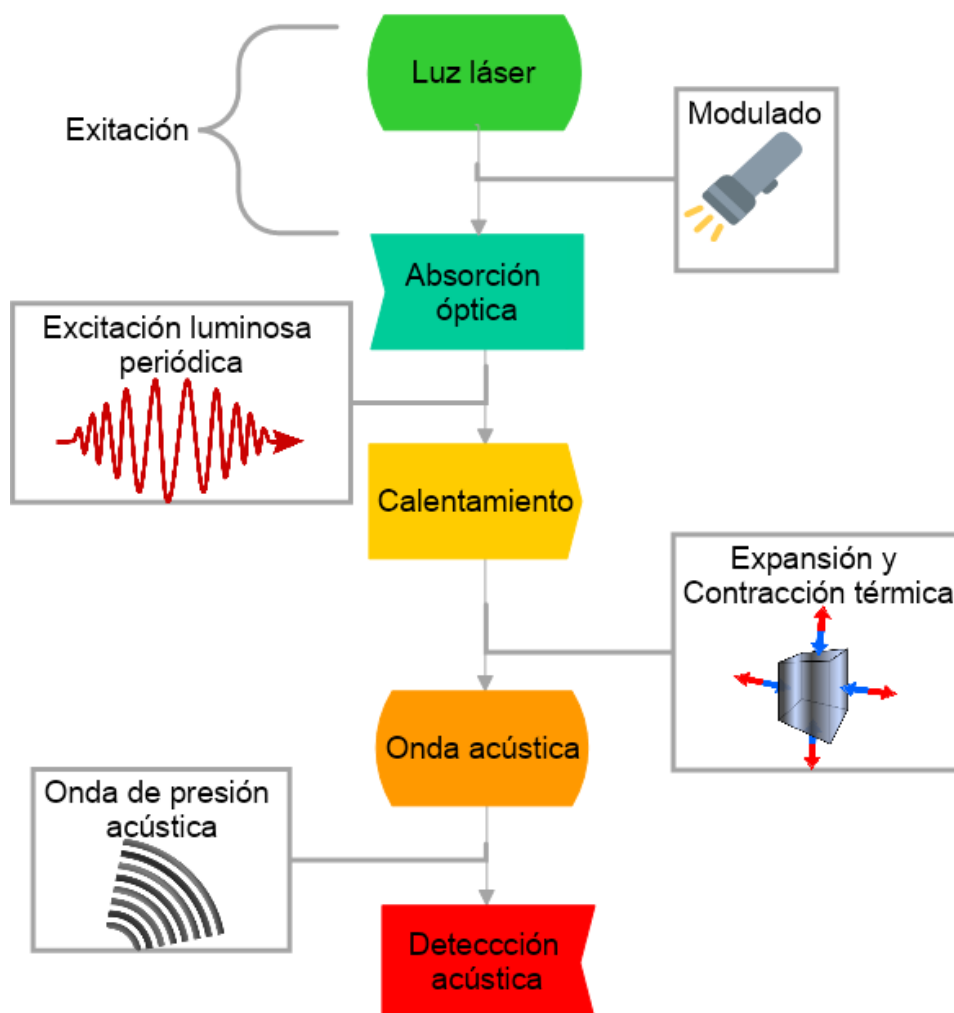


Figura 1. Esquema de principio físico del efecto fotoacústico que ocurre en PAS. Elaboración propia (2025).



La espectroscopía fotoacústica, combina principios de la espectroscopia óptica, así como las bases de la acústica para estudiar la interacción entre la luz y la materia. En su esencia, la espectroscopia fotoacústica se basa en la generación de ondas acústicas como consecuencia de la absorción de radiación electromagnética por parte de una muestra, como se describe de manera grafica en la Figura 1. Cuando la luz se hace incidir en la celda de resonancia, de volumen cerrado donde se encuentra la muestra y un gas acoplador acústico (este gas puede ser He en gas o aire), parte de la energía de la onda electromagnética se transfiere a la muestra, produciendo un calentamiento local periódico a la frecuencia de modulación que genera cambios de presión por la expansión y contracción del volumen de la muestra y, las ondas acústicas resultantes son detectadas por un detector acústico (ver Figura 2 A). Al medir estas ondas, es posible obtener información detallada sobre la composición química, estructura molecular y propiedades físicas de la muestra mediante su espectro de absorción (ver Figura 2 B).

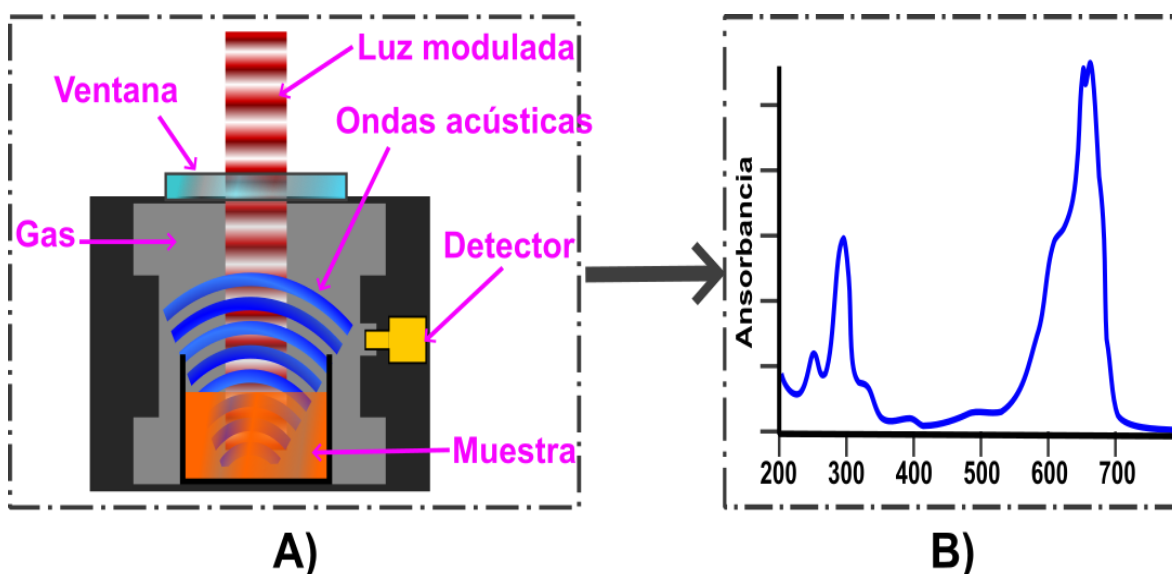


Figura 2. A) La muestra es irradiada con la luz pulsada que atraviesa una ventana de cuarzo y la luz que es transmitida es absorbida por la muestra, esta luz lo que produce es un efecto térmico y que provoca una vibración periódica que produce ondas presión de acústica en la cavidad de resonancia, B) Línea espectral de la señal fotoacústica de la muestra respecto al cambio de longitud de onda. Elaboración propia (2025).

Para llevar a cabo la obtención de los espectros de absorción (Figura 2 B) en sólidos, líquidos y geles los sistemas de mediciones de espectroscopia fotoacústica que se encuentra en la literatura constan de una parte que es la fuente de luz, seguido de la parte de la generación de las ondas acústicas y la etapa de acondicionamiento de la señal y de la adquisición de datos.

En la parte de la fuente de luz se encuentra que se hace uso de una fuente de luz blanca (Lampara de Xenón), seguido de una etapa de modulación y una etapa de acondicionamiento del haz de luz (filtros, lentes de enfoques y espejos, que se puede observar en la Figura 3).

Otra alternativa es el uso de un generador de señales (que se encarga de modular y que cuenta con diferentes tipos de ondas) y un láser (los que se encuentran en el mercado son de Nd-YAG, He-Ne, CO₂ sintonizable) con salida a un colimador de fibra óptica (ver Figura 4).

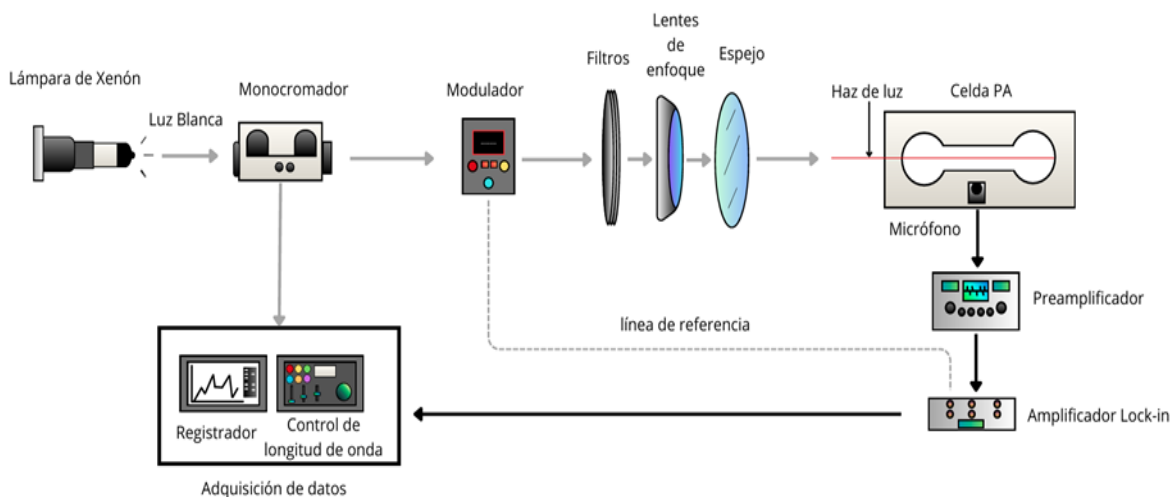


Figura 3. Montaje experimental del Sistema de Espectroscopía fotoacústica para sólidos y líquidos, usando como fuente de luz una lámpara de Xenón. Elaboración propia (2025).

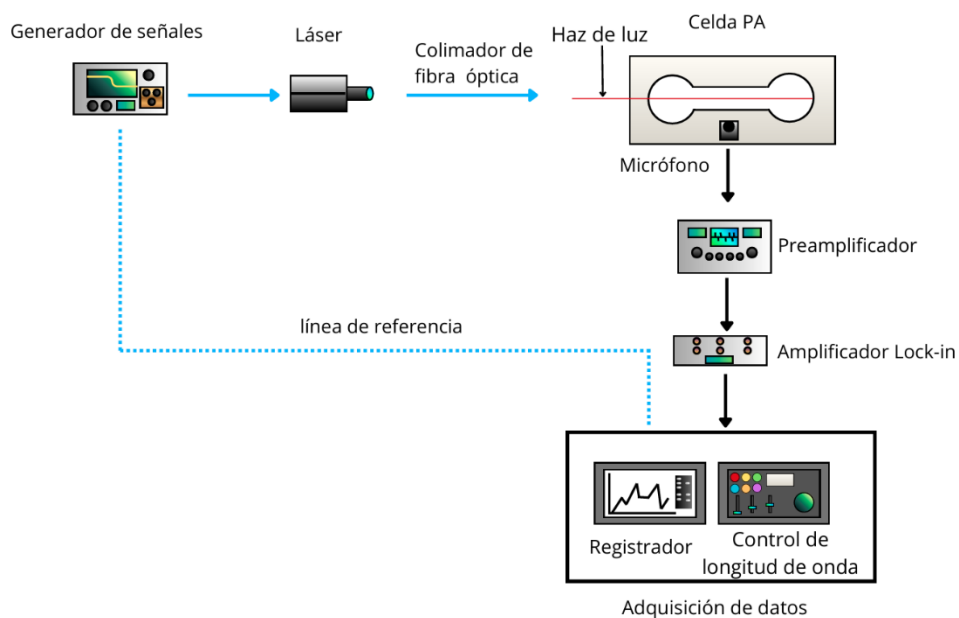


Figura 4. Montaje experimental del Sistema de Espectroscopía fotoacústica para sólidos y líquidos, usando como fuente de luz un láser. Elaboración propia (2025).

Esta luz modulada resultante incide primeramente sobre una ventana óptica para garantizar que la mayor parte de la luz sea transmitida hacia la muestra y las ondas acústicas generadas son detectadas ya sea con el uso de un micrófono, un transductor piezoeléctrico o un detector de resonancia de diapason de cristal de cuarzo (QCTF, por sus siglas en inglés).



En la etapa de acondicionamiento y de adquisición de datos, la señal PA es pasada por una etapa de pre-amplificación seguida de una etapa de amplificación, luego los datos son adquiridos, y registrados. También en esta parte se controla la longitud de onda y se procesa la señal y se procesa para obtener la Absorbancia (que indica la cantidad de luz absorbida por la muestra) como lo indica las Figuras 3 y 4.

En la espectroscopia fotoacústica para gases las celdas de medición cuentan con la modificación de contar con válvulas de entrada y salida del gas como se observa en la celda PA de la Figura 5. En estos sistemas de medición se encuentra que utilizan láser semiconductor de Retroalimentación Distribuida (DFB, por sus siglas en inglés), láser de argón.

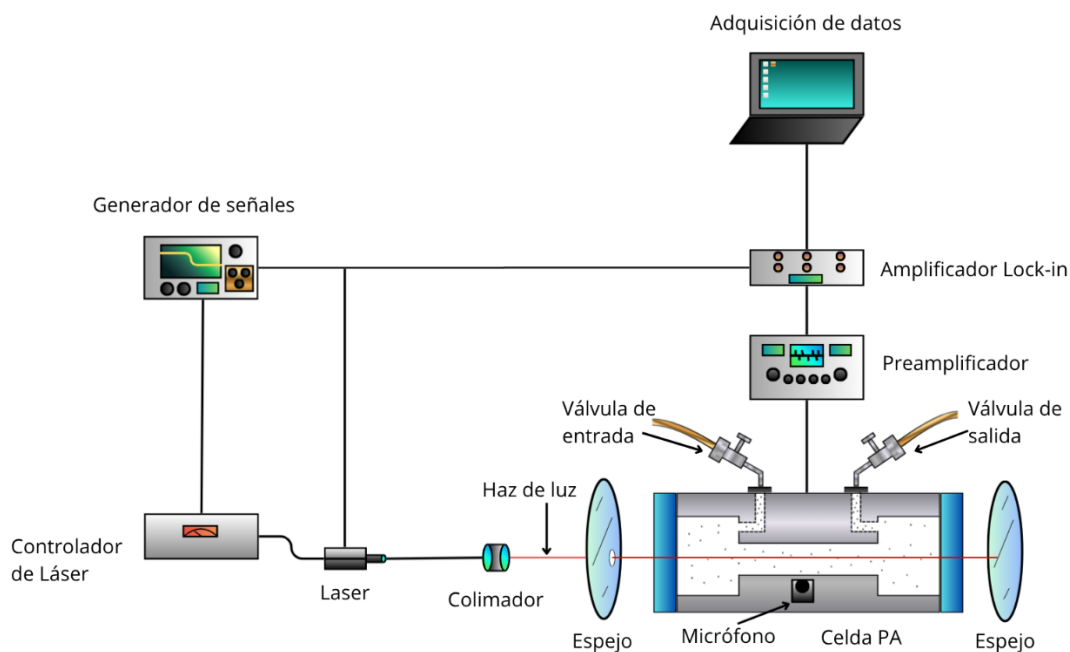


Figura 5. Montaje experimental del Sistema de Espectroscopia fotoacústica para gases. Elaboración propia (2025).

Las aplicaciones de los espectros de absorbancia por las técnicas fotoacústicas abarcan un amplio campo de la ciencia y la tecnología [2], empleándose principalmente en el estudio y análisis de materiales, en la detección de contaminantes y en el desarrollo de dispositivos biomédicos y el análisis de tejidos biológicos.

Este trabajo de tesis se enfoca al diseño y construcción de un sistema de iluminación para un equipo de espectroscopia fotoacústica que abarca la generación de señales, la etapa de modulación, la fuente de alimentación y la matriz de leds, el sistema de iluminación sea mecánica y térmicamente estable, que a la vez sea portátil, de tamaño compacto y que emitan en el rango visible.



1.2. PROBLEMÁTICA

En la actualidad no existe un dispositivo espectroscópico fotoacústico portátil de dimensiones reducidas, que pueda ser manipulado por personas que no sean técnicos, que cuenten con un diseño ergonómico, que pueda ser transportado con facilidad y de bajo costo, para el estudio y el análisis de los materiales considerados que requieran de su aplicación. De la misma forma no hay sistemas de iluminación fácilmente adaptables a los sistemas de espectroscopia fotoacústica.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Respondiendo a la problemática presentada se establece de suma importancia el diseño y fabricación de un dispositivo espectroscópico fotoacústico portátil en el ámbito científico para la toma y análisis de muestras de cualquier material para su estudio sin la necesidad de ser trasladados a centros de investigación o laboratorios, lo que permite un uso más accesible y ergonómico para su manipulación en cualquier área de estudio o zona de investigación en donde se requiera específicamente este sistema para la recolección de datos tanto en el campo como en las instituciones. Esto busca mejorar la forma de acceder a nuevos métodos de implementación en la investigación científica.

1.4. HIPÓTESIS

Referente a los fenómenos fotoacústico un sistema espectroscópico fotoacústico es factible el diseño y fabricación de un sistema que sea portátil de dimensiones reducidas que sea reproducible y de materiales ligeros para que pueda ser utilizado de manera ergonómica y sin dificultades en su manipulación para la recolección de datos en el estudio y análisis de la materia para la investigación científica tanto en el campo como en instituciones y de bajo costo.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y fabricar un sistema de iluminación portátil, de tamaño compacto, de materiales ligeros y reproducible para ser empleado en un sistema de espectroscopia fotoacústica que también sea de dimensiones reducidas que sea fácil de manipular para el estudio de la materia en investigaciones científicas de bajo costo.



1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Plantear una metodología de investigación adecuada al tema de tesis.
- Diseñar un sistema de iluminación de varias longitudes de onda que cubran la región visible.
- Diseñar la estructura y el sistema electrónico compacto en PCB que conforman los elementos del dispositivo.
- Diseñar un sistema óptico de enfoque de luz led.
- Diseñar, simular y realizar un control de frecuencia de encendido del sistema de iluminación.
- Realizar una fuente de alimentación bajo las especificaciones del sistema de iluminación.
- Programar los dispositivos electrónicos en lenguajes de programación de acceso libre.
- Realizar pruebas pertinentes para confirmar el funcionamiento del control de selección de luz led, del control de frecuencia y del enfoque de luz.



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Es este capítulo se describe la metodología propuesta para la realización del marco teórico que sustenta este trabajo de tesis. En particular se enfoca en temas de las fuentes de iluminación que se emplean en equipos de espectroscopia. Adicionalmente se analizan algunas de las aplicaciones de espectroscopia fotoacústica, y que se encuentran disponibles en la literatura.

2.1. METODOLOGÍA

Para la realización de esta tesis se plantea una metodología de investigación que consta de cuatro fases. En la primera fase se realiza la recopilación de información relacionada al fenómeno fotoacústico, principalmente relacionado a la espectroscopia fotoacústica usando diferentes bases de datos. En la segunda fase se realizan propuestas que cumplan con la problemática, basándose en los diseños existentes en la literatura encontrada en la primera fase. En la tercera etapa se plantea el diseño del sistema en la parte estructural y electrónica. Finalmente, la cuarta fase se enfoca en la simulación de todo el sistema, realizar pruebas del sistema y llevar a cabo las pruebas preliminares que aseguren el funcionamiento del sistema (Ver Figura 6).

Existen diversas metodologías para llevar a cabo investigaciones científicas, en muchas de ellas la etapa de búsqueda de información existentes de fuentes confiables es la clave. Existen hoy en día diversas herramientas digitales que hacen esa búsqueda, como lo es PICO Portal que lleva el nombre relacionado al proceso PICO que consta de cuatro elementos *Patient/Problem* (Paciente / Problema), *Intervention* (Intervención), *Comparison* (Comparación) y *Outcome* (Resultado). Para desarrollar el estado del arte en el presente trabajo se empleó la plataforma PICO, la cual permite llevar un registro digital del proceso de análisis de la literatura científica. Entre sus principales ventajas se puede mencionar el hecho de que esta plataforma permite la participación de más de una persona en el proceso de revisión de la literatura a un mismo tiempo.



Figura 6. Metodología de investigación usada en el trabajo de tesis. Elaboración propia (2025).



2.2. ESTADO DEL ARTE

Para la elaboración del estado del arte se partió de diversas búsquedas en bases de datos sobre literatura científica. Las bases de datos empleadas para llevar a cabo las búsquedas que conducen a la revisión del estado del arte son: OpenAlex, PubMed y Scopus, la elección de estas bases de datos se encuentra fundamentada en que en el momento de llevar a cabo las búsquedas se contaba con acceso a dichas bases de datos.

Con la finalidad de obtener literatura relevante al tema se realizaron búsquedas estructuradas empleando las siguientes palabras clave: *photoacoustic* y *biomedical*, estos datos se buscaron en los metadatos de los artículos científicos. Con la finalidad de que la literatura fuese actual, la búsqueda cubrió el periodo de 2013 a 2024.

Los resultados de las búsquedas en las correspondientes bases de datos se importaron a la plataforma de PicoPortal, la cual permite entre otras cosas eliminar datos duplicados. La eliminación de datos duplicados (de-duplicación) debe llevarse a cabo debido a que se emplearon más de una base de datos para llevar a cabo la búsqueda. Las búsquedas en las diferentes bases de datos dieron arrojaron 1493 artículos, los cuales se redujeron a 908 después del proceso de de-duplicación.

The screenshot shows the PICO Portal interface with the following inclusion criteria:

- P (Patient Population)**
biological material /sample /tissue
- I (Intervention)**
photoacoustic spectroscopy employed to analyze the patient /sample / tissue
- C (Comparison)**
IR, UV, UV-VIS
- O (Outcome Measures)**
Photoacoustic spectra
- S (Study Type Measures)**
Photoacoustic measurements obtaining photoacoustic spectra

Figura 7 Captura de pantalla de la plataforma Pico Portal en donde se muestran los criterios de inclusión de trabajos para la revisión del estado del arte. Elaboración propia (2025).



Así mismo, la plataforma de PicoPortal permite establecer los criterios de inclusión que servirán para determinar si un artículo es susceptible de ser incluido en la revisión bibliográfica, para el caso de los criterios de inclusión se determinó que la revisión debería incluir artículos relacionados con material biológico o tejidos, así mismo, el método empleado para llevar a cabo los estudios debería ser la espectroscopía fotoacústica, los métodos contra los cuales se compararan los datos de espectroscopía fotoacústica pueden ser espectroscopía infrarroja (IR), espectroscopía ultravioleta (UV) y espectroscopía visible-ultravioleta (UV-VIS). Dichos criterios de inclusión fueron declarados en la plataforma PicoPortal y se pueden ver en la Figura 7.

Tal como se mencionó en líneas anteriores, a partir de las búsquedas en bases de datos y posterior al proceso de revisión de duplicados se obtuvieron un total de 908 trabajos. Se llevo a cabo la lectura de resúmenes de los 908 trabajos tanto por el estudiante como por los asesores. La Figura 8 muestra la relación de resúmenes leídos y evaluados por cada uno de los participantes en dicha actividad.

A partir de la lectura de los resúmenes, se determinó cuáles de los artículos deberían de ser leídos por completo y cuales no cumplían con los criterios de inclusión establecidos. Es importante mencionar qué, para poder determinar si un artículo era incluido en la siguiente etapa de la revisión o no, se seleccionó el método de revisión por al menos dos personas con un revisor líder. Esto es, que un artículo debería de ser incluido en la siguiente etapa de la revisión en el caso de que al menos dos personas determinan lo dicho, o en caso de que el revisor líder así lo determinara.

A partir de la lectura de los resúmenes se retiraron 770 trabajos por no cumplir con los criterios de inclusión, con lo cual se determinó que el número de artículos que deberían de ser leídos en su totalidad sería de 138.

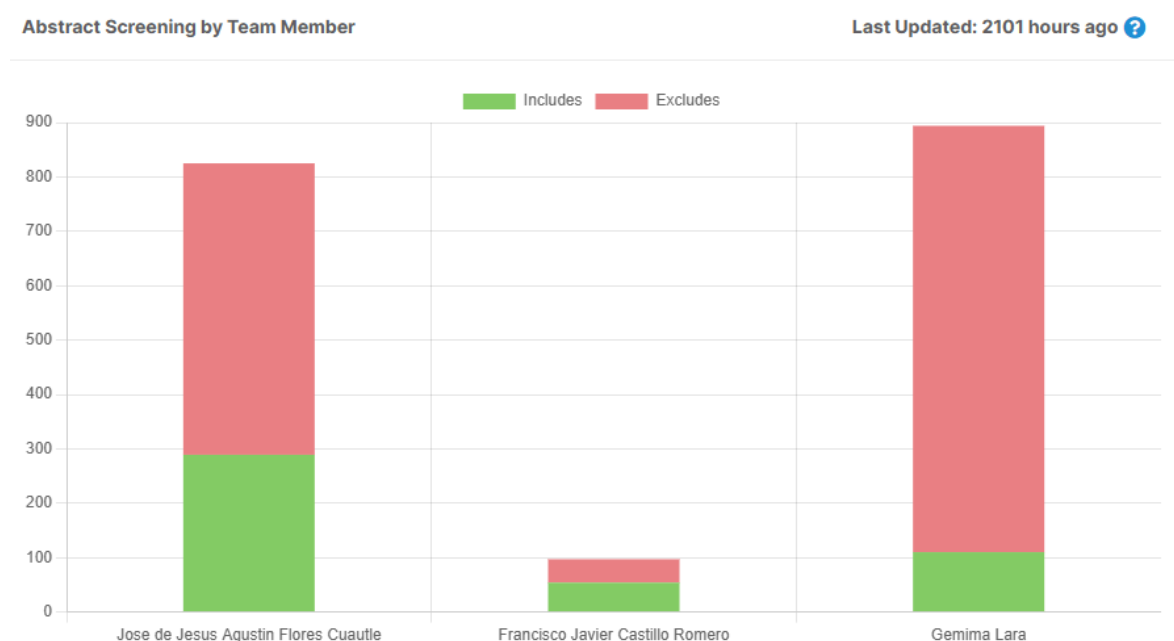


Figura 8 Captura de pantalla de la plataforma Pico Portal en donde se muestra a detalle el número de resúmenes evaluados por cada participante en la revisión del estado del arte de la presente tesis. Elaboración propia (2025).



La Figura 9 muestra una imagen del número de trabajos leídos y evaluados por cada uno de los participantes en el proceso de elaboración del estado del arte. En particular, se muestra el número de trabajos a texto completo, leídos y evaluados. Posterior a la lectura de los trabajos a texto completo, se determinó que se incluirían 24 trabajos dentro del estado del arte.



Figura 9 Captura de pantalla de la plataforma Pico Portal en donde se muestra a detalle el número de trabajos a texto completo evaluados por cada participante en la revisión del estado del arte de la presente tesis. Elaboración propia (2025).

Una visión completa del proceso de revisión del estado del arte puede verse en la Figura 10, en donde se muestran los resultados de seguir la guía PRISMA para llevar a cabo revisiones sistemáticas, esta guía permite llevar a cabo una revisión sistemática de literatura de forma exhaustiva e imparcial.

El proceso empezó con la importación de 1943 artículos de las bases de datos Scopus, OpenAlex y PubMed. Después de retirar 585 trabajos duplicados, se conservaron 908 trabajos para revisión de resúmenes, en esta etapa se decidió no incluir 770 trabajos con lo cual se incluyeron 138 trabajos en la revisión a texto completo. Posterior a la revisión a texto completo se concluyó con 24 trabajos para ser incluidos en la revisión del estado del arte y que se encuentran estrechamente relacionados con el objeto de estudio de esta tesis.

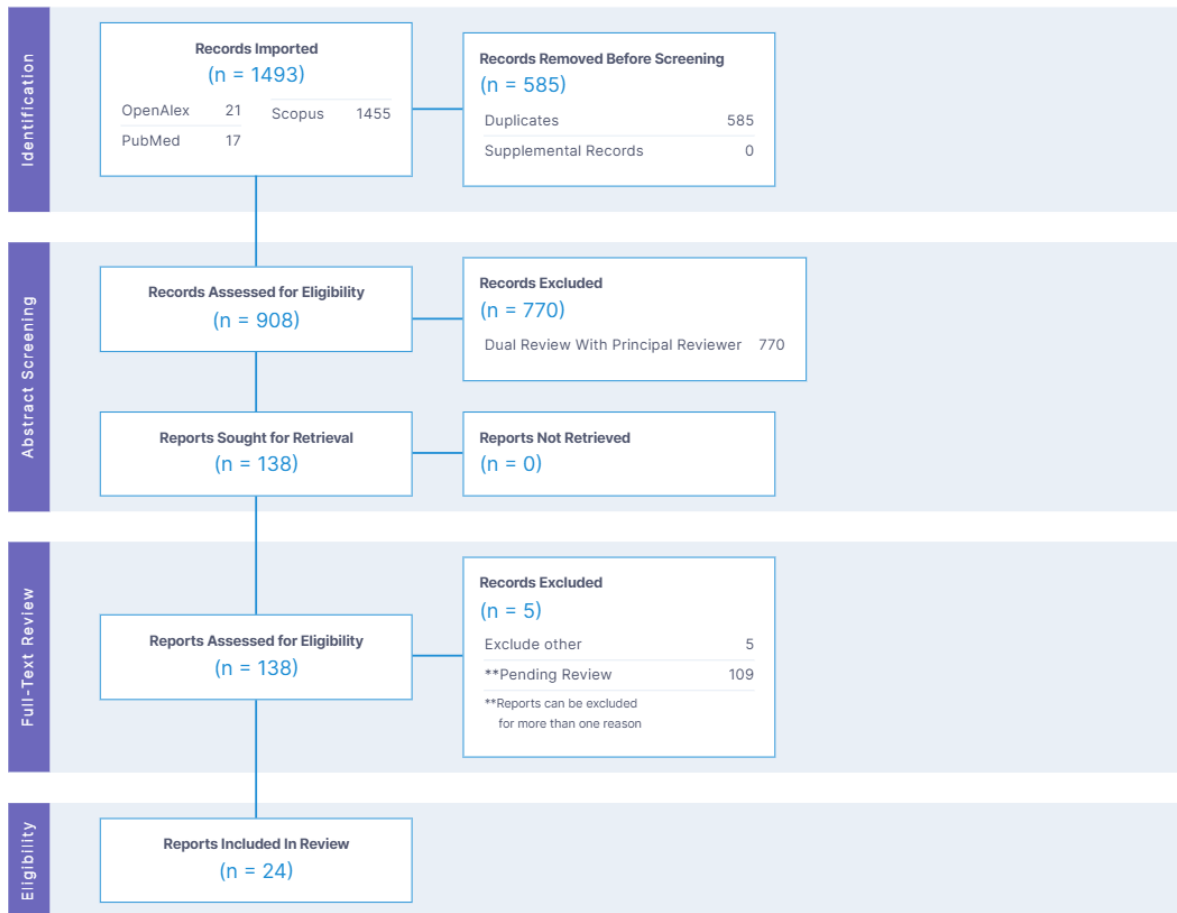


Figura 10 Etapas de la guía PRISMA empleada para llevar a cabo la búsqueda sistemática de literatura para ser incluida en la presente tesis. Elaboración propia (2025).

La Figura 11 muestra una captura de pantalla de la plataforma Pico Portal en donde se puede apreciar uno de los trabajos que se incluyó en la revisión a texto completo para llevar a cabo el estado del arte. Se encuentran resaltadas algunas de las secciones que conforman la plataforma.



The screenshot displays the PICO Portal interface. At the top, there's a search bar with the text "Search Articles: 799452 - photacoustic spectroscopy". Below this, a navigation bar includes "Highlights", "Previous", "2/25", "Next", and "Auto Advance". The main content area shows a selected article titled "Obtención y Análisis del Espectro de Absorción Óptico de Sangre de Rata Fisher con Daño Hepático Mediante Espectroscopia Fotoacústica." (Obtaining and Analysis of Optical Absorption Spectrum of Fisher Rat Blood with Hepatic Damage by Photoacoustic Spectroscopy). The article is from the "Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica" (Mexican Journal of Biomedical Engineering). The article analysis section shows a "Full-Text Review" with reviewer comments and a "Final Consensus" of "Non RCT". The article analysis section also includes a "Notes" section with a note from Jose de Jesus Agustin Flores Cuautle dated Thu, 19 Jun 2025 16:05:56 GMT.

Figura 11 Captura de pantalla de la plataforma Pico Portal, A) título del trabajo seleccionado para ser analizado a texto completo, B) evaluación recibida por parte de los revisores, C) notas personales que permiten facilitar el análisis del texto en etapas posteriores. Elaboración propia (2025).

2.2.1 ESPECTROSCOPÍA FOTOACÚSTICA

La espectroscopia fotoacústica supera varios obstáculos en la investigación científica de materiales sólidos, semisólidos y polvos, así como también de líquidos, materiales biológicos y gases, lo que permite un amplio campo de estudio ya que esta técnica no es destructiva y no requiere de preparaciones de disolventes o de algún producto en específico.

Dentro de las aplicaciones de la espectroscopia fotoacústica en el artículo “Espectroscopia de transmisión FTIR y fotoacústica para la identificación estadística de bacterias”[3]. Se establece que utilizando espectroscopía infrarroja fotoacústica por transformada de Fourier (PA-FTIR) y espectroscopia trans-FTIR, comparando los resultados de estos dos métodos, arroja la identificación de bacterias desconocidas, incluidas esporas bacterianas, esto es logrado en cuestión de unos cuantos minutos [1].

En el artículo “Registro a microescala de la materia orgánica del suelo bajo cultivo de trigo utilizando perfiles de profundidad FTIR-PAS” se aplicó espectroscopia fotoacústica infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-PAS) para estudiar la estructura del suelo [4], esto debido a que la producción de trigo a largo plazo y los cambios en el manejo de residuos alterarían la química de la materia orgánica del suelo a través del tiempo y el espacio. Se adquieren muestras de suelo para su análisis en los años 1915, 1938, 1962, y 2011 en una parcela de trigo donde se aplica fertilizante inorgánico establecida en el año 1888 en Sanborn Field, en Columbia, Missouri, EE. UU. Una vez recolectadas todas las muestras se analizaron y los resultados muestran que los perfiles de la materia orgánica del suelo son heterogéneos dando por conclusión que la transformación de la materia orgánica del suelo “se aceleró durante los primeros 50 años de cultivo y fertilización del trigo, especialmente en la capa superficial. Sin embargo, entre 1962 y 2011 se retrasaron notablemente otros cambios en la



estructura de la materia orgánica del suelo debido a un cambio en la práctica de cultivo que retuvo los residuos de cultivo en la parcela”. [2]

En el artículo “Impacto de las costras biológicas en la formación del suelo en los ecosistemas polares” se analizó en el impacto de las costras biológicas del suelo, el estudio fue realizado en dos sitios árticos, la isla de Svalbard en Noruega y Tarfala en Suecia y en el sitio Antártico de la isla Apostrophe en Tierra de Victoria [5], se determinó por medio de espectroscopía fotoacústica infrarroja (FTIR-PAS) que las costras biológicas del suelo “pudieron desarrollarse en superficies estables libres de hielo, modificaron el suelo mediante el suministro de nuevas sustancias orgánicas. Estas nuevas sustancias, además de diluir el antiguo carbono heredado del sustrato y oscurecer el horizonte mineral superior, promovieron la acidificación, que es responsable de la meteorización mineral y la neogénesis de los minerales arcillosos. “Con su desarrollo, las costras biológicas del suelo actúan como ingenieros de ecosistemas y promueven la formación de suelos en los ecosistemas polares al aumentar la estabilidad del suelo, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes, lo que mejora indirectamente la agregación, la capacidad de retención de agua y el calentamiento del suelo” [3].

Tabla 1. Publicaciones de investigaciones científicas referentes a la espectroscopia fotoacústica. Elaboración propia (2025).

Título de publicación	Material de estudio	Técnica o método de medición	Año publicado
Análisis de aire exhalado mediante espectroscopia fotoacústica láser infrarrojo de rango de sintonización de números de onda de banda ancha [6].	Pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica.	Espectroscopia fotoacústica láser infrarroja.	2017
Potencial predictivo de la espectroscopia fotoacústica en la detección de tumores de mama a partir de perfiles séricos de xenoinjertos [7].	xenoinjertos de células MCF-7 utilizando ratones hembra desnudos y suero sanguíneo.	Espectroscopia fotoacústica.	2015
Estudio comparativo del hidrocarburo cuticular en reinas, obreras y machos de Ectatomma vizottoi (Hymenoptera, Formicidae) mediante espectroscopia fotoacústica por transformada de infrarrojos de Fourier [8].	Hormigas Ectatomma vizottoi.	Espectroscopia fotoacústica de infrarrojos transformada de Fourier.	2007
Pico de absorción característico de la sangre humana medido con espectroscopia fotoacústica diferencial [9].	Sangre	Espectroscopia fotoacústica diferencial.	2002



En la Tabla 1 se muestran algunos artículos publicados de espectroscopia fotoacústica donde se establecen las principales aplicaciones de esta técnica de medición en medicina, con el objetivo de colocar algunos de los trabajos existentes en algún área de todas las que abarca la espectroscopia fotoacústica. Algunas de las aplicaciones en materiales, en impacto ambiental y en la agricultura pueden ser leídos en el Anexo B que se encuentra en esta tesis o directo de la Revista Ciencia Vital [10] y que hacen parte de los productos de esta tesis.

La región del ultravioleta oscila entre 200 y 400 nm (que la componen tanto como la región ultravioleta lejano que va de 190-280 nm, ultravioleta medio que va de 280-315 nm y la ultravioleta cercano que va de 315 a 380 nm) que se suelen usar para detección por fluorescencia, estas longitudes de onda son consideradas de altas energías y son capaces de romper enlaces químicos. La región visible incluye el violeta (de 400 a 440 nm), el azul (de 440-490 nm), el verde (de 490-550 nm), el amarillo (de 550-580 nm), el naranja (de 580-610 nm) y el rojo (de 610 a 780 nm) [11]. La región infrarroja incluye el infrarrojo cercano (de 780nm a 3000 nm), infrarrojo medio (de 3000 nm a 50000 nm) e infrarrojo lejano (de 50000 nm a 1000000 nm), usada en estudios de imágenes térmicas por ser de menor energía fotónica [12].

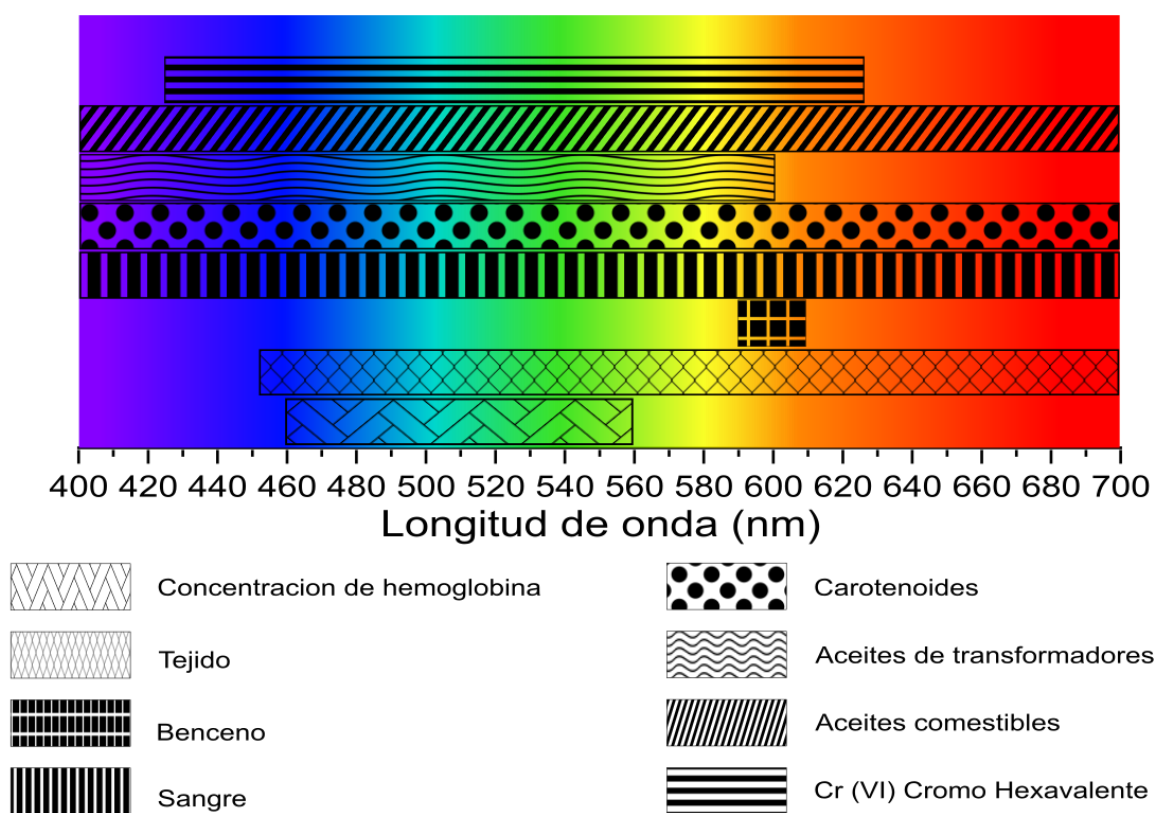


Figura 12. Longitud de onda en la región visible en las que absorben diferentes tipos de muestras. Elaboración propia (2025).

Este trabajo de investigación se centra en la región visible, llevando a cabo una revisión exhaustiva de la literatura, se encontró que los estudios de Espectroscopia en la región visible son de gran



ayuda (ver Figura 12). Entre la literatura disponible se encuentran estudios enfocados a la industria Automotriz donde se encuentran los aceites derivados del petróleo usados en transformadores donde estudian acidez, compuestos furánicos (derivados de la degradación) y color [13], también los aceites usados en los motores. Respecto a la industria Alimenticia, se encuentran estudios de aceites vegetales con el objetivo de conocer si los aceites han sido adulterados con otros tipos de aceites vegetales, tal es el caso de los aceites de olivo extra-virgen que pueden llegar a ser adulterados con orujo de olivo, soja, lino, maíz, por mencionar algunos. A los aceites vegetales también se les estudian productos de oxidación, ácidos grasos, vitaminas y productos de degradación [14]. Algunos de los aceites vegetales también son estudiados con un enfoque a la industria de la Cosmética, ya que algunos aceites vegetales, tales como aceites de Almendra, Coco, Jojoba, Nueces dulces, Ricino, Aguacate, por mencionar algunos son usados en productos como shampoo, cremas corporales, maquillaje y tratamientos capilares. Otros estudios también son acerca de pigmentos carotenoides que se encargan de la coloración tanto en alimentos como en animales [15, 16].

También se ha encontrado estudios de Espectroscopia en la región visible del cromo metálico, en particular el cromo hexavalente (Cr (VI)) que su toxicidad puede llegar a ser cancerígeno. Sin embargo, en industrias tales como la galvanoplastia, pintura, metalurgia y curtido de cueros es importante conocer la presencia de cromo hexavalente, algunas otras muestras tales como suelos y agua potable y residual se benefician del estudio de la presencia de cromo hexavalente [17].

Otros tipos de aplicaciones en las cuales se emplean estudios de espectroscopia son: muestras biológicas como sangre, semen, orina, cabello y tejidos que otorgan información química y física necesaria en campos de la medicina [3]. En tejidos biológicos se han encontrado diferencias en los espectros de absorción de luz entre las muestras normales y cancerosas, así como en la concentración de hemoglobina en sangre bovina [18].

2.3. ESTADO DEL CAMPO

En el estado del campo se consideran prototipos, métodos o técnicas que ya están patentadas y que su uso es actualmente aceptable para los fines en los que se desea utilizar, obteniendo de ello información sobre otras fuentes y conociendo a fondo lo existente en espectroscopia fotoacústica, tal como se resume en la Tabla 2.

En la patente “Método y aparato para la detección de un gas mediante espectroscopia fotoacústica” [9], reporta la invención de un proceso para detectar una muestra gaseosa la cual hace parte de una mezcla con un segundo gas. Este método se basa en el empleo del espectro de absorción del gas de interés, para llevar a cabo esta detección se emplea un tercer gas el cual tiene un enfriamiento cinético como característica principal. El mecanismo para la detección del gas de interés se basa en la interferencia entre los espectros de absorción fotoacústicas de las muestras de gas involucradas en el estudio.

Por otro lado, la patente “aparato de detección fotoacústica” [19], describe un método que permite detectar un analito determinado en una muestra de algún fluido corporal. Para llevar a cabo la detección, esta patente se basa en un aparato desarrollado por los inventores, dicho aparato incluye



el uso de un láser de tipo pulsado. El haz de la luz laser se hace incidir sobre la muestra bajo análisis, la cual se encuentra dentro de una cámara de pruebas.

En la patente titulada “Dispositivo de medida en línea de pulsaciones de un láser y procedimiento de medida por espectroscopia fotoacústica” [20], se reporta la invención de un dispositivo que permite estudiar el espectro fotoacústico mediante el empleo de un sensor piezoeléctrico con una frecuencia de resonancia menor al 1/50 del periodo de la señal empleada para modular el laser empleado para llevar a cabo la detección.

Un aparato y método para controlar una fuente de luz empleada en estudios de espectroscopia es descrito en la patente “Sistema y método para controlar una fuente luminosa para espectroscopia de ring-down de cavidad” [21]. El aparato descrito en esta patente genera una señal de control para activar y desactivar la fuente luminosa como resultado de comparar la energía proveniente de una cavidad resonante contra un umbral preestablecido.

Tabla 2. Patentes de dispositivos y métodos referentes a la espectroscopia fotoacústica. Elaboración propia (2025).

Título de patente	Número de publicación	Descripción	Año
Método y aparato para la detección de un gas mediante espectroscopia fotoacústica [9].	ES2017144	“El invento se refiere a un método para la detección de un gas utilizado espectroscopia fotoacústica”	1991
Dispositivo y método de detección fotoacústica [19].	ES2708573T3	“El campo de la invención son las pruebas médicas. Un aspecto de la invención se refiere a dispositivos y a un método de detección de analitos en una muestra de fluido corporal, siendo un ejemplo las células tumorales en circulación en una muestra sanguínea.”	2019
Dispositivo de medida en línea de pulsaciones de un láser y procedimiento de medida por espectroscopia fotoacústica [20].	ES2223928T3	Dispositivo de medida en línea de pulsaciones de un láser y procedimiento de medida por espectroscopia fotoacústica.	2005
Sistema y método para controlar una fuente luminosa para espectroscopia de ring-down de cavidad [21].	ES2259756T3	Esta invención se refiere en general a la espectroscopia de absorción, y está en particular dirigida a la activación y desactivación de una fuente luminosa destinada a ser usada con un resonador óptico para espectroscopia ring-down.	2006



También se consideran diferentes tipos de fuentes de iluminación reportadas en los artículos científicos en el tema de espectroscopia fotoacústica, tal como se resume en la Tabla 3.

Tabla 3. Tipos de fuentes de iluminación usadas en fotoacústica. Elaboración propia (2025).

Tipo de fuente luminosa	Longitud de onda /características principales	Aplicaciones	Referencia
Láser de estado sólido	varias longitudes de onda	detección de gases	[22]
		detección de tumores, espectroscopia con aprendizaje automático	[23]
		análisis de espectros de aire exhalado en pacientes con enfermedades pulmonares	[7]
Láser de alta potencia	laser de cascada cuántica, CO ₂	análisis de trazas de gas	[24]
Leds	275 nm, visible/UV	detección de gases	[25, 26]
	850 nm, 690 nm, 470 nm	Tomografía fotoacústica	[27]
Incandescente	2500 nm, 6667 nm, Xe	detección de gases, muestras diversas	[28, 29]
		detección de gases con doble cavidad	[30]
Láser super continuo	espectro amplio	estudio de aerosoles, espectroscopia de múltiple longitud de onda	[31]

De la revisión de literatura se encontró que actualmente se usa en su mayoría la luz láser, entre los cuales se encontró los láseres de estado sólido de diferentes tipos como lo son: Nd-YAG que suelen ser de gran tamaño con una salida variable de: 1064 nm, 532 nm, 355 nm, 266 nm. Existen modelos de láser pulsada de nanosegundos ajustable para espectroscopía en el espectro visible e infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) que van de 405 nm a 2850 μm .

Otros que son importante mencionar son láseres con tecnología basadas en un oscilador paramétrico óptico (OPO, por sus siglas en inglés) de cavidad anular, para transformar el láser Nd-YAG de longitud de onda fija a un sistema láser sintonizable (se ajusta la longitud de onda) que cubre un amplio intervalo de longitudes de onda en el rango VIS y el NIR. El rango de sintonización es de 350 nm – 740 nm [32], 460 – 1800 nm, 690 nm – 950 nm, de 1200 – 2600 nm [18, 33] eso depende de los modelos y entre sus aplicaciones se encuentra la toma de imagen fotoacústica. En el mercado existen láseres sintonizables de nanosegundos de alta resolución de 200 nm – 4500m para realizar estudios de espectroscopia fotoacústica de alta resolución. Incluso se encontraron trabajos de espectroscopía de ruptura inducida por láser (LIBS, por sus siglas en inglés), esta técnica utiliza un láser pulsado Nd-YAG de nanosegundos [34], cabe señalar que este tipo de espectroscopia al emitir la luz láser sobre la muestra una pequeña parte de la muestra se evapora. Al ser luz láser de alta



energía ese vapor produce plasma, por lo que es conveniente para el estudio de ciertos tipos de muestras. Uno más es el tipo de láser Nd:YLF que trabaja en el rango infrarrojo cercano.

En los láseres de alta potencia se encontraron los láseres de CO₂ que son sintonizable que cubren la región de longitud de onda infrarroja de 9 – 11 μm , incluso existen modelos que se extienden a 12 μm [35, 36]. Los láseres de CO también son sintonizables que emiten radiación en la región infrarroja de longitud de onda de 5.0 – 7.6 μm y de 2.5 – 3.8 μm [35]. Los láseres de cascada cuántica sintonizable (QCL, por sus siglas en inglés) [37, 38] son empleados para medir los espectros infrarrojos de fase gaseosa de las sustancias analizadas [39].

En los láser super continuo están los láseres de onda continua (CW, por sus siglas en inglés) existen en longitudes de ondas verde [40, 41], rojo, infrarrojo, UV. El láser pulsado de onda continua de longitudes de onda de 852 nm a 2000 nm . Incluso existen combinaciones láseres CW y láseres pulsados [35].

Otro tipo de láser usado en la espectroscopia fotoacústica es el láser He-Ne, que son un láser de gas, de baja potencia y que emiten luz monocromática.



CAPÍTULO III. DESARROLLO

Como se habló en la parte de la introducción de este trabajo de tesis. Una parte esencial en la espectroscopia fotoacústica es la fuente de luz, la cual debe emitir a determinadas longitudes de onda, en la revisión de literatura se encontró que en recientes años los autores de algunos trabajos científicos han trabajado con fuentes de luz de matrices de led de una sola longitud o dos longitudes de onda y, por ello esta tesis se enfoca al desarrollo de una fuente de luz usando leds que emiten luz a diferentes longitudes de onda con el objetivo de que esta fuente de luz sea en las diferentes longitudes de onda en el rango visible.

Este trabajo de tesis busca implementar el uso de Leds que emiten luz a diferentes longitudes de onda que cubran el rango visible. Por lo que se enfocará al diseño y construcción de un sistema de iluminación para un equipo de espectroscopia fotoacústica, señalado con un recuadro de margen punteado de color lila del lado izquierdo en la Figura 13, que abarca la generación de señales, la etapa de modulación, la fuente de alimentación y la colocación de leds, donde el sistema de iluminación sea mecánica y térmicamente estable.

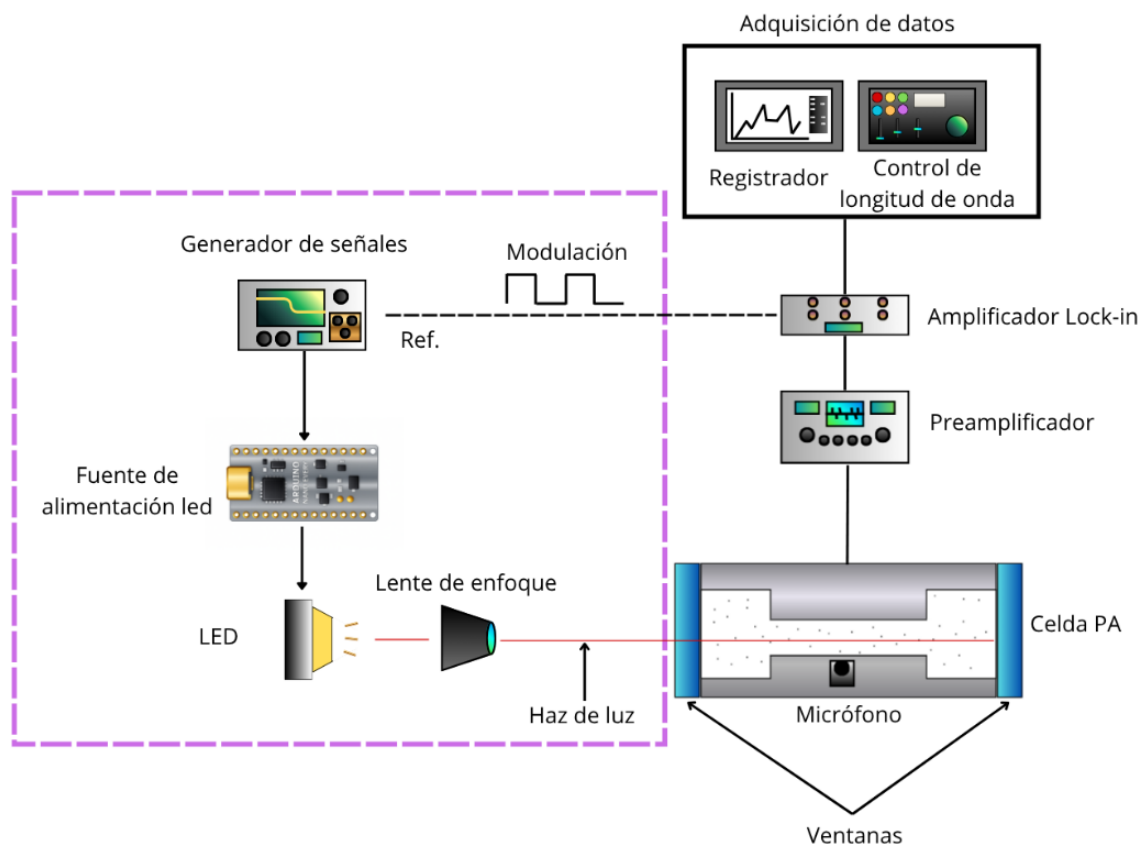


Figura 13. Montaje experimental del Sistema de Espectroscopia fotoacústica para sólidos y líquidos, usando como fuente de luz Leds que emiten a diferentes longitudes de onda en el rango visible. Elaboración propia (2025).

Para la selección de las fuentes de luz se tomaron en consideración principalmente el tamaño y la longitud de onda, respecto al tamaño se prefirieron los leds de montaje superficial con tamaño 0603,



este es un tamaño estándar en forma rectangular de 6mm de largo por 3mm de ancho. Este tamaño permite la reducción del tamaño final de nuestro prototipo. Por otro lado, se buscaron leds en todas las longitudes de onda que cubren el rango visible, de bajo consumo teniendo la consideración de alimentarse con corrientes entre 5 y 20 mA y ángulos de emisión menores a 120° .

Debido a que se emplea una sola fuente de corriente, es preferible que los leds operen con corrientes cercanas entre sí. Así mismo, un ángulo de emisión menor a 120° permite considerar a los leds como fuentes de emisión con emisión perpendicular al objeto de estudio y al mismo tiempo permite emplear lentes para enfocar el haz luminoso sobre la muestra a analizar.

En la parte de simulación de un circuito eléctrico se usa Multisim, un software que permite crear circuitos eléctricos y llevar a cabo una simulación, incluso cuenta con herramientas de transferencia del circuito diseñado al diseño de PCB y vista previa del diseño en 3D, lo cual para fines de este trabajo de tesis es conveniente. Al comienzo del diseño de circuitos eléctricos es necesario conocer si existe algún inconveniente a la hora de manejar corrientes o tensiones en los componentes electrónicos.

Existen diversas herramientas a la hora de diseñar diagramas de circuitos eléctricos. En este trabajo de tesis se ha decidido trabajar con EasyEDA ya que es un software donde se pueden realizar proyectos de manera rápida donde los datos son guardados en la nube. EasyEDA cuenta con un editor de forma esquemático donde se puede realizar el diseño de circuitos eléctricos sin importar que tan grande sea, también cuenta con una parte de diseño de PCB que optimizan los enrutamientos del circuito diseñado y que permite visualizar las uniones de vías, además de que el usuario puede en un momento dado realizar cambios en la colocación de los componentes o los enrutamientos, si así lo cree conveniente para llevar con éxito el diseño de la PCB. Otra de las herramientas con las que cuenta EasyEDA es la visualización en 2D y 3D, con las que el usuario logra tener una visión general de cómo será la PCB físicamente.

Otra herramienta de software a utilizar en este trabajo es SolidWorks que es de tipo Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés) que permite realizar diseños de piezas con medidas reales, llevar a cabo el ensamble de diferentes piezas, colocar tipos de materiales en cada pieza y con el fin de que el usuario logre visualizar como es el diseño de cada pieza o de un sistema completo cuenta con diferentes tipos de vistas en 2D altamente utilizadas en dibujo técnico y vistas 3D que pueden ser rotadas en cualquier eje para lograr una mejor visualización antes de que un sistema completo sea fabricado, ahorrando así tiempo y dinero a los usuarios.

Para la fabricación de piezas después de realizar el diseño en CAD, existen diferentes formas y todo depende del material en que se necesite y las condiciones a las que se encontrará cada pieza diseñada. Hoy día, un método aparte del maquinado de piezas es la Impresión 3D. En la impresión 3D se suelen ocupar diversos procesos, unos que usan de extrusión plásticos en forma de filamentos (FDM), plásticos en forma de resina (SLA), otros usan plásticos en forma de polvo (SLS). Este trabajo de tesis se enfocará al uso de Impresión 3D con el proceso FDM usando materiales ácidos poliláctico (PLA), este material PLA es un material biodegradable, resistente y de bajo costo.



3.1 DISEÑO DE LAS FUENTES DE ILUMINACIÓN

Como primer paso se optó por llevar a cabo la simulación de un circuito eléctrico previo a la fabricación del PCB. Para la elaboración de las fuentes de iluminación, se diseñó un circuito electrónico, el cual se simuló mediante el uso del software Multisim, esto con la finalidad de comprobar su correcto funcionamiento. Para el diseño del circuito electrónico, se tomaron en cuenta los siguientes componentes: un circuito multiplexor, diez leds con diferente longitud de onda cada uno. Resistencias de polarización para cada led y en principio un *dip switch* para poder simular entradas digitales. El circuito diseñado que se presenta en la Figura 14, muestra la polarización correspondiente a 3 leds, debido a que las siete restantes son similares [1] .

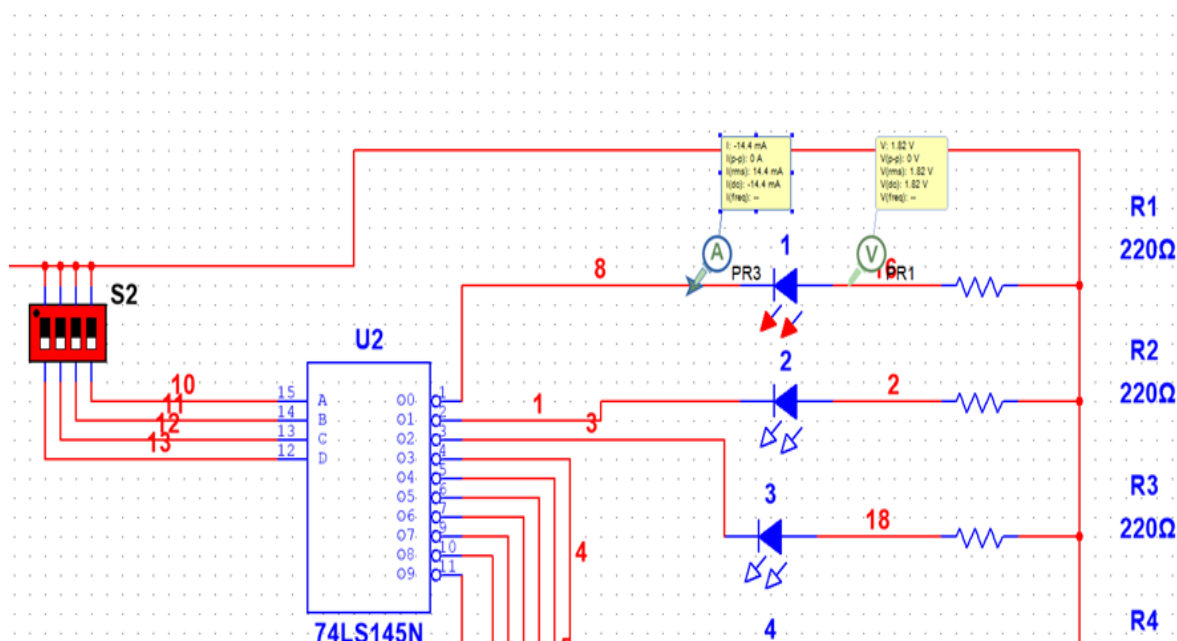


Figura 14. Diseño de fuente de iluminación en Multisim. Elaboración propia (2024).

A manera de simulación se presentan los resultados de los voltajes y la corriente en la que opera el circuito para el encendido de los leds al igual que el *dip switch* que es el que controla el paso de voltaje para la selección de los 10 leds.

Un factor adicional a tomar en consideración es la longitud de onda de cada uno de los leds que integran el sistema, esto es debido a que los leds no emiten una única longitud de onda, sino que emiten un conjunto de longitudes de onda denominado espectro de emisión.

En la Figura 15 se puede observar las curvas de cada led en concreto, mediante una grafica en un plano cartesiano donde en el eje de las abscisas se encuentra la longitud de onda a la que emiten y en el eje de las ordenadas se encuentra el porcentaje de emisión [34, 42]. Estas curvas espectrales cuentan con un ancho de banda espectral FWHM (*Full Width at Half Maximum*, por sus siglas en inglés) es de aproximadamente 10 – 30 nm para los colores usados. Cabe mencionar que la amplitud a la que nos referimos en el término FWHM no se refiere al porcentaje de emisión graficada



en el eje de las ordenadas; sino más bien, al ancho completo a la mitad máximo, o bien, que tienen una salida espectral estrecha centrada en una longitud de onda específica. Por ejemplo, si nos enfocamos a la curva espectral del led violeta esta va de $\sim 396 \text{ nm}$ a $\sim 413 \text{ nm}$, que es donde la emisión se encuentra al 50% y que se puede ver en la Figura 15, entonces el máximo está en $\sim 405 \text{ nm}$.

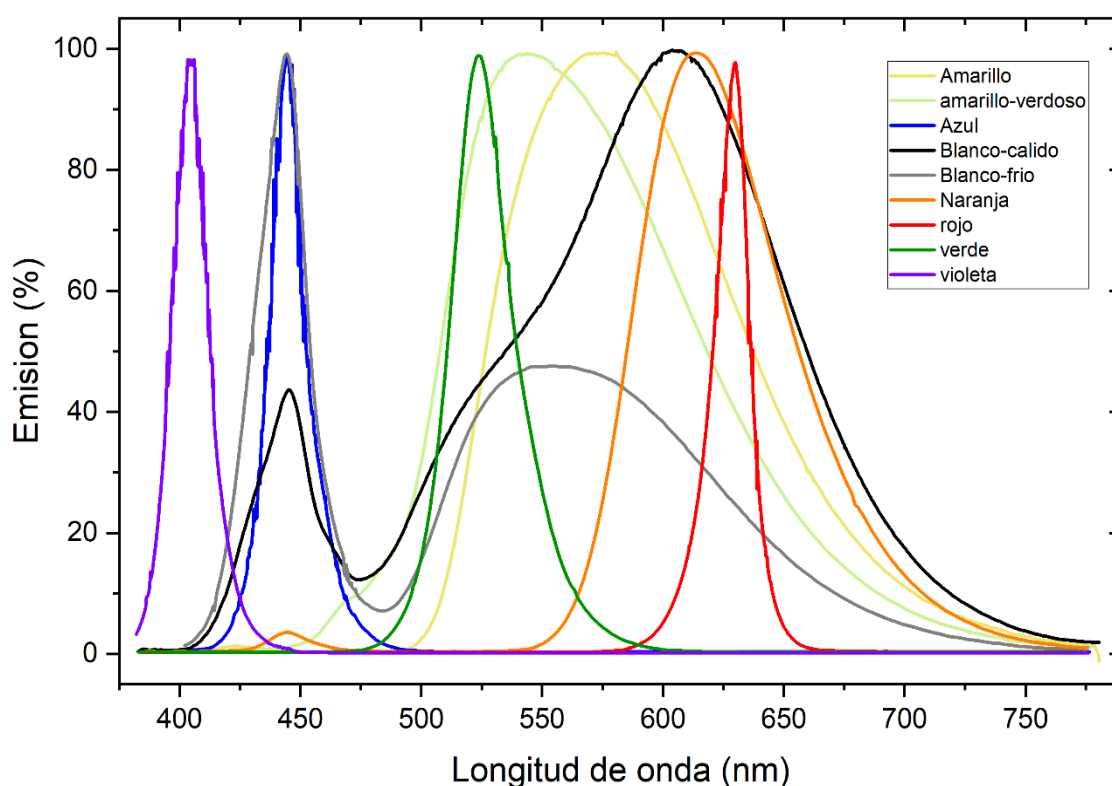


Figura 15. Espectro de emisión de los leds empleados para este trabajo, Elaboración propia a partir de datos de los fabricantes [42]

Para poder cambiar la longitud de onda principal a la cual emiten los leds, es necesario dopar a las obleas de silicio con diferentes materiales, el compuesto empleado como dopante, así como el porcentaje de dopado determinaran el espectro de emisión del led restante. En general los dopantes más empleados para la fabricación de leds son: fosfuro - arseniuro de galio (GaAsP), fosfuro de galio (GaP), Arseniuro de galio - aluminio (AlGaAs), Arseniuro de galio (GaAs), nitruro de galio (III) (GaN), Nitruro de indio y galio (InGaN).

La Tabla 4 muestra algunos de los dopantes comúnmente empleados en la fabricación de leds, así como la longitud de onda emitida por los leds resultantes.

Los leds propuestos son de modelo SMD 0603 (ver Tabla 5), el voltaje de los leds va de los 2 V a 3.6 V , mientras que la corriente es de cada uno de ellos es de 20 mA y de medida $1.6 \times 0.8 \text{ mm}$ con



empaques tipo *Cut page*. Se incluyen dos leds de luz blanca con el propósito de contar con todas las longitudes de onda del espectro visible y el sistema funcione de manera correcta.

Tabla 4 Dopantes empleados en la fabricación de leds, así como la longitud de onda de emisión

Dopante	Longitud de onda (nm)	Color
GaAsP/GaAs	655	Rojo
GaP	570	Amarillo-verde
GaAsP/GaP	585	Amarillo
GaAsP/GaP	635	Naranja
GaP	700	Rojo
GaAlAs/GaAs	660	Rojo
GaAsP/GaP	610	Rojo
GaAlAs	880	
GaN/SiC	430	Azul

Tabla 5. Lista de partes leds con longitudes de onda y características.

Color de leds SMD 0603	Longitud de onda ~FWHM (nm)	Voltaje (V)
Blanco	<i>Amplio espectro</i>	3.0 – 3.6
Rojo	620 – 630	2.0 – 2.2
Azul	460 – 470	3.0 – 3.2
Verde	520 – 540	3.0 – 3.2
Amarillo	580 – 590	2.0 – 2.2
Blanco cálido	<i>Amplio espectro</i>	3.0 – 3.2
Naranja	600 – 610	2.0 – 2.2
Violeta	400 – 430	3.0 – 3.3
Amarillo-Verdoso	565 – 575	2.0 – 2.2
Rosado	<i>Múltiples tipos</i>	3.0 – 3.3



3.1.1 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO ELÉCTRICO DE LA FUENTE DE ILUMINACIÓN

Con el objetivo de optimizar la distribución espacial de los componentes electrónicos es necesario realizar la simulación del circuito con todos los componentes necesarios (ver Figura 16), este circuito eléctrico consta de diez leds, requiere la integración de transistores en la placa de circuito impreso (PCB) para garantizar la protección de un demultiplexor que utiliza una entrada y la dirige a distintas salidas (Demux) frente a cargas de corriente elevadas, limitando su función exclusivamente al control lógico.

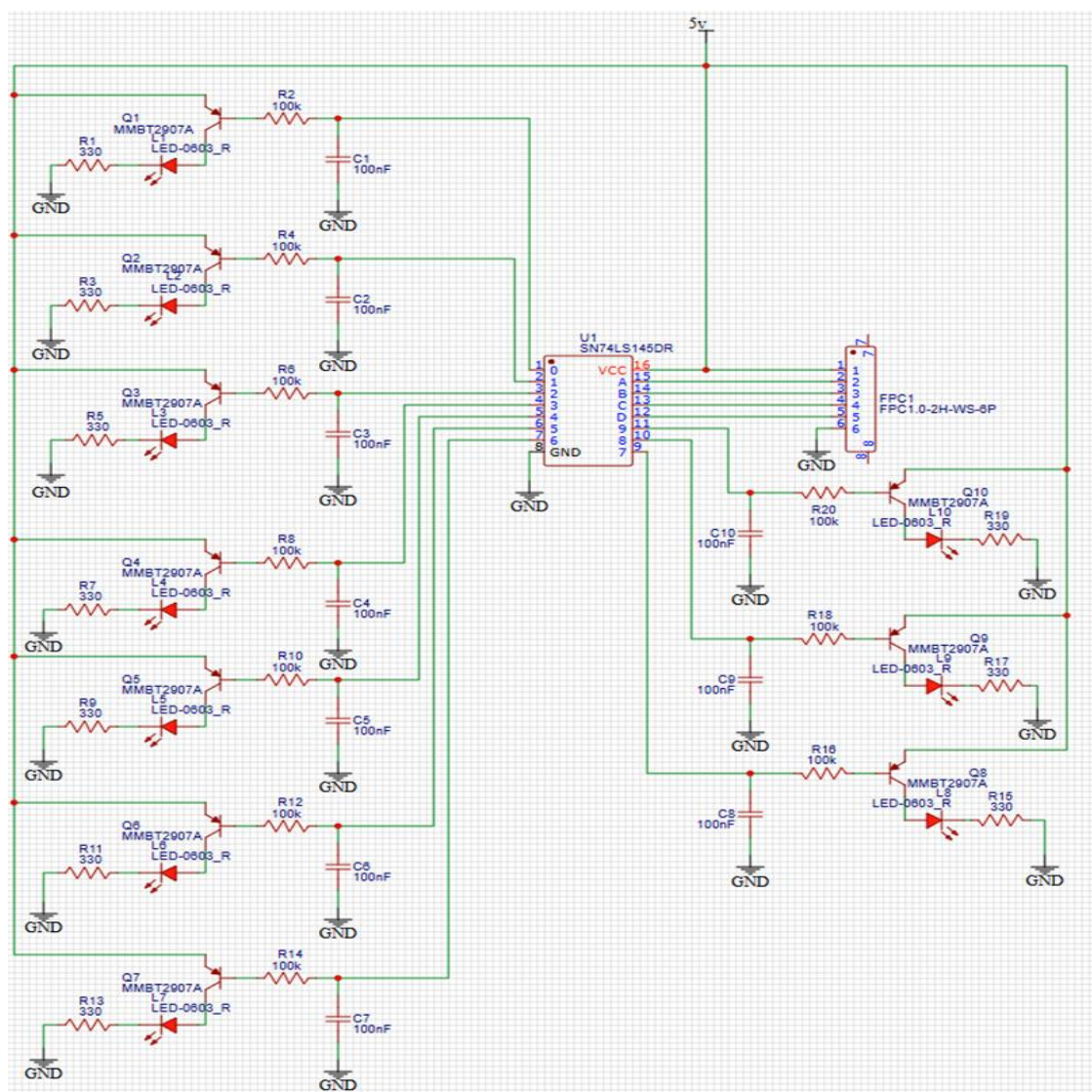


Figura 16. Esquema de Circuito diseñado en EasyEDA para operar los Leds. Elaboración propia (2024).



Con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento de las diversas etapas que conforman el circuito, se procedió a implementar de forma física el circuito en una protoboard, esto permite verificar el funcionamiento real de los leds empleando valores de resistencia comerciales. El montaje físico del circuito se muestra en la Figura 17.

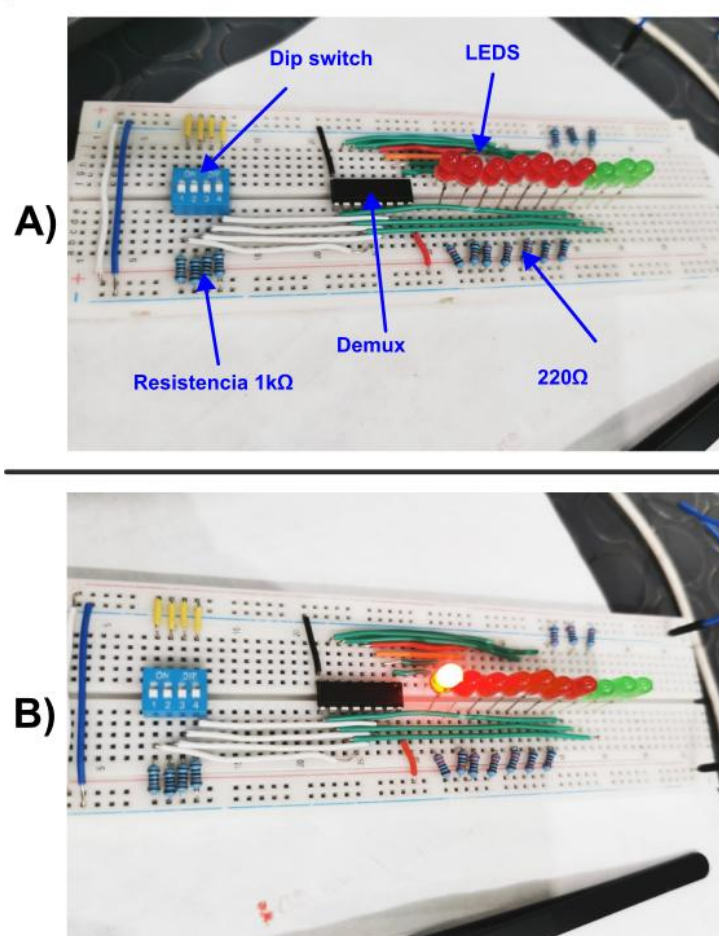


Figura 17. Circuito de la fuente de iluminación en protoboard. A) Elementos principales y B) Funcionamiento del circuito.

Al tener las conexiones realizadas se alimenta con 7v y se realizaron las pruebas de funcionamiento con el dip switch para verificar el cambio de las terminales de salida para el encendido de cada led. Esta prueba permite poder evaluar el consumo total de corriente necesaria para alimentar a las fuentes de luz incluso bajo condiciones de sobrevoltaje.



3.1.2. DISEÑO Y DISTRIBUCIÓN DE LAS VÍAS Y PADS DEL PCB

El siguiente circuito electrónico que se desarrolló fue el de la fuente de luz, este consta de diez leds, con sus respectivos transistores para el manejo de potencia y las resistencias de polarización necesarias para el correcto funcionamiento. El siguiente diagrama (ver Figura 18) se ha desarrollado con el software de diseño de circuitos electrónicos llamado EasyEDA donde se muestra la distribución del circuito a operar en la PCB con los transistores que se han propuesto para garantizar la protección del Demux frente posibles cargas de corrientes elevadas, seguido de un conector para circuito impreso flexible (FPC, por sus siglas en inglés) para las salidas lógicas del control de los leds que se han asignado.

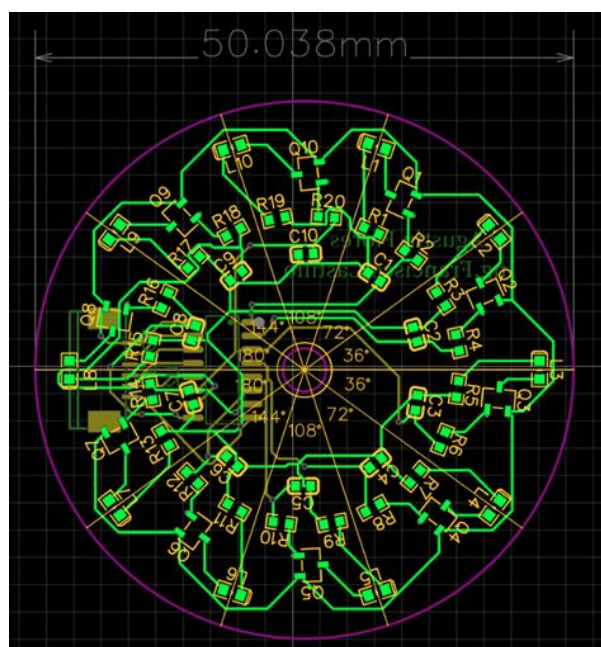


Figura 18. Diseño de placa circular diseñado en EasyEDA para operar los Leds. Elaboración propia (2025).

Se realizó el diseño y la distribución correcta de los componentes que van a ser integrados a la placa para su posterior fabricación. Es necesario considerar que la placa deberá de ser circular con una dimensión de 50 mm de diámetro, de esta forma se distribuye de una mejor manera los espacios entre cada componente, optimizando también el espacio de los componentes y las vías siendo estas de 0.2 mm ya que la corriente que se suministra es relativamente baja.

Adicionalmente, es necesario considerar que los espacios asignados para los leds deberán de encontrarse a la misma distancia del centro de la placa, esto para que pueda cambiarse de led al girar la placa. Una consideración adicional es que los leds deberán encontrarse a una misma distancia angular para que al girar la placa cierta cantidad de grados, el led correspondiente quede alineado con el sistema óptico posterior.

Debido a la cantidad de componentes en la placa se consideró en agregar una segunda capa para colocación todos los componentes como: los transistores, leds, resistencias y capacitores en la parte



frontal, así como el conector FPC y el Demultiplexor (Demux) en la parte posterior de la PCB, logrando una PCB de dos caras que se muestra de color verde la parte frontal y de color amarillo la parte posterior de la placa, ambas caras se pueden observar en la Figura 19.

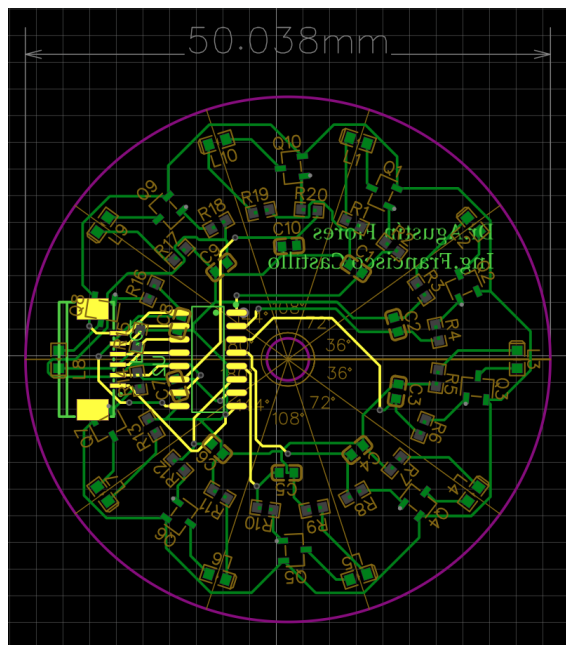


Figura 19. Diseño de placa circular con segunda capa incluida. Elaboración propia (2025).

Después de completar las conexiones y llevar a cabo la verificación de que todo estaba correcto se aplicó una vista en 2D para tener una perspectiva más realista de como estará compuesta la PCB para su respectiva fabricación (Ver Figura 20). En la Figura 21 se muestra una imagen 3D de la distribución de los componentes SMD en la PCB donde se observan las dos caras de la placa y su dimensión.

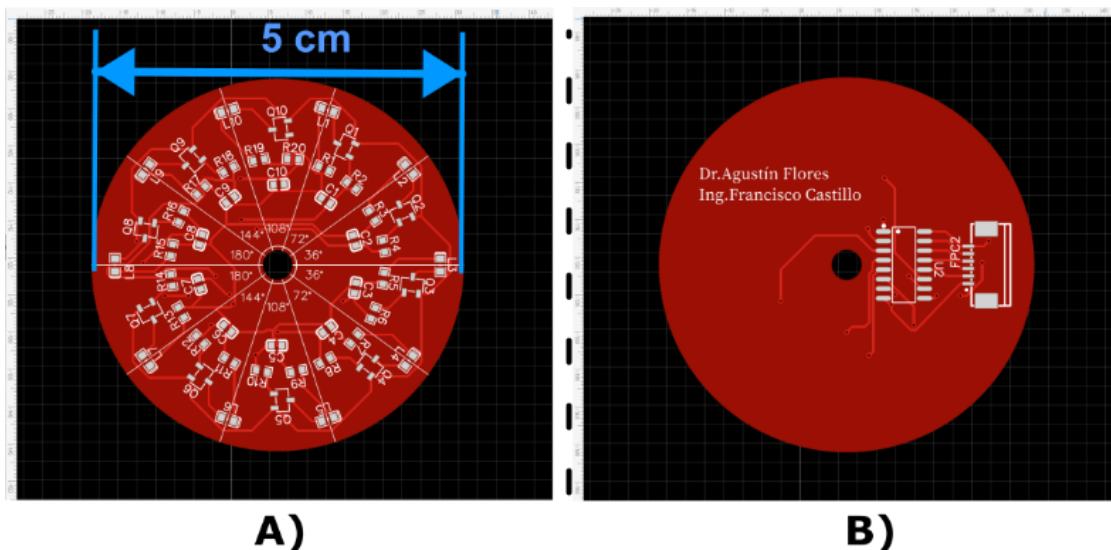


Figura 20. Vista en 2D de PCB diseñada. A) Vista de la primera capa y B) Vista de la segunda capa. Elaboración propia (2025).

Antes de iniciar el proceso de rediseño del dispositivo, se replicó el diseño previamente desarrollado en el software de diseño de circuitos integrados EasyEDA. Esta etapa permitió definir con precisión las dimensiones correspondientes a la estructura base, lo cual fue fundamental para organizar de manera eficiente los engranajes y el motor dentro del sistema. Esta aproximación aseguró que los cambios propuestos en la distribución mecánica y electrónica estuvieran alineados con los requerimientos funcionales y espaciales del dispositivo.

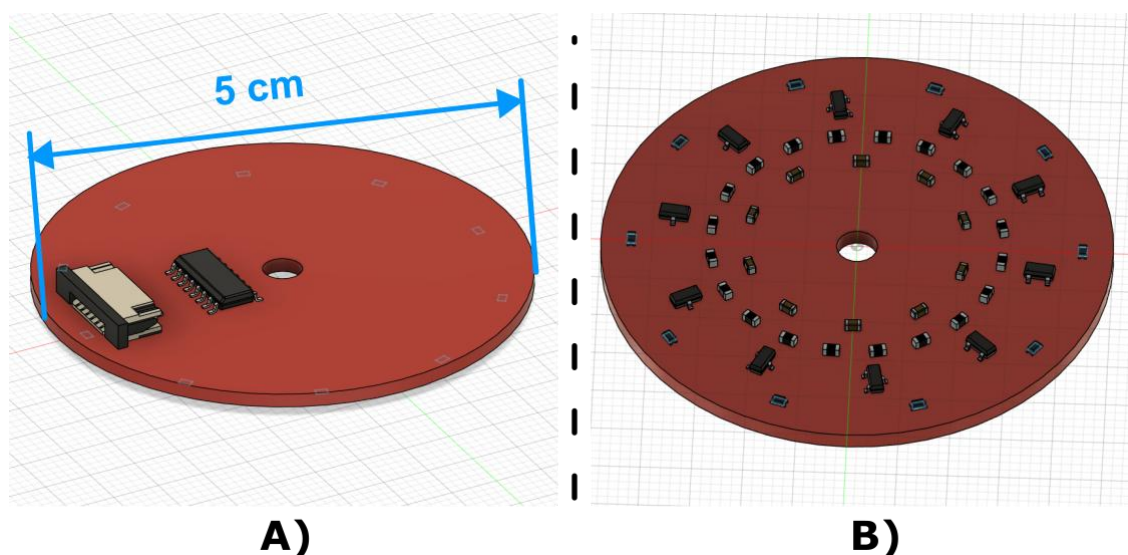


Figura 21. Diseño de PCB usando EasyEDA. Elaboración propia (2025).



Tras las modificaciones realizadas en el circuito y las mejoras implementadas en la PCB, fue necesario rediseñar la estructura de soporte del dispositivo. Este rediseño incluyó un incremento en el diámetro de la estructura a 75 mm, lo cual permitió una distribución más eficiente del motor y los engranajes, optimizando el espacio disponible y facilitando la integración de los componentes electrónicos actualizados. Además, se desarrolló un soporte específico para el motor, diseñado para garantizar su fijación durante la operación, evitando desplazamientos o vibraciones no deseadas que pudieran afectar el movimiento del sistema. Este soporte incorpora un diseño de sujeción que aseguran la estabilidad del motor bajo condiciones dinámicas, contribuyendo así a un funcionamiento más preciso y confiable del conjunto mecánico-electrónico.

3.2. DISEÑO DEL DISPOSITIVO ESPECTROSCÓPICO

Para la realización del sistema físico se emplearon los diseños creados en Solid Works para su fabricación mediante la técnica de impresión 3D. La impresora empleada es modelo Creality Ender 3 y el material usado para la impresión es ácido poliláctico (PLA). Se imprimió la estructura principal, en tanto que para los engranes necesarios para llevar a cabo los movimientos de los leds se emplearon engranes comerciales.

Se realizó el diseño en el software fusión 360 de la estructura de soporte donde va montada la PCB y el sistema mecánico que da movimiento al circuito, posteriormente también se realizó el sistema de enfoque para la emisión de luz.

En el caso de la base donde va montada la PCB se realizaron 2 extrusiones para colocar los engranes donde va montado el mecanismo de movimiento, en la cara exterior de la circunferencia se realizaron superficies dentadas para montar el sistema de enfoque y se tenga un movimiento vertical para regular la incidencia de la luz que pasa por el orificio central como se muestra en la Figura 22.

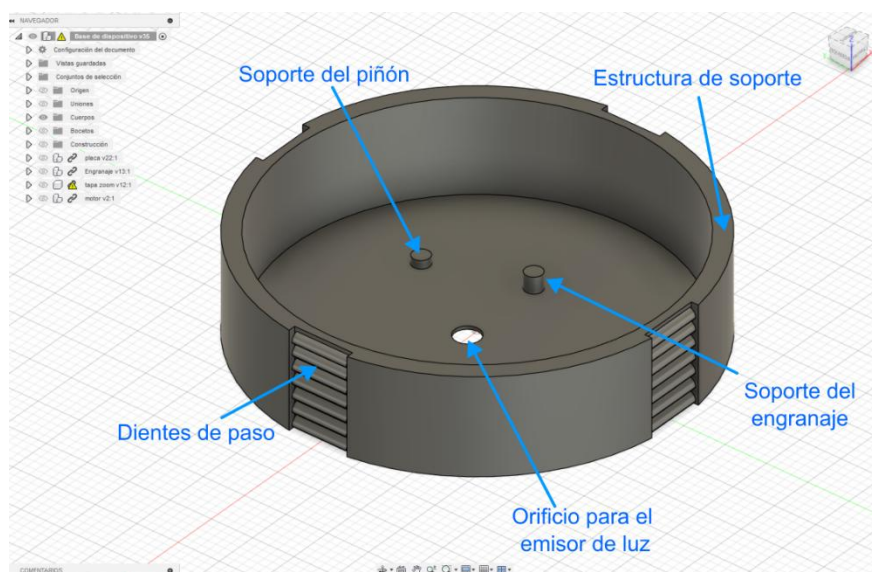


Figura 22. Diseño de la estructura de soporte. Elaboración propia (2025).



Una vez se tiene la base se monta el sistema de enfoque en la parte inferior de modo que coincidan las pestañas con los dientes de la base para su movimiento, donde se buscó que tenga un soporte mayor y facilite el movimiento. Se coloca la Tapa que dará un enfoque a la emisión de la luz ya que se coloca en el centro de la carcasa base donde van montados los componentes y los engranes, quedando de la siguiente manera en la Figura 23.

El sistema de enfoque mostrado en la Figura 24 consiste en una lente, un resorte que mantiene la lente en su posición y un sistema de rosca que permite modificar el punto focal de la lente, de esta forma es posible hacer incidir la mayor cantidad de luz sobre la muestra a analizar. Esto se lleva a cabo debido a que la altura de la muestra bajo análisis puede variar, con lo cual es necesario modificar el punto focal de acuerdo con la altura de la muestra.

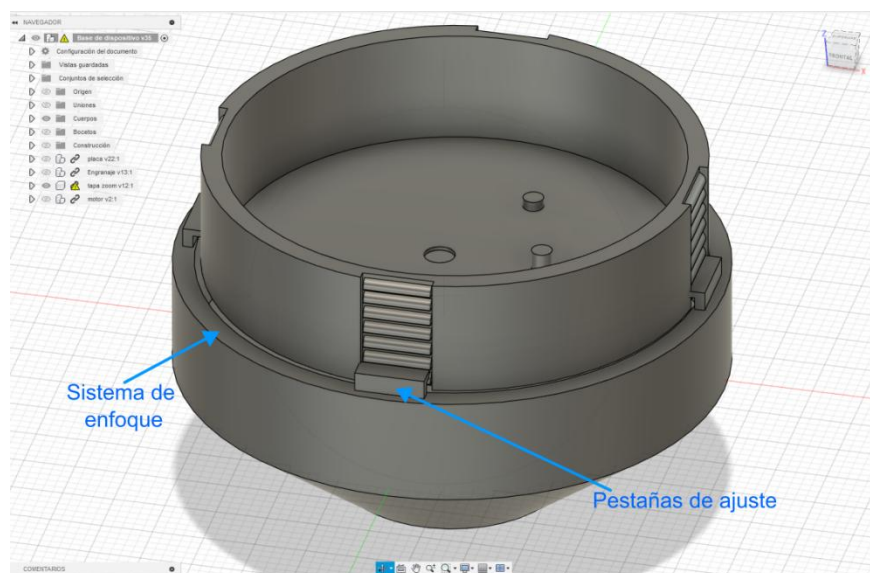


Figura 23. Vista del ensamblaje del sistema de enfoque con la estructura de soporte. Elaboración propia (2025).

La salida del haz luminoso se diseñó en forma cónica, esto con la finalidad de que pudiera ser acoplada a las celdas de medición y al mismo tiempo pudiera alinearse fácilmente el foco del haz de luz con la celda a la cual se acopla el sistema de enfoque. Es necesario aclarar que a pesar de que el cono ayuda a alinear los diferentes componentes, este no está diseñado para movimientos continuos entre el sistema de enfoque y cualquier otro componente, esto es una consecuencia del proceso de impresión 3D en el cual la superficie obtenida es rugosa y no se sometió a ningún otro procedimiento.

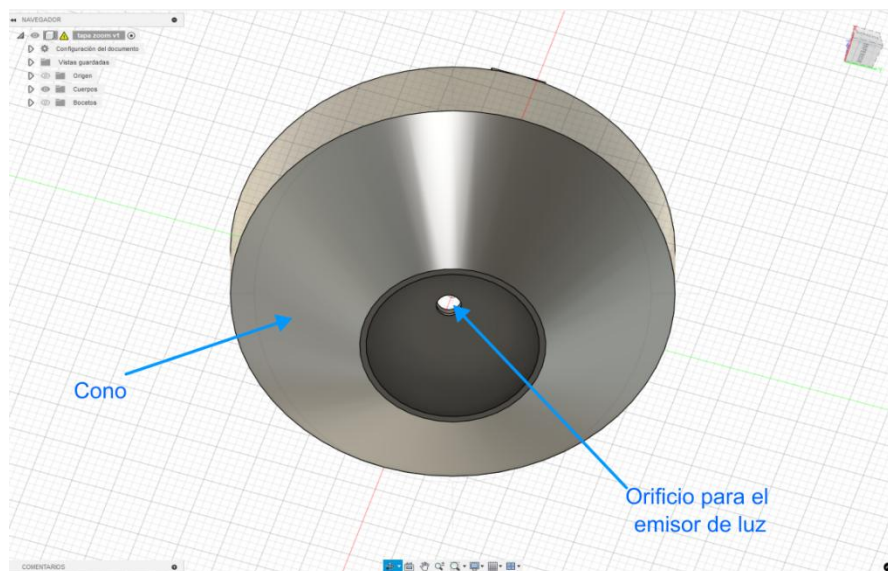


Figura 24. Detalle del sistema de enfoque, en donde es posible apreciar el cono para posicionar una lente redonda. Elaboración propia (2025).

Se toma como referencia el diseño de la PCB para dimensionar el tamaño y realizar las medidas de la distribución de los demás componentes que integran el sistema mecánico de movimiento, así como también diseñando los leds y el integrado SMD. En la Figura 25 se muestra la vista inferior de la placa PCB diseñada, en dicha vista es posible apreciar la distribución de los leds que hacen parte del sistema de iluminación.

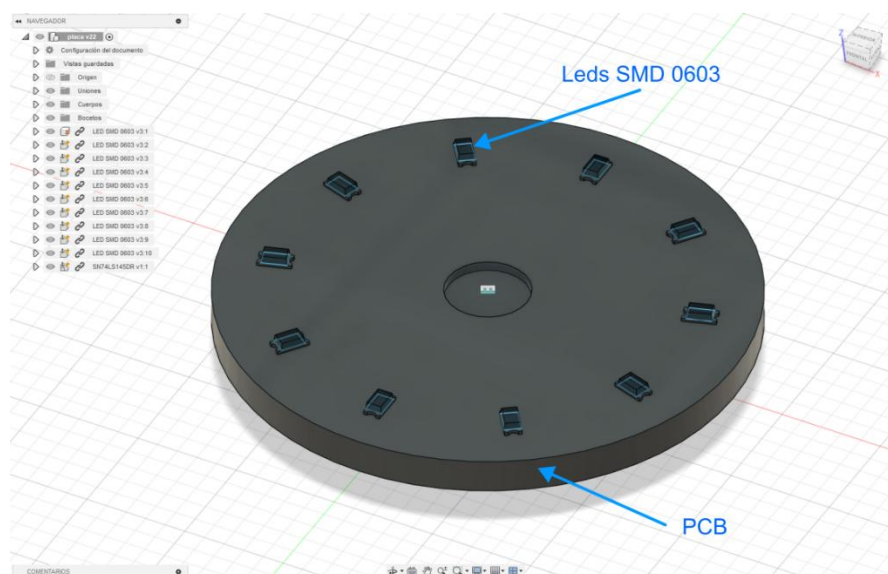


Figura 25. Vista inferior de la PCB con detalle de la ubicación de los leds. Elaboración propia (2025)



En la Figura 26 se aprecia la vista superior de la PCB mostrando la ubicación del demultiplexor, para una mejor referencia se incluye la disposición de los leds ubicados en la parte inferior de la PCB.

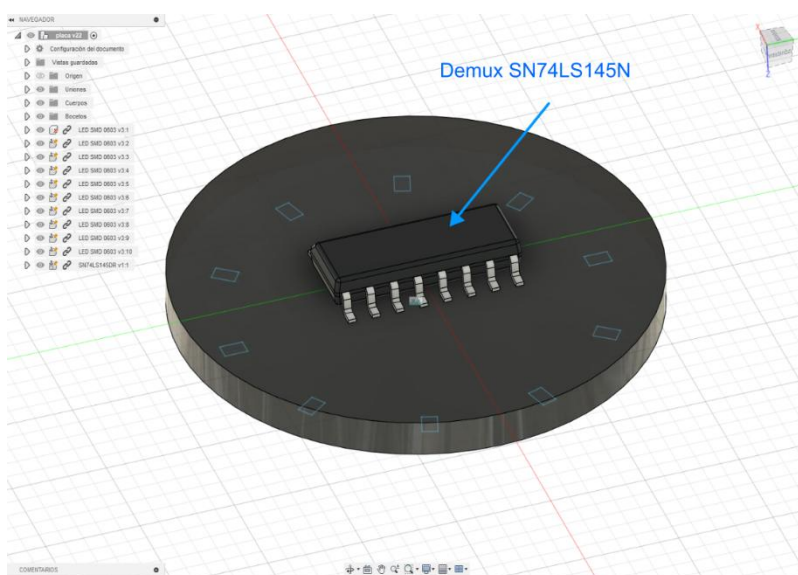


Figura 26. Vista superior de la PCB con la ubicación del demultiplexor. Elaboración propia (2025).

Un sistema de piñón-engrane permite reducir la velocidad de rotación del motor y al mismo tiempo aumenta el torque, por lo cual el motor se acopló al arreglo piñón-engrane mostrado en la Figura 27. La relación de dientes es de 5 a 7, con lo cual la velocidad del motor se reduce en la misma proporción. Es importante mencionar que el engrane se acoplará directamente a la PCB con lo cual el giro del engrane permite cambiar de led con el correspondiente cambio de longitud de onda.

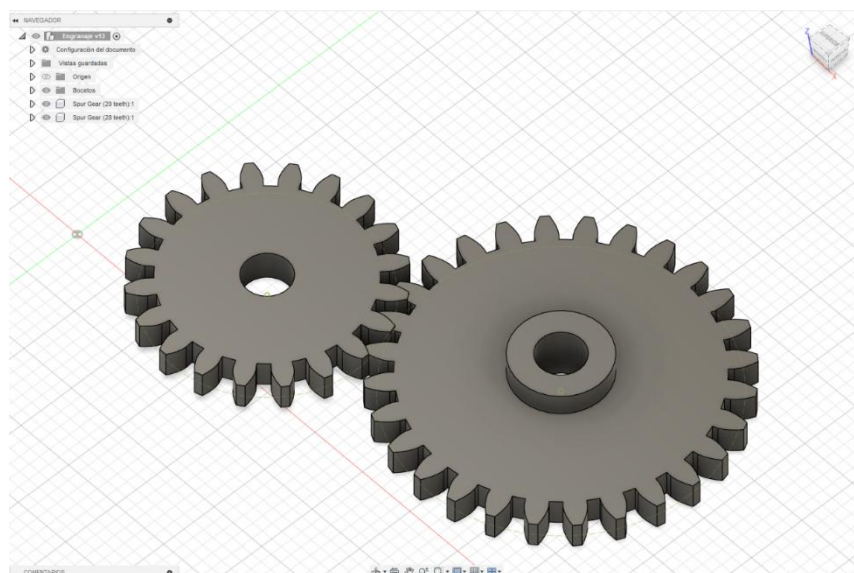


Figura 27. Sistema de piñón-engrane para reducción de velocidad del motor. Elaboración propia (2025).

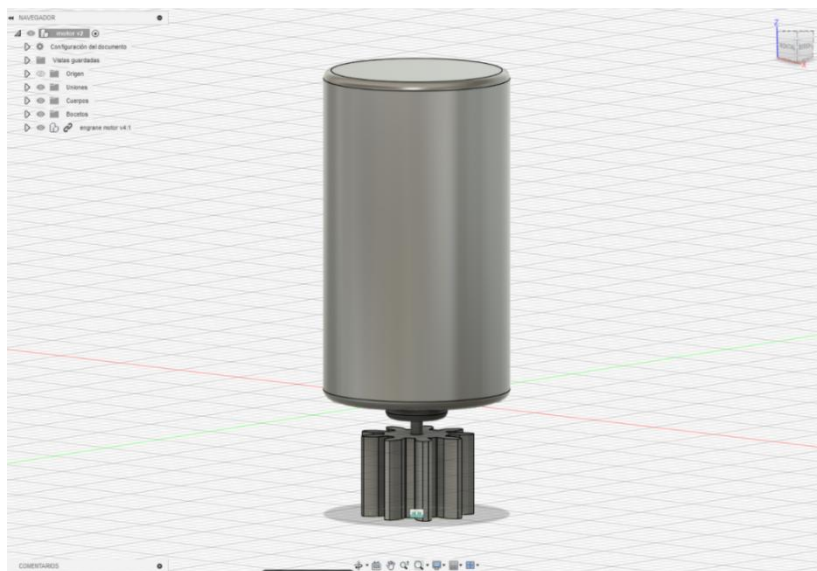


Figura 28. Esquema del motor 28BYJ. Elaboración propia (2025).

La Figura 28 muestra un esquema del motor empleado para generar el movimiento de los engranes junto con la PCB. El motor empleado es del modelo 28byj-48, dicho motor es un motor a pasos con cuatro fases y torque superior a 34.3 N/m con un consumo de potencia de 300 mW cuando se alimenta con 5V .

La Figura 29 muestra el sistema piñón-engrane, así como el motor, los cuales conforman el sistema mecánico encargado de generar el movimiento de la PCB con el correspondiente cambio de fuente de luz. Es posible apreciar la ubicación de los componentes mencionados sobre la estructura de soporte.

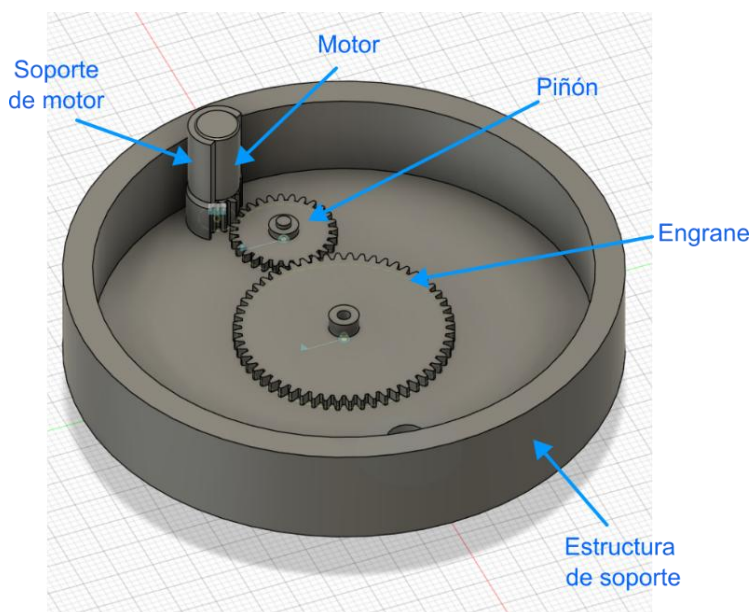


Figura 29. Ubicación del sistema mecánico de movimiento de la PCB. Elaboración propia (2025).



Después de diseñar cada uno de los componentes que se proponen en el diseño del dispositivo espectroscópico se ensamblan cada una de las partes y se obtiene un diseño previo para la fabricación de la estructura de soporte y el sistema de enfoque. La Figura 30 muestra un ensamblaje de la estructura de soporte, el sistema de enfoque, los engranes, motor y la PCB, en esta figura se emplearon transparencias para una mejor visualización de las diferentes partes que componen el sistema.

Este diseño permite una optimiza distribución espacial interna, facilitando un mejor aprovechamiento del área disponible. Como resultado, se logró posicionar la placa de circuito impreso (PCB) en el centro de la estructura, lo cual no solo mejora la organización de los componentes electrónicos, sino que también contribuye a una mayor estabilidad mecánica y térmica del conjunto. Este diseño se ilustra de manera detallada en la Figura 30.

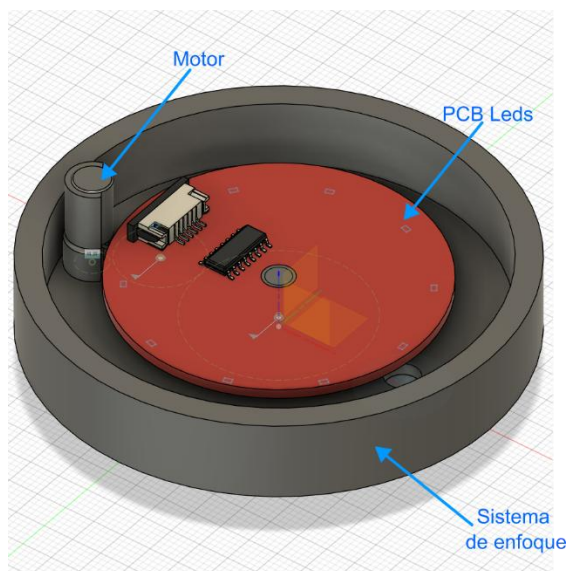


Figura 30. Ensamble del sistema de enfoque, sistema mecánico y PCB sobre la estructura de soporte. Elaboración propia (2025).

Una vista isométrica nos da una idea panorámica general en 3D de cómo queda el diseño completo. En la Figura 31 se presenta una vista axonométrica con un estilo realista que corresponde a una vista despiezada con líneas de despiece que indican la ubicación original de cada componente. Además de otra con estilo *shaded with edges*, es importante recalcar que este estilo de vista no muestra un sombreado con bordes, si no por el contrario que permite visualizar con detalle las piezas y evita que los bordes se mezclen.

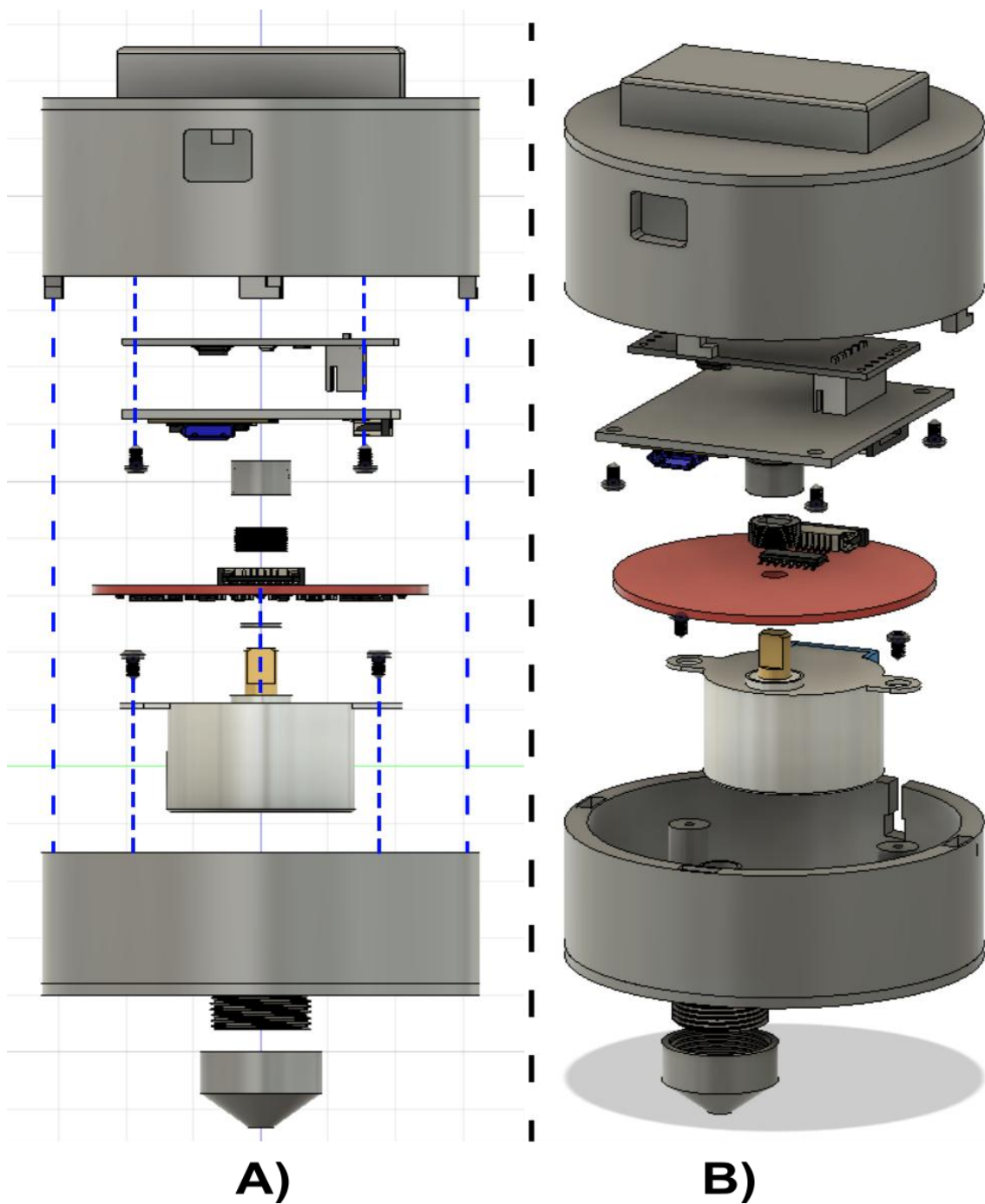


Figura 31. Vista axonométrica: A) Estilo de vista Realista: líneas de cómo se embonan los tornillos con líneas puntadas de color azul. B) Estilo de vista shaded with edges.



CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Cómo el sistema de fuente de luz basados en el uso de leds debe trabajar a bajas temperaturas, además que no tendrá contacto de la exposición de luz ultravioleta se optó por llevar a cabo la impresión de diversas piezas por el proceso de impresión 3D utilizando material PLA.

Se comenzó por la impresión de la placa PCB Arduino Nano Every de dimensiones $4\text{ cm} \times 4.6\text{ cm}$ que se observa en la Figura 32 y se procedió a soldar tanto el arduino, la alimentación y el conector FPC.

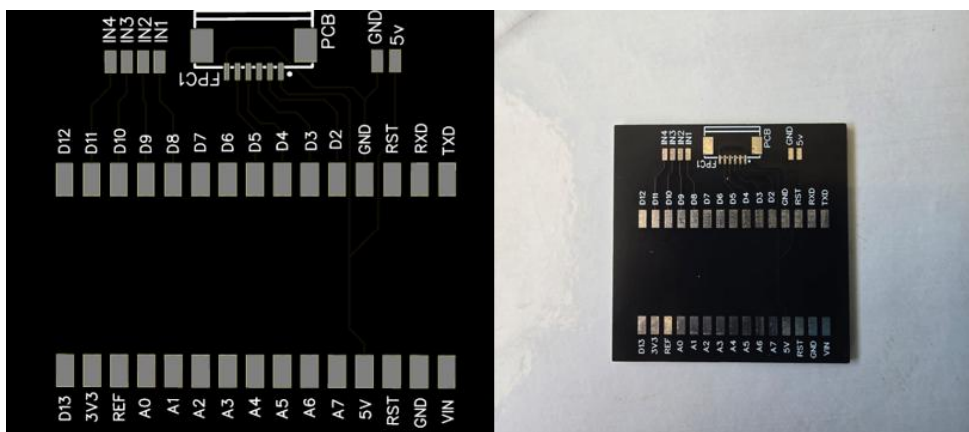


Figura 32. PCB de conexión arduino con el conector flexible. Elaboración propia (2025).

Esta placa se conectó a placa PCB donde se encuentran los leds por medio del conector FPC y se ubicó finalmente sobre el Módulo driver ULN2003. En la Figura 33 se puede observar la conexión de cada una de las conexiones de los componentes del sistema antes de su colocación final dentro de la cavidad.

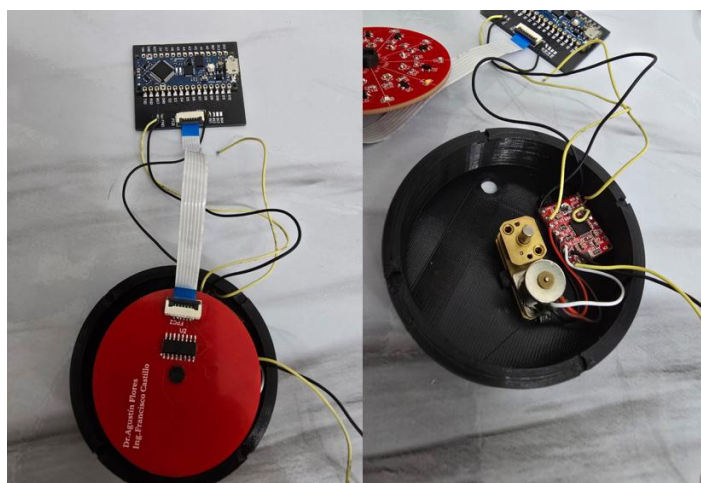


Figura 33. Fotografía de la PCB, sistema mecánico y conexión con Arduino. Elaboración propia (2025).



Una vez teniendo la debida colocación de los componentes electrónicos, se continuó con la programación que tiene como lógica lo que se presenta en el Anexo C. La comunicación del PCB Arduino Nano Every con la computadora para cargar los códigos de programación (la Figura 34 muestra una captura de pantalla de la comunicación del sistema de iluminación con la computadora), esto se lleva a cabo mediante el puerto USB. Para llevar a cabo la correcta comunicación es necesario seleccionar “Arduino Nano Every” en la opción de tarjeta de desarrollo, en tanto que en la sección de puerto de comunicación es necesario seleccionar la opción de puerto serial (COM3).

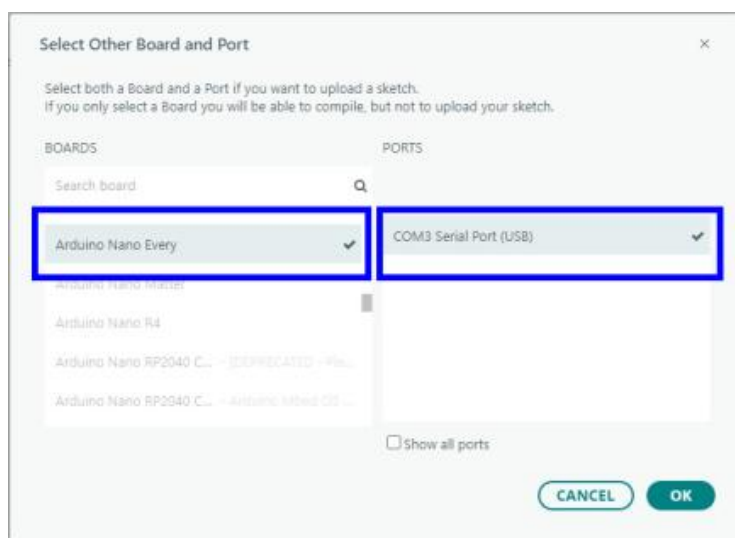


Figura 34. Puerto serial de dispositivo de iluminación conectado. Elaboración propia (2025).

Para la interfaz del sistema de iluminación el usuario deberá familiarizarse con los comandos (la Figura 35 muestra las diferentes opciones que conforman el menú de instrucciones del sistema de iluminación), en primer lugar, se muestra la sección dedicada al motor del sistema y que es el encargado de seleccionar el color del led que será encargado de iluminar la muestra, en esta opción es posible seleccionar individualmente cada uno de los colores de los que está conformado el sistema esta opción se activa mediante la instrucción “IX”, en donde la “X” representa el número de led que se va a activar.

La segunda instrucción “fx” determina la frecuencia de modulación del sistema, esto debido a que en espectroscopia fotoacústica es necesario contar con dicha modulación. La frecuencia de modulación se encuentra en el rango de 0.2 H a 100 Hz, por lo cual es posible introducir valores numéricos en el rango antes mencionado.

Una de las opciones con las que cuenta este sistema de iluminación es mantener encendida la fuente de iluminación o activar la modulación, esto se lleva a cabo mediante el comando “f”,

Cabe mencionar que lo correspondiente al control del motor encargado de mover cada uno de los LEDs del dispositivo. Se ofrece la opción para desplazar un LED específico; para ello, basta con seleccionar el comando de **I1** a **I10**, lo que mueve el motor hasta la posición del LED que se desea encender.



Se establece un comando para configurar la frecuencia en Hertz (Hz) que se aplicará a cada LED, permitiendo un rango desde 0.2 Hz hasta 20 Hz. Este comando permite encender o apagar la señal de frecuencia de los LEDs.

```
Dispositivobien6.0 | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help

Dispositivobien6.0.ino
268 Serial.print("Parpadeo: ");
269 Serial.print(blinkEnabled ? "ON (" : "OFF (");
270 Serial.print(blinkInterval);
271 Serial.println(" ms");
272 }
273
274 // Menú de comandos
275 void printMenu() {
276   Serial.println("\n=== CONTROL MOTOR 28BYJ-48 ===");
277   Serial.println("lX : Ir al LED X (1-10)");
278   Serial.println("fX : Frecuencia parpadeo en Hz (0.2-20 Hz)");
279   Serial.println("f : Alternar parpadeo ON/OFF");
}

Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'Arduino Nano Every' on 'COM3')

=== CONTROL MOTOR 28BYJ-48 ===
lX : Ir al LED X (1-10)
fX : Frecuencia parpadeo en Hz (0.2-20 Hz)
f : Alternar parpadeo ON/OFF
g : Avance progresivo automático (con pausas)
r : Retroceso progresivo automático (con pausas)
+ : Avanzar 36° (manual)
- : Retroceder 36° (manual)
h : Regresar a 0° inmediato
a : Alternar retroceso automático
? : Mostrar estado actual

-----
Posición: 35.86° | LED: 2 | Color: Rojo
Posición: 71.72° | LED: 3 | Color: Azul
Posición: 107.58° | LED: 4 | Color: Verde

Regresando a 0° (LED 1)...
Posición reiniciada
```

Figura 35. Captura de pantalla de la interfaz de control del sistema de iluminación. Elaboración propia (2025).

Para lograr un movimiento automático de los LEDs, estos se desplazan en sentido horario, iniciando desde el LED 1 hasta el LED 10. De manera similar, se puede activar un movimiento automático en sentido antihorario, desplazándose desde el LED 10 hasta el LED 1.

El movimiento manual en sentido horario se controla mediante el comando "+", que avanza el motor en incrementos de 36° para seleccionar cada LED y para el movimiento manual en sentido antihorario se controla con el comando "-", que retrocede el motor en incrementos de 36° para seleccionar cada LED.



Para regresar automáticamente a la posición inicial, se utiliza el comando “h”, el cual posiciona el motor en el LED 1. Es importante regresar a la posición inicial después de usar el dispositivo, ya que al reconectarlo este iniciará desde la última posición registrada. Si no es así, deberá ajustarse manualmente hasta la posición inicial.

El dispositivo permite activar o desactivar el movimiento automático al llegar a la posición final. Al usar el comando “g”, el motor regresa a la posición inicial o se mantiene en la posición final hasta que se utilice el comando “r”. Además, se puede consultar el estado actual del dispositivo utilizando el comando “?”, mostrando información como la posición del motor, la frecuencia establecida, el LED encendido, el límite máximo en grados y si el modo de retroceso automático está activado o desactivado.

La lista de leds a utilizar en el dispositivo según su orden en los comandos led l1 al l10 son Led 1: blanco, Led 2: rojo, Led 3: azul, Led 4: verde, Led 5: amarillo, Led 6: blanco cálido, Led 7: naranja, Led 8: morado, Led 9: amarillo verdoso y Led 10: rosa. Un ejemplo de como los leds emiten diferente color de luz se puede ver la Figura 36.



Figura 36. Imágenes del sistema de iluminación (centro) y ejemplos de las diferentes longitudes de onda emitidas. Elaboración propia (2025).

Para las muestras que tengan absorción en todo el rango visible, el usuario podrá programar la siguiente secuencia: l8, l1, l3, l4, l9, l5, l6, l7, l2.



Quedando una fuente de luz led completa de tamaño compacto, como se puede ver en la Figura 37.



Figura 37. Fotografía del sistema de iluminación compacto, conectado a la computadora y detalle de dicho sistema. Elaboración propia (2025).

Este sistema fue probado haciendo incidir la luz roja en una celda que tiene como sensor un piezoeléctrico y que se encuentra en el laboratorio, esta celda está diseñada para colocar muestras líquidas, sólidas y geles para estudios de propiedades térmicas. Estas pruebas fueron realizadas con el fin de corroborar que la fuente de luz emite una luz enfocada (ver Figura 38).

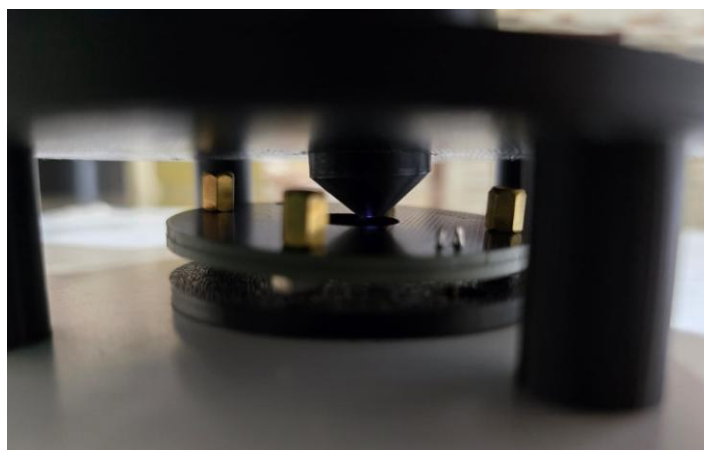


Figura 38. Sistema de iluminación con una celda con sensor piezoeléctrico. Elaboración propia (2025).

Como resultados adicionales se tiene un Manual de usuario que se puede encontrar en el Anexo C, además, se diseñó y fabricó una celda fotoacústica para muestras sólidas, líquidas, geles, lodos. De esta celda de espectroscopia fotoacústica se habló en la introducción y en la primera parte del desarrollo en este trabajo de tesis, como se puede ver el diseño de la celda PA (ver Figura 39) consta de una cavidad principal (cavidad muestra 1) donde se debe colocar la muestra de la cual se necesita



obtener su espectro de absorbancia, dos ventanas ópticas de cuarzo que cierran herméticamente la celda con el uso de O-rings y un detector. Es importante señalar que para la obtención el espectro de absorbancia de la muestra, la señal obtenida de la muestra debe antes ser normalizado con una muestra de referencia que absorbe en todas las longitudes de onda (carbono en polvo) y que debe ser distribuido sobre toda la superficie de la cavidad 1.

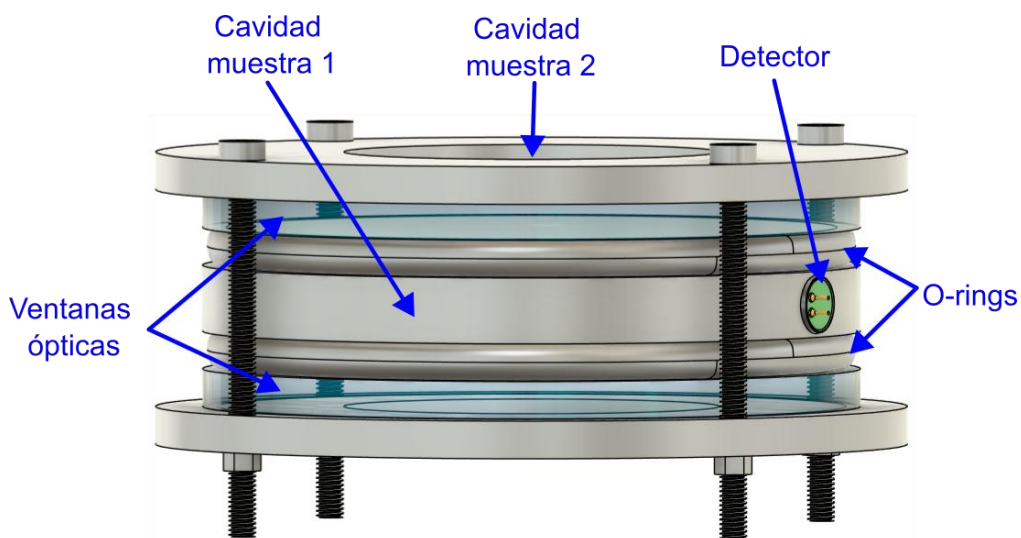


Figura 39. Diseño de celda la PA para muestras sólidas, líquidas y geles. Elaboración propia (2025).

En el caso de que en futuras aplicaciones se quiera analizar el espectro de transmitancia, entonces en la cavidad 1 (cavidad muestra 1) estará una muestra la muestra de referencia y en la cavidad 2 (Cavidad muestra 2) se encontrará la muestra que se necesita estudiar.



Figura 40. Construcción de la celda PA. Elaboración propia (2025).



La celda PA que se diseñó y se construyó se puede ver a detalle en la Figura 40. Esta celda estará dentro de una cavidad y que se acoplará con el sistema de iluminación que se mostró en las Figuras 36 y 37. En la Figura 41 se muestra dos vistas de cómo queda el diseño del ensamble.

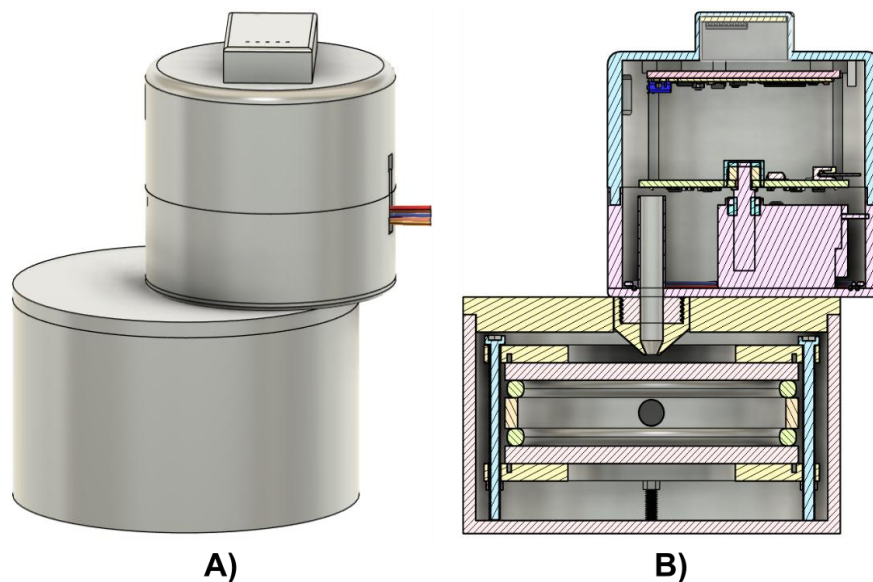


Figura 41. Diseño del ensamble de la fuente de luz con la celda fotoacústica. A) Vista general del diseño (en la parte superior se muestra la fuente de luz y en la parte inferior la celda fotoacústica) y B) Sección transversal del montaje de la fuente de luz led y la celda fotoacústica. Elaboración propia (2025).

La construcción y ensamble completo del sistema de iluminación con la celda PA se puede ver en la Figura 42. Como se puede observar el sistema completo de espectroscopía fotoacústica es de tamaño compacto.

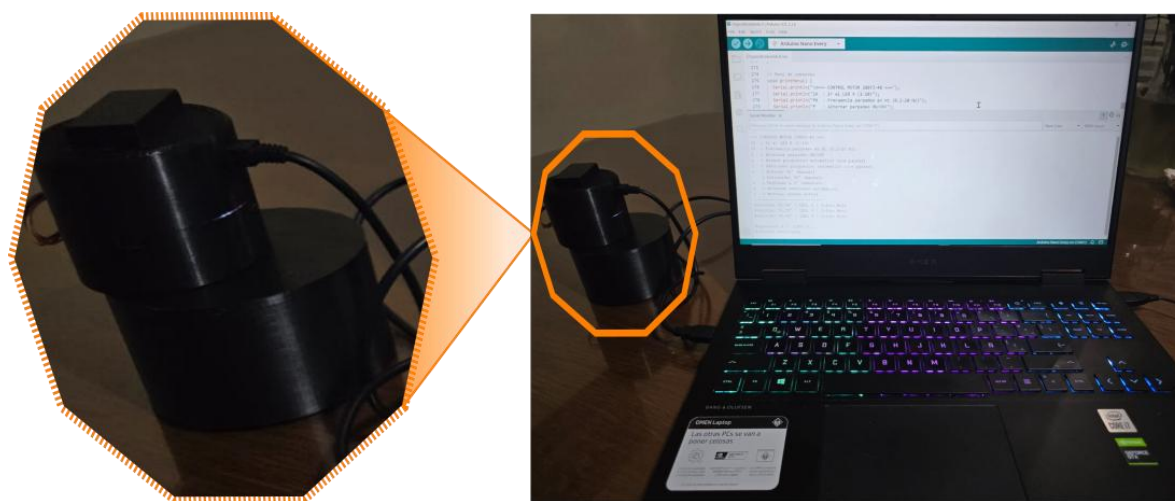


Figura 42. Sistema de iluminación led ensamblado a cavidad de celda PA. Elaboración propia (2025).



CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un sistema de iluminación para ser empleado en sistemas de espectroscopia fotoacústica. El sistema diseñado consta de un sistema mecánico que permite el cambio del led que emite luz, cambiando con ello la longitud de onda emitida. Así mismo un sistema de control electrónico permite la modulación de la frecuencia de emisión de la fuente de luz en el rango de 0.2 a 100 Hz, que son frecuencias típicas de modulación empleadas en sistemas de espectroscopia. Se probaron diferentes configuraciones para llegar al diseño empleado en el sistema de iluminación presentado. Las pruebas iniciales mostraron que el empleo de servomotores permite un mejor control para el cambio de los diferentes leds empleados. Se comprobó que para cumplir con los requerimientos de un sistema de espectroscopia era necesario dotar al sistema de una lente con su correspondiente mecanismo para poder modificar el punto focal del sistema y con ello poder analizar muestras a diferentes distancias del cono de emisión del sistema diseñado.

El sistema diseñado incorpora un control mediante el puerto serial con un set de instrucciones basadas en texto, esto permite que se pueda controlar mediante la interfaz propia de arduino, pero también mediante cualquier software que emplee este tipo de comunicación con lo cual el control de la fuente de iluminación puede llevarse a cabo desde diferentes plataformas, por ejemplo, LabView, o Matlab.

El diseño propuesto considera la posibilidad de adaptarse a diferentes celdas de medición por lo cual, podría ser posible llevar a cabo mediciones de gases, líquidos y sólidos, tanto en los modos de transmisión como absorción.

Como trabajo futuro se plantea el cambio de los leds empleados por otros de mayor potencia, esto para poder mejorar la relación señal a ruido en mediciones experimentales.



PRODUCTOS DE LA TESIS

Artículo de divulgación:

Fotoacústica: Estudiar la materia escuchando la luz, **Francisco Javier Castillo Romero**, Jose de Jesus Agustin Flores Cuautle, Oscar Osvaldo Sandoval González, Gemima Lara Hernández, Publicado en Revista Ideas en ciencias de la ingeniería, 2025 [10].

Artículo Conacyt:

Electronics in Agriculture — Importance, Innovations, and Challenges in Smart Farming Time, **Castillo Romero, F. Javier**, Kumar-Shankar, Vijay; Martínez Sibaja, Albino; Flores-Cuautle, J.J. Agustin. **En revisión** Agroproductividad 2025.



References

- [1] E. Marín, "Escuchando la luz: breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico," *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 2, no. 2, p. 17, 2008.
- [2] S. N. Thakur, "Chapter 13 - Photoacoustic Spectroscopy: Applications in Security and Biology," in *Molecular and Laser Spectroscopy*, V. P. Gupta Ed.: Elsevier, 2018, pp. 283–316.
- [3] L. Jiarui and W. Jifen, "Biological Evidence Analysis: a Research Progress of Photoacoustic Spectroscopy in Forensic Science," *Laser & Optoelectronics Progress*, vol. 58, no. 24, p. 2400004, 2021, doi: 10.3788/lop202158.2400004.
- [4] C. Du, K. W. Goyne, R. J. Miles, and J. Zhou, "A 1915–2011 microscale record of soil organic matter under wheat cultivation using FTIR-PAS depth-profiling," *Agronomy for sustainable development*, vol. 34, no. 4, pp. 803–811, 2014.
- [5] A. Agnelli, G. Corti, L. Massaccesi, S. Ventura, and L. P. D'Acqui, "Impact of biological crusts on soil formation in polar ecosystems," *Geoderma*, vol. 401, p. 115340, 2021.
- [6] Y. V. Kistenev, A. V. Borisov, D. A. Kuzmin, O. V. Penkova, N. Y. Kostyukova, and A. A. Karapuzikov, "Exhaled air analysis using wideband wave number tuning range infrared laser photoacoustic spectroscopy," *Journal of biomedical optics*, vol. 22, no. 1, pp. 017002–017002, 2017.
- [7] M. Priya, S. Chandra, B. S. S. Rao, S. Ray, and K. K. Mahato, "Predictive potential of photoacoustic spectroscopy in breast tumor detection based on xenograft serum profiles," in *Photonic Therapeutics and Diagnostics XI*, 2015, vol. 9303: SPIE, pp. 340–345.
- [8] W. A. Junior, S. Lima, L. Andrade, and Y. Suárez, "Comparative study of the cuticular hydrocarbon in queens, workers and males of *Ectatomma vizottoi* (Hymenoptera, Formicidae) by Fourier transform-infrared photoacoustic spectroscopy," *Genetics and molecular research*, vol. 6, no. 3, pp. 492–499, 2007.
- [9] Z. Tang, J. Liu, Y. Xia, Y. Su, L. Liang, and G. Chen, "Characteristic absorption peak of the human blood measured with differential photoacoustic spectroscopy," *Chinese Science Bulletin*, vol. 47, no. 24, pp. 2029–2033, 2002.
- [10] F. J. Castillo Romero, J. J. A. Flores Cuautle, O. O. Sandoval González, and G. Lara Hernández, "Fotoacústica: estudiar la materia escuchando la luz," *Ciencia Vital*, vol. 3, no. 3, 2025, doi: 10.20983/cienciavital.2025.03.bas.02.
- [11] W. T. Silfvast, "Lasers," in *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, R. A. Meyers Ed. New York: Academic Press, 2003, pp. 267–281.
- [12] *Optics and photonics — Spectral bands*, I. S. ISO 20473:2007, 2007.
- [13] Y. S. Leong *et al.*, "UV-Vis Spectroscopy: A New Approach for Assessing the Color Index of Transformer Insulating Oil," *Sensors*, vol. 18, no. 7, p. 2175, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2175>.
- [14] K. D. T. M. Milanez, T. C. A. Nóbrega, D. S. Nascimento, M. Insausti, B. S. F. Band, and M. J. C. Pontes, "Multivariate modeling for detecting adulteration of extra virgin olive oil with soybean oil using fluorescence and UV–Vis spectroscopies: A preliminary approach," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 85, pp. 9–15, 2017/11/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.060>.
- [15] M. Grzegorzczuk, S. J. Pogorzelski, A. Pospiech, and K. Boniewicz-Szmyt, "Monitoring of marine biofilm formation dynamics at submerged solid surfaces with multitechnique sensors," *Frontiers in Marine Science*, vol. 5, p. 363, 2018.



- [16] A. F. R. Rodriguez *et al.*, "Photoacoustic spectroscopy study of *Blepharocalyx salicifolius* (Kunt) O. Berg," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 100, pp. 75–77, 2013/01/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.07.002>.
- [17] K. K. Onchoke and S. A. Sasu, "Determination of Hexavalent Chromium (Cr(VI)) Concentrations via Ion Chromatography and UV-Vis Spectrophotometry in Samples Collected from Nacogdoches Wastewater Treatment Plant, East Texas (USA)," *Advances in Environmental Chemistry*, vol. 2016, no. 1, p. 3468635, 2016, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/3468635>.
- [18] Y. Da-Kang, Z. Chi, I. M. Konstantin, and V. W. Lihong, "Photoacoustic measurement of the Grüneisen parameter of tissue," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 19, no. 1, p. 017007, 1/1 2014, doi: 10.1117/1.JBO.19.1.017007.
- [19] J. A. Viator, P. S. Dale, R. Weight, and P. Sutovsky, "Dispositivo y método de detección fotoacústica," United States, 2007.
- [20] D. Roudil, L. Couston, J. Delage, and M. Brutel, "Device for inline measurement laser pulses and measuring method by photoacoustic spectroscopy," 2005.
- [21] R. Augustine, C. R. Krusen, C. Wang, and W.-B. Yan, "System and method for controlling a light source for cavity ring-down spectroscopy," 2007.
- [22] S. Qiao *et al.*, "Ultra-highly sensitive dual gases detection based on photoacoustic spectroscopy by exploiting a long-wave, high-power, wide-tunable, single-longitudinal-mode solid-state laser," *Light: Science & Applications*, vol. 13, no. 1, p. 100, 2024/05/01 2024, doi: 10.1038/s41377-024-01459-5.
- [23] J. Rodrigues *et al.*, "Machine Learning Enabled Photoacoustic Spectroscopy for Noninvasive Assessment of Breast Tumor Progression In Vivo: A Preclinical Study," *ACS Sensors*, vol. 9, no. 2, pp. 589–601, 2024/02/23 2024, doi: 10.1021/acssensors.3c01085.
- [24] F. M. Schmidt, M. Metsälä, A. Apolonski, and S. M. Cristescu, "Chapter 14 - Optical spectroscopy," in *Breathborne Biomarkers and the Human Volatilome (Second Edition)*, J. Beauchamp, C. Davis, and J. Pleil Eds. Boston: Elsevier, 2020, pp. 221–238.
- [25] M. Grzegorzczuk, S. Pogorzelski, and P. Rochowski, "Towards a novel class of photoacoustics-based water contamination sensors," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 3, p. 107983, 2022/06/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107983>.
- [26] A. S. Meidert, P. Rucz, J. Angster, J. Esser, A. Miklós, and G. Schelling, "Photoacoustic detection of propofol in breath gas for monitoring depth of anaesthesia: from bench to bedside," *British Journal of Anaesthesia*, 2025/09/09/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bja.2025.07.080>.
- [27] S. Agrawal *et al.*, "Light-Emitting-Diode-Based Multispectral Photoacoustic Computed Tomography System," *Sensors*, vol. 19, no. 22, p. 4861, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/22/4861>.
- [28] M. W. Sigrist, "Photoacoustic Spectroscopy, Methods and Instrumentation☆," in *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Third Edition)*, J. C. Lindon, G. E. Tranter, and D. W. Koppenaal Eds. Oxford: Academic Press, 2017, pp. 598–602.
- [29] S. K. Joshi, J. Jogi, and S. K. Singhal, "25 - Photoacoustic spectroscopy and its applications to ferrite materials," in *Ferrite Nanostructured Magnetic Materials*, J. Pal Singh, K. H. Chae, R. C. Srivastava, and O. F. Caltun Eds.: Woodhead Publishing, 2023, pp. 479–493.
- [30] H.-w. Jin, L. Fang, Z.-y. Li, and D. Wang, "Simultaneous measurement of NO and NO₂ by dual-channel cavity photoacoustic spectroscopy technique," *Optics & Laser Technology*, vol. 156, p. 108589, 2022/12/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108589>.



- [31] Z. Li *et al.*, "Compact gas cell for simultaneous detection of atmospheric aerosol optical properties based on photoacoustic spectroscopy and integrating sphere scattering enhancement," *Photoacoustics*, vol. 36, p. 100591, 2024/04/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2024.100591>.
- [32] B. Goldschmidt, A. Sudduth, E. Samson, P. Whiteside, K. Bhattacharyya, and J. Viator, "Total internal reflection photoacoustic spectroscopy for the detection of β -hematin," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 17, no. 6, p. 061212, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.17.6.061212>.
- [33] Y. Chen *et al.*, "Prostate cancer identification via photoacoustic spectroscopy and machine learning," *Photoacoustics*, vol. 23, p. 100280, 2021/09/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2021.100280>.
- [34] Z. Gazali, S. N. Thakur, and A. K. Rai, "Compositional study of gallbladder stone using photoacoustic spectroscopy," *Optics & Laser Technology*, vol. 111, pp. 696–700, 2019/04/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.09.003>.
- [35] D. C. Dumitras, M. Petrus, A.-M. Bratu, and C. Popa, "Applications of Near Infrared Photoacoustic Spectroscopy for Analysis of Human Respiration: A Review," *Molecules*, vol. 25, no. 7, p. 1728, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/7/1728>.
- [36] G. Giubileo, A. Puiu, F. Dell'Unto, M. Tomasi, and A. Fagnani, "High resolution laser-based detection of ammonia," *Laser Physics*, vol. 19, no. 2, pp. 245–251, 2009/02/01 2009, doi: 10.1134/S1054660X09020169.
- [37] R. C. Sharma, D. Kumar, N. Bhardwaj, S. Gupta, H. Chandra, and A. K. Maini, "Portable detection system for standoff sensing of explosives and hazardous materials," *Optics Communications*, vol. 309, pp. 44–49, 2013/11/15/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.06.025>.
- [38] D. Heaps and P. Pellegrino, *Examination of quantum cascade laser source for a MEMS-scale photo-acoustic chemical sensor* (Defense and Security Symposium). SPIE, 2006.
- [39] J. Uotila *et al.*, *Drug precursor vapor phase sensing by cantilever enhanced photoacoustic spectroscopy and quantum cascade laser* (SPIE Security + Defence). SPIE, 2012.
- [40] F. Gao, X. Feng, Y. Zheng, and C.-D. Ohl, "Photoacoustic resonance spectroscopy for biological tissue characterization," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 19, no. 6, p. 067006, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.6.067006>.
- [41] D. Biswas *et al.*, "Empirical wavelet transform based photoacoustic spectral response technique for assessment of ex-vivo breast biopsy tissues," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 51, pp. 355–363, 2019/05/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.02.019>.
- [42] shoptronica. *SMD led lamps*, shoptronica, 2025. [Online]. Available: <https://www.shoptronica.com/files/Led-LS0603.pdf>. Accessed: 2025/30/09.



Anexos

ANEXO A: ARTICULO CIENTÍFICO

CIENCIA VITAL
Revista de Divulgación Científica de la UNO
ISSN 2610-5518

Ciencias Básicas
Ciencia Vital, Vol.3 No. 3, julio-septiembre 2025
<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2025.03.bas.02>
e0303BAS02

Fotoacústica: estudiar la materia escuchando la luz

Ing. Francisco Javier Castillo Romero
Instituto Tecnológico de Orizaba

Dr. Jose de Jesus Agustin Flores Cuautle
Secihti-Instituto Tecnológico de Orizaba

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval Gonzalez
Instituto Tecnológico de Orizaba

***Dra. Gemima Lara Hernández**
Instituto Tecnológico de Orizaba.
larag_139@hotmail.com

Resumen

El efecto fotoacústico ocurre cuando la luz es absorbida por un material y provoca pequeños cambios de temperatura y vibraciones que se transforman en sonido detectable mediante sensores. Este fenómeno, descubierto en el siglo XIX, ha cobrado gran relevancia gracias al desarrollo de nuevas tecnologías que permiten aprovecharlo en distintos campos. En este artículo se explica de manera sencilla cómo se origina el efecto fotoacústico y se muestran ejemplos de sus aplicaciones en áreas tan diversas como la medicina, donde se utiliza para obtener imágenes no invasivas de tejidos, la agricultura, para mejorar la calidad de los cultivos y alimentos, o el medio ambiente, al facilitar la detección de contaminantes en el aire y el agua. Más allá del interés científico, la fotoacústica representa una herramienta prometedora con beneficios directos para la salud, la industria y el cuidado del entorno.

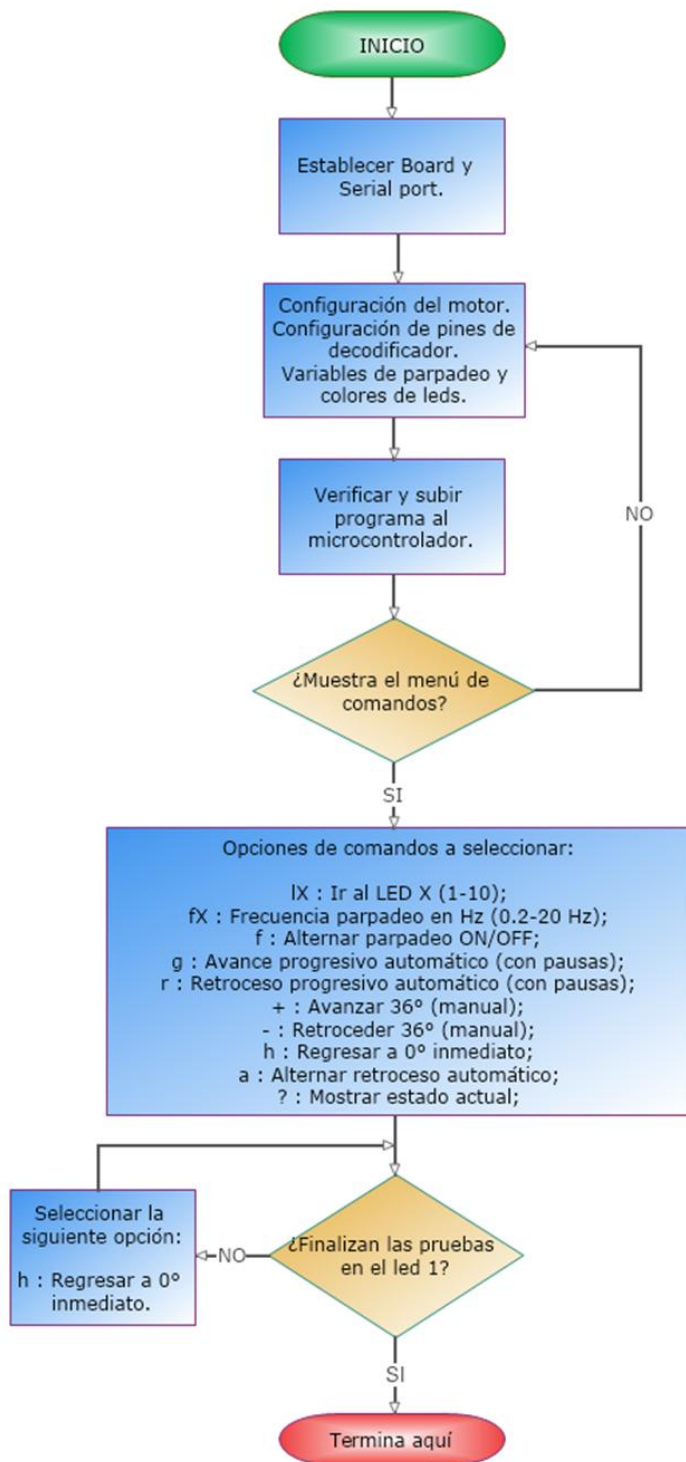
Introducción

En física, el estudio del calor y del sonido suele considerarse como áreas separadas. Sin embargo, existe una zona de convergencia entre ambas, especialmente cuando

la luz es absorbida por un material y produce calor y vibraciones. Este fenómeno ha generado interés en distintas disciplinas.



ANEXO B: LISTA DE COMANDOS PARA EL CONTROL DEL DISPOSITIVO





ANEXO C: MANUAL DE USUARIO

Índice

1. INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD	2
1.1 Seguridad eléctrica	2
1.2 Temperatura y condiciones ambientales	2
1.3 Riesgos Mecánicos	2
1.4 Advertencias	2
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	3
Aspecto General	3
3. INSTALACIÓN	4
3.1 Fijación de motor	4
3.2 Fijación de la fuente luminosa y módulo	5
3.3 Fijación de microcontrolador	6
3.4 Conexión de la fuente luminosa al microcontrolador	7
3.5 Ensamble del dispositivo y roscado del cono de enfoque	8
3.6 Ensamble de dispositivo final	9

Manual de usuario para dispositivo espectroscópico

1. INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

1.1 Seguridad eléctrica

Voltaje de funcionamiento	5v
Corriente total (A)	0.2A
Potencia total(W)	0.6w
Peso de carga en el motor (g)	---

- Verificar que el dispositivo se le proporcione un voltaje de alimentación y corriente adecuados para el sistema (5v regulados)
- No conectar el dispositivo a una fuente superior a 5v para evitar daños en los componentes que pueden ser sensibles para los componentes y el microcontrolador.
- Nunca manipule el dispositivo con manos húmedas o con el dispositivo energizado sin antes cubrirlo con la carcasa.
- Asegurarse que las conexiones estén correctamente aisladas para evitar cortocircuitos.

1.2 Temperatura y condiciones ambientales

- Operar en un rango de temperatura entre -20°C hasta 50°C
- Evitar usar el dispositivo en condiciones ambientales húmedas, con mucho polvo o con vapores que puedan llegar a ser corrosivos
- Evitar exponer el dispositivo a fuentes de calor o luz solar directas.

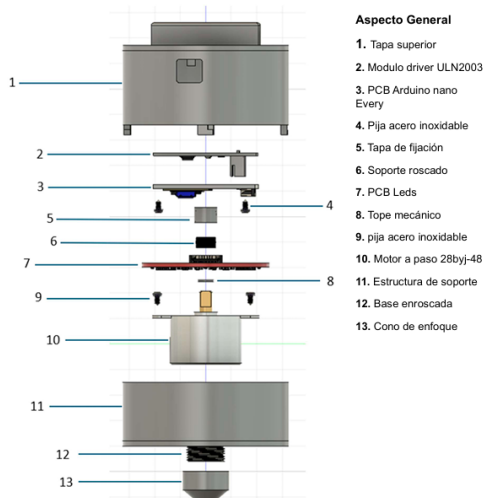
1.3 Riesgos Mecánicos

- Evitar obstruir el movimiento del motor, ya que puede generar sobrecalentamientos o fallos en el driver ULN2003.
- Asegurarse de que la carga del motor no sobrepase los (poner el rango en gramos) para evitar incrementos en la corriente y sobrecalentamientos en el sistema

1.4 Advertencias

- **Riesgo de daño permanente:** en caso de cambio de componentes o cables, evitar conectar mal los pines o aplicar polaridad inversa puede dañar el microcontrolador o los componentes internos del dispositivo.
- **Riesgo en la vista:** Evitar mirar directamente las luces LEDs a corta distancia durante el encendido, especialmente en ambientes oscuros o con poca iluminación.
- **Sobrecalentamiento:** El uso continuo o muy prolongado del dispositivo puede provocar sobrecalentamientos si se excede la carga del motor o si hay obstrucciones que impidan el movimiento libre del motor.
- **Personal Cualificado:** Los niños no deben jugar con el dispositivo, ni hacer mantenimientos ni limpieza sin supervisión, así como de igual forma los niños deben de mantenerse alejados del dispositivo salvo que estén supervisados en todo momento.

2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

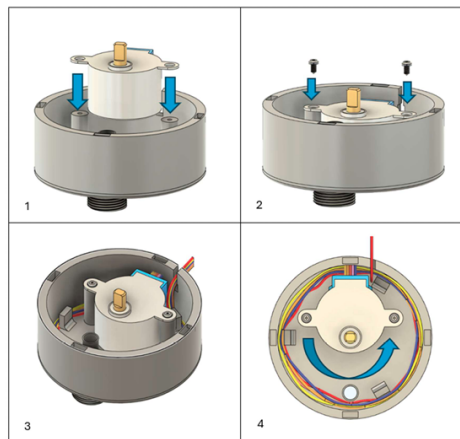


Aspecto General

1. Tapa superior
2. Módulo driver ULN2003
3. PCB Arduino nano Every
4. Pija acero inoxidable
5. Tapa de fijación
6. Soporte roscado
7. PCB Leds
8. Tope mecánico
9. pija acero inoxidable
10. Motor a paso 28BYJ-48
11. Estructura de soporte
12. Base enroscada
13. Cono de enfoque

3. INSTALACIÓN

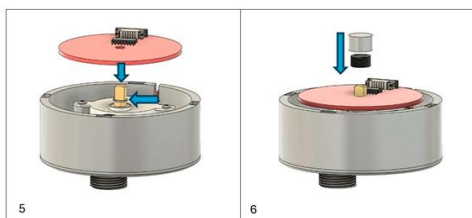
3.1 Fijación de motor



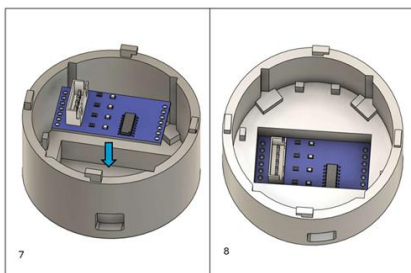
1. Instale el motor paso a paso 28BYJ-48 en la estructura de soporte, alineándolo correctamente con los ejes de fijación de manera que quede centrado.
2. Fije el motor utilizando los tornillos correspondientes, asegurándose de posicionarlos con precisión y ajustarlos firmemente en los ejes de fijación para garantizar una sujeción segura.
3. Organice los cables del motor alrededor de la estructura de soporte, guiándolos a través de las pestañas diseñadas para facilitar una distribución ordenada.
4. Finalmente, dirija el cable excedente hacia el exterior a través de la ranura visible en la estructura de soporte.



3.2 Fijación de la fuente luminosa y módulo



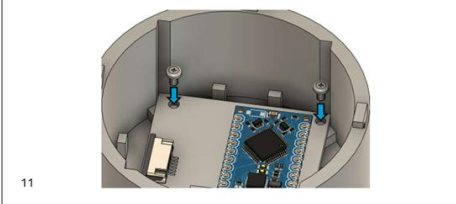
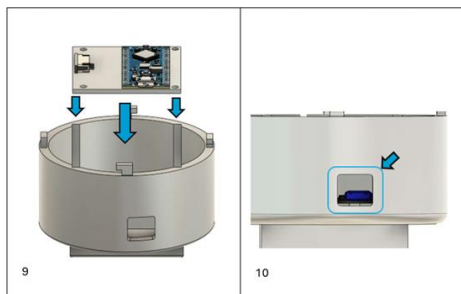
5. Instale el tope mecánico en el eje del motor, asegurándose de que encaje correctamente. A continuación, coloque la PCB de LEDs presionándola cuidadosamente hasta que haga contacto con la base del tope mecánico.
6. Enrosque el soporte roscado en el eje saliente del motor y, posteriormente, coloque la tapa de fijación, ajustándola firmemente para mantener la PCB de LEDs en su lugar, sin holguras.



7. Inserte el módulo driver ULN2003 en la cavidad correspondiente de la tapa superior.

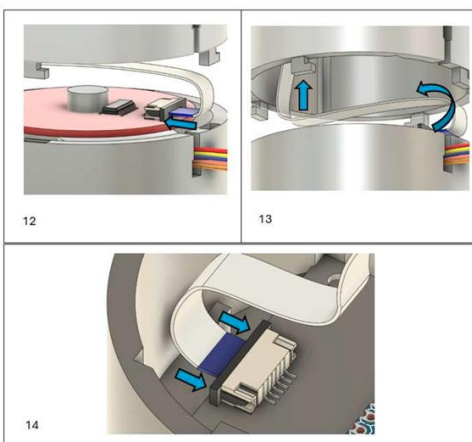
8. Asegúrese de que el módulo driver ULN2003 quede correctamente alineado y firme dentro de la cavidad. Luego, proceda a conectar los cables del motor al módulo.

3.3 Fijación de microcontrolador



9. Inserte la placa PCB Arduino Nano Every en las ranuras designadas, asegurándose de que quede correctamente alineada y firme en su posición.
10. Verifique que el conector USB del microcontrolador esté orientado hacia el mismo lado que la ranura destinada al paso del cable, lo cual facilitará su conexión.
11. Finalmente, fije la placa utilizando tornillos en los orificios correspondientes para asegurar su montaje. Asegúrese también de que los cables del motor estén correctamente acomodados para evitar dobleces o tensiones que puedan causar desconexiones.

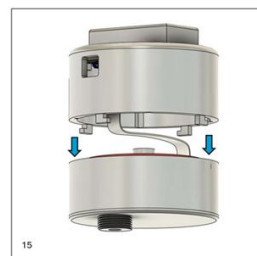
3.4 Conexión de la fuente luminosa al microcontrolador



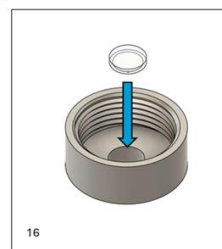
12. Conecte el cable flexible FPC en la entrada del conector de la PCB leds de manera que entre de forma uniforme y asegurándola con la pestaña del conector.
13. Doble el cable flexible de tal manera que pueda recorrer el otro extremo de la tapa superior.
14. Conecte el cable flexible FPC al conector de la PCB Arduino Nano Every asegurándola con la pestaña del conector.

3.5 Ensamble del dispositivo y roscado del cono de enfoque

15. Después de hacer las conexiones, ensamble las pestañas de la Tapa superior con las cavidades que se encuentran en la parte superior de la estructura de soporte.



16. Inserte el lente óptico en el cono de enfoque de tal manera que entre a presión y quede fijo en la cavidad del cono.





3.6 Ensamble de dispositivo final



17. Enrosque el cono de enfoque en la base roscada para fijar en la parte inferior de la estructura de soporte.

18. Una vez ensamblados los componentes está listo para su uso y aplicaciones.