



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

I

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



“Desarrollo de espectrómetro Raman para caracterización de nanomateriales aplicados en sensores agroindustriales”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

Presenta:

Ing. Manuel de Jesús Carrillo Velázquez

Director de tesis:

Dr. Josué Ortiz Medina

Codirector:

Dr. Francisco Javier Godínez García

Durango, Dgo. México, Diciembre, 2024.

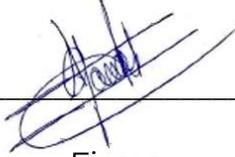


**Desarrollo de espectrómetro Raman para caracterización de
nanomateriales en sensores agroindustriales**

Presenta:

Ing. Manuel de Jesús Carrillo Velázquez

COMITÉ TUTORIAL

<p>Dr. Josué Ortiz Medina</p> <hr/> <p>Director</p>	 <hr/> <p>Firma</p>
<p>Dr. Francisco Javier Godínez García</p> <hr/> <p>Codirector</p>	 <hr/> <p>Firma</p>
<p>M.C. Eduardo Gamero Inda</p> <hr/> <p>Asesor</p>	 <hr/> <p>Firma</p>

Dra. Norma Alicia García Vidaña

**Coordinadora del programa de la
Maestría en ingeniería.**

Durango, Dgo., México

Dr. Francisco Javier Godínez
García

**Jefe de la División de Estudios de
Posgrado e Investigación**

Diciembre de 2024



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **05 / Diciembre / 2024.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 721 / 2024.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. MANUEL DE JESÚS CARRILLO VELÁZQUEZ
No. DE CONTROL G16040344
PRESENTE.

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería** cuyo título es:

“Desarrollo de espectrómetro Raman para caracterización de nanomateriales aplicados en sensores agroindustriales”

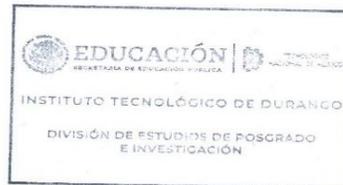
CONTENIDO:

RESUMEN
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
ANEXOS

ATENTAMENTE.

*Excelencia en Educación Tecnológica**
“La Técnica al Servicio de la Patria”

C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG'ammc.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **06 / Diciembre / 2024.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 722 / 2024.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. MANUEL DE JESÚS CARRILLO VELÁZQUEZ
No. DE CONTROL G16040344
PRESENTE.

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

“Desarrollo de espectrómetro Raman para caracterización de nanomateriales aplicados en sensores agroindustriales”

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica®
“La Técnica al Servicio de la Patria”

C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG'ammc.



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango, en el área de Maestría en Ingeniería, bajo la dirección del Dr. Josué Ortiz Medina.

Durante la realización del presente trabajo de investigación de maestría, el autor recibió una beca académica por parte del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (registro 1203179).

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por su generoso apoyo financiero, que hizo posible la realización de esta tesis. Así como a el Instituto Tecnológico de Durango y al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional por proporcionar la infraestructura y recursos para llevar a cabo esta investigación.

Un profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. Su apoyo incondicional y orientación fueron fundamentales en este viaje académico. Primero a mi familia, cuyo amor y apoyo constante han sido mi fuente de fortaleza. A mi director de tesis, Josué Ortiz Medina, por su dedicación, paciencia y guía experta. Sus valiosos comentarios y sugerencias fundamentales en la realización de este trabajo.

Agradezco a los profesores de la Maestría en Ingeniería por su enseñanza inspiradora y su impacto en mi desarrollo académico. A mis compañeros de estudio, quienes han compartido este viaje conmigo, y aportaron ideas valiosas y proporcionando un entorno de apoyo y colaboración.

A mis amigos, quienes han estado a mi lado en buenos y malos momentos, brindándome apoyo emocional y buenos momentos. Gracias a todos los que han formado parte de este proyecto. Su contribución ha dejado una huella imborrable en mi vida académica y personal.

Resumen

La espectroscopía Raman es una técnica con grandes ventajas. Proporciona información muy importante sobre las muestras, de forma que no daña ni altera su estudio. Además, es de un procesamiento rápido y no necesita preparación para su análisis. Este fenómeno funciona a través de la dispersión inelástica de la luz, lo que significa el cambio de color de una fuente de luz monocromática al incidir sobre una muestra. Proporciona información detallada sobre la composición y estructura molecular de los materiales bajo estudio, por lo que es una herramienta muy utilizada en el área de la investigación científica e industrial. El desarrollo de un espectrómetro Raman es un gran reto, ya que es un dispositivo de alta precisión. Los componentes que lo conforma son elementos que necesitan de gran precisión para tener un funcionamiento correcto.

Palabras clave: espectrómetro, nanomateriales, dispersión inelástica.

Abstract

Raman spectroscopy is a technique with great advantages. It provides important information about samples without damaging or altering them. Additionally, it has fast processing and does not require preparation for analysis. This technique works through the inelastic scattering light, which means the change in the color of a monochromatic light source when it strikes a sample. It provides highly detailed information about the composition and molecular structure of the materials under study, making it a widely used tool in scientific and industrial research. The development of a Raman spectrometer is a great challenge, as it is a device requiring high precision. The components that make it up are elements that need great precision to function correctly.

Keywords: *spectrometer, nanomaterials, inelastic scattering.*

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Delimitación del problema	5
1.7 Estado del arte	6
Capítulo 2 Marco Teórico	11
2.1 Espectro electromagnético	11
2.2 Espectro de luz visible.....	13
2.3 Espectroscopía.....	15
2.4 Espectroscopía Raman	16
2.4.1 Dispersión elástica	17
2.4.2 Dispersión inelástica.....	17
2.4.2 Dispersión Raman anti-Stokes.....	18
2.4.3 Dispersión Stokes	19
2.5 Espectrómetro.....	20
2.5.1 Filtros ópticos	21
2.5.2 Fibra óptica	24
2.5.3 Láser	26
2.5.4 Rejilla de difracción.....	30
2.5.5 Sensores ópticos	31
2.5.6 Programación de interfaz en Python.....	34

2.5.7 Objetivo microscópico.....	36
2.5.8 Impresora 3D	38
2.6 Nanotecnología.....	39
Capítulo 3 Materiales y Métodos.....	44
3.1 Componentes del espectrómetro Raman diseñado.....	44
3.1.1 Láser	44
3.1.2 Filtro pasa banda.....	45
3.1.3 Rejilla de difracción.....	46
3.1.4 Filtro pasa-altas.....	46
3.1.5 Sensor de imagen (Cámara).....	47
3.1.6 Objetivo	48
3.1.7 Fibra óptica.....	50
3.1.8 Programa.....	51
3.1.9 Impresora 3D	52
3.1.10 Diseño del set de espectrómetro	54
3.2 Elaboración de películas resistivas a base SWCNTs	55
Capítulo 4 Resultados y Discusión.....	58
4.1 Construcción de espectrómetro Raman.....	58
Aplicación Raman: monitoreo de sensor.....	80
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones.....	84
Referencias.....	88
Apéndice A: Programas desarrollados.	93
Apéndice B: Piezas diseñadas por computadora.	95
Apéndice C: Artículo publicado.	102

Índice de figuras

Figura 1. Detección de enfermedades en plantas con Espectroscopía Raman.	8
Figura 2. Espectro electromagnético.....	12
Figura 3. Onda electromagnética.	13
Figura 4. Longitud de onda del espectro visible.	14
Figura 5. Espectrómetro Raman.	16
Figura 6. Dispersión inelástica de la luz (dispersión Raman).....	18
Figura 7. Dispersion Raman Stokes y anti-Stokes.....	20
Figura 8. Grafica de filtros de banda estrecha.	22
figura 9. Grafica de filtro pasa-bajas (<i>short-pass</i>).	23
Figura 10. Grafica de filtro Pasa-altas (<i>long-pass</i>).	24
Figura 11. Fibra óptica diámetro.....	26
Figura 12. Láser verde 520 nanómetros (nm) Oxlasers.....	28
Figura 13. Duty cycle (tiempo de trabajo).	30
Figura 14. Ilustrativo de funcionamiento interno de sensores CMOS y CCD.....	34
Figura 15. Objetivo para microscopio x100.	37
Figura 16. diferentes tipos de objetivos para microscopio.	38
Figura 17. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura moderna de precisión.....	40
Figura 18. Nanomateriales de acuerdo con su estructura molecular.	43

Figura 19. Láser verde 520 nanómetros (nm) Oxlasers.....	44
Figura 20. Grafica del funcionamiento de un filtro pasa-banda.	45
Figura 21. Cámara de espectrómetro con monóculo.	48
Figura 22. Funcionamiento de objetivo microscópico.....	49
Figura 23. A) fibra óptica multimodo B) fibra óptica monomodo.	51
Figura 24. Impresora 3D utilizada en el desarrollo del espectrómetro Raman.....	53
Figura 25. Materiales utilizados en la dispersión de nanotubos de carbono.....	55
Figura 26. A) PDMS. B) Bomba de vacío.	56
Figura 27. Proceso final de sensor de nanotubos de carbono en PDMS. A) Pistola para dispersión. B) sensores dispersados con nanotubos. C) Sensor.	57
Figura 28. Piezas terminada y listas para impresión.....	59
Figura 29. Configuración de parámetros para impresión.....	60
Figura 30. A) impresora en curso. B) Finalización de impresión de pieza.....	61
Figura 31. Medidas de riel de aluminio.	62
Figura 32. Parte de espectrómetro.	63
Figura 33. diseño de espectrómetro.	64
Figura 34. Controladores A4988.....	65
Figura 35. Diagrama de conexión de motor a pasos nema 17.	66
Figura 36. Sensor de imagen CMOS.	67
Figura 37. Movimiento lineal de rejilla de difracción y filtro pasa-altas con tornillo sin fin.....	68

Figura 38. Variación de intensidad de laser con PWM.	69
Figura 39. Interfaz gráfica conexión de puerto.	70
Figura 40. interfaz gráfica de variables d espectrómetro Raman.	71
Figura 41. Prototipo de espectrómetro Raman. A) Inicio del armado de espectrómetro Raman. B) Diseño terminado.	72
Figura 42. grafica de prueba con luz blanca y filtro pasa altas.	73
Figura 43. Espectros de láser verde y láser rojo.	74
Figura 44. Piezas de nuevo diseño.	75
Figura 45. Componentes ultimo diseño de espectrómetro.	77
Figura 46. Pixeles de espectro.	78
Figura 47. Grafica de corrimiento Raman de programa diseñado en Python.	79
Figura 48. Circuito amplificador.	80
Figura 49. Sensor Sometido a diferentes pruebas.	81
Figura 50. Micro espectrómetro Raman, pruebas de sensor.	82
Figura 51. Corrimientos Raman de pruebas con sensor de PDMS y nanotubos de carbono.	83
Apéndice A figura 1. Codigo de programa en Python.	93
Apéndice A figura 2. Código de programa en Arduino para control de motor e intensidad de láser.	93
Apéndice A figura 3. Código de programa de interfaz gráfica.	94

Apéndice B figura 1. Diseño de porta filtro.....	95
Apéndice B figura 2. Diseño de porta rejilla de difracción.	95
Apéndice B figura 3. Diseño de soporte de monóculo de cámara.	96
Apéndice B figura 4. Diseño de porta cámara parte delantera.	96
Apéndice B figura 5. Diseño de porta cámara parte trasera.	97
Apéndice B figura 6. Diseño de porta láser.	97
Apéndice B figura 7. Medidas de monóculo de cámara.	98
Apéndice B figura 8. Medidas de láser.	98
Apéndice B figura 9. Medidas de cámara.	99
Apéndice B figura 10. Diseño de base para porta filtros y porta fibra óptica.....	99
Apéndice B figura 11. Medidas de riel.	100
Apéndice B figura 12. Diseño de Porta muestra.....	100
Apéndice B figura 13. Diseño de porta fibra óptica.	101
Apéndice B figura 14. Diseño de porta objetivo.....	101
Apéndice C figura 1. Artículo presentado en ICSIMA 2024.....	102
Apéndice C figura 2. Reconocimiento al mejor artículo publicado en la conferencia ICSIMA 2024.	103

Capítulo 1 Introducción

La espectroscopía Raman es una técnica ampliamente utilizada para el análisis molecular y la caracterización de materiales. Ha tenido un gran crecimiento de su uso en la investigación, debido a la gran capacidad para proporcionar información detallada sobre la composición molecular de una muestra con la mínima preparación. Cuenta con grandes ventajas sobre su funcionamiento, ya que no destruye y no contamina la muestra que se analiza. Gracias a esto la espectroscopía Raman es muy prometedora. Esta técnica aprovecha la dispersión inelástica de la luz para analizar las muestras, todo esto es gracias a las vibraciones moleculares que tienen los materiales. La espectroscopía Raman es muy selectiva, cada sustancia química produce un patrón de espectro Raman único, como una huella dactilar única, esto permite identificar de manera precisa compuestos en mezclas homogéneas. Los costos de estos dispositivos pueden variar dependiendo de sus especificaciones y calidad en sus materiales, normalmente los costos son demasiado elevados, pudiendo llegar a los millones de pesos. La realización de un dispositivo con estas características y de bajo costo es un proceso que debe ser estudiado rigurosamente y analizado detalladamente para su desarrollo.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad se estima que entre el 20% y el 40% de cultivos se pierde anualmente debido a enfermedades en las plantas, esto le cuesta a la economía mundial miles de millones de pesos anualmente (Weng et al., 2021). Debido a esto, es necesario crear procesos que reduzcan el porcentaje de pérdida en la producción. Existen técnicas muy favorables para la detección de enfermedades, pesticidas y herbicidas en las cosechas, sin embargo, en ciertas ocasiones su funcionamiento no solo puede ocasionar daños y alteraciones, si no que además, suelen ser costosas y su procesamiento es demasiado lento, ya que toma incluso días en obtener resultados. El desarrollo de dispositivos con un costo más accesible para el estudio de muestras con características similares que las técnicas de alto rendimiento sería de gran ayuda para los agricultores, maestros, estudiantes e investigadores que están interesados en mejorar la producción de alimentos y lograr reducir la gran pérdida que se tiene año con año en la agricultura.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un espectrómetro Raman, que sea utilizado para la caracterización de nanosensores y muestras agroindustriales.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Definir y obtener los componentes básicos para el ensamble de un sistema de espectroscopía Raman.

2. Construir un prototipo de espectrómetro Raman con flexibilidad de operación en la caracterización de muestras agroindustriales.
3. Diseñar y validar un prototipo de interfaz para la adquisición e interpretación de espectros Raman, provenientes del prototipo construido.

1.3 Hipótesis

Es posible desarrollar un sistema flexible de detección de moléculas por medio de la dispersión Raman con componentes electrónicos disponibles en el mercado sin que el costo del dispositivo sea elevado.

1.4 Justificación

En la actualidad, los agentes químicos que se utilizan en el campo pueden contaminar las tierras, afectar la calidad de los productos y por ende afectar a la salud de los humanos. Debido a esto, realizar pruebas en los campos agrícolas es importante para tener un identificado su estado. Es aquí donde la espectroscopía Raman resulta muy útil al ser muy fiable, rápida y no destructora para la realización de pruebas, y puede ayudar de manera significativa a la detección de enfermedades, sustancias químicas, nutrientes, etc. (Feng et al., 2022; Monago-Maraña et al., 2024; Nakajima et al., 2023; Roy & Prasad, 2022; Vallejo-Pérez et al., 2021; Weng et al., 2021). Los equipos que se utilizan para la realización de este tipo de pruebas son muy costosos, ya que los espectrómetros Raman comerciales de marcas reconocidas (como Horiba) tienen un valor de alrededor de \$4,000,000.00 MXN, uno de ellos se utiliza en el Centro de Investigación Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango (CIIDIR). Por eso

construir un espectrómetro Raman de bajo costo sería de gran ayuda para realizar pruebas en el campo. Crear un espectrómetro Raman necesita de varias etapas. Una de las más importantes es el momento de elegir el equipo adecuado, ya que dependiendo de las características de los dispositivos será el resultado. Para ello se realizará una búsqueda que nos ayude a obtener el mejor presupuesto y la mejor calidad en los dispositivos. Además, se pretende crear un prototipo de espectrómetro Raman que nos permita estudiar los diferentes tipos de muestras agroindustriales dentro del programa de la maestría en ingeniería del Instituto Tecnológico de Durango, este prototipo necesitara de varios componentes algunos de ellos son: un láser monocromático, filtros ópticos, sensores de imagen, solo por mencionar algunos de ellos. Para llevar a cabo el prototipo, será necesario hacer pruebas en el dispositivo para tener una información más precisa sobre el funcionamiento del espectrómetro. También, para visualizar los espectros Raman, se pretende crear una interfaz que nos ayude a visualizar el fenómeno de la espectroscopía Raman mediante una pantalla para obtener información más precisa sobre el tipo de muestras que se estudia.

1.5 Delimitación del problema

El presente trabajo de investigación se limita al diseño de un espectrómetro Raman para caracterizar nanomateriales en sensores agroindustriales. Los componentes electrónicos se obtendrán buscando una relación en el precio y la calidad de los componentes. Los dispositivos se buscarán en línea buscando buenas especificaciones y un precio accesible para poder obtener los mejores resultados. Para los componentes mecánicos se tiene el programa de *Solid Works* para diseñar de forma precisa las piezas necesarias, estas serán impresas en una impresora 3D.

1.7 Estado del arte

La descomposición de la luz fue explicada en 1667 por Isaac Newton, empleando prismas de vidrio para difractar un haz de luz blanca dentro de una habitación oscura. Con lo anterior Newton pudo observar la descomposición de la luz, en una forma similar a un arcoíris que descomponía la luz blanca en una serie de diferentes colores de diferentes longitudes de onda. La espectroscopía Raman es una técnica que gracias a sus propiedades es muy utilizada en el área de la investigación científica, y con aplicaciones muy relevantes en una amplia variedad de áreas (Khudoyberdieva et al., 2024). La espectroscopía Raman se basa en el estudio de la dispersión inelástica de la luz monocromática. Este efecto fue descubierto y analizado en 1928 por el físico hindú Chandrasekhara Venkata Raman (Ramos et al., 2013).

Se ha tomado en cuenta la espectroscopía Raman como una técnica no destructiva que permite monitorear la acumulación o producción de metabolitos durante procesos biológicos. La espectroscopía Raman también se logra utilizar para obtener información sobre la distribución y concentración de las moléculas, todo esto se puede realizar en un corto tiempo comparado con otros procedimientos que se utilizan regularmente con químicos que pueden llegar a ser muy destructivos. Con la espectroscopía Raman se puede asignar un como una huella dactilar que podemos obtener de acuerdo con los picos característicos estrechos y agudos, y así obtener de manera exacta la información de la muestra. Debido a que la sección transversal de la dispersión Raman del agua es muy pequeña no existen picos característicos, por lo tanto, se define una gran ventaja en la detección de muestras biológicas vivas. Además, la espectroscopia Raman al no tener contacto físico con las muestras se considera una técnica de análisis no invasiva y no destructiva (Weng et al., 2021).

En la agricultura, la espectroscopía Raman es utilizada para identificar y analizar componentes químicos en las plantas, suelos y productos de origen agrícola, como pueden ser pesticidas, micotoxinas, fertilizantes, etc. los cuales pueden causar graves daños a los seres humanos por su consumo (Abu Bakar & Shapter, 2023; Feng et al., 2022; Kim et al., 2023). En un reporte sobre una planta endémica de la costa de Brasil llamada *Phyllogorgia dilatata*, se realizó un estudio en donde se analizó la planta endémica mediante la técnica de espectroscopía Raman. Se demostró la presencia de compuestos tales como peridinina, diadinoxantina, polienal conjugado y ácido linoleico, también todos estos compuestos fueron confirmados mediante análisis Raman de extractos crudos particionados. Estos análisis demuestran la gran capacidad de esta técnica, ya que estos estudios pueden obtener información sobre la planta mediante el análisis de metabolitos que pueden demostrar el estado de salud e incluso mostrar la adaptabilidad que tiene la planta en su entorno (Maia et al., 2015). Por otra parte, en un estudio realizado en plantas de tomate se utilizó la espectroscopía Raman y el análisis espectral con *machine learning* para la detección temprana de *Clavibacter michiganensis subsp. michiganensis* (Cmm), una enfermedad altamente destructiva, que produce infecciones asintomáticas, lo que aumenta el riesgo de contagio. (Vallejo-Pérez et al., 2021)

En investigaciones recientes se ha demostrado que esta técnica permite detectar cítricos en buen estado y cítricos infectados con *Huanglongbing* (HBL), una plaga de los cítricos causada por bacterias. En la figura 1 se muestran las hojas de un árbol que fue analizada mediante espectroscopía Raman; se tienen 3 diferentes hojas en donde se aplicó esta técnica permitiendo obtener información que demuestra cómo se observa una hoja infectada con HBL, una hoja asintomática y una hoja saludable, comparando los espectros y demostrando las intensidades que se obtienen al realizar espectroscopía Raman.

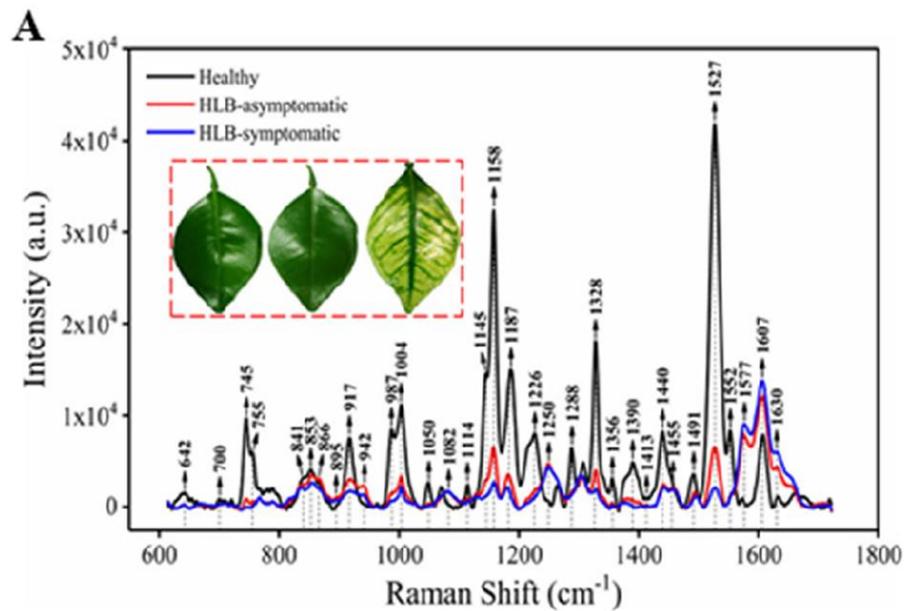


Figura 1. Detección de enfermedades en plantas con Espectroscopía Raman.
Fuente: (Weng et al., 2021).

La espectroscopia Raman incluso es utilizada para desarrollar métodos analíticos de cuantificación de almidón en productos agrícolas. Por ejemplo, se reportó un estudio con plátanos en donde se obtuvieron datos de muestras químicas de azúcar, almidón y fibra. Se tomaron muestras y se encontró una correlación entre las bandas Raman y el contenido de almidón que se obtuvo por medio de análisis químico, por lo tanto, se pueden obtener selectivamente información sobre el almidón en el plátano y aplicar al análisis para la cuantificación de rápida de almidón (Nakajima et al., 2023).

Debido al aumento en la población mundial, es considerable que la agroindustria genere más cantidades de productos para abastecer el aumento en el consumo. La nanotecnología puede

ayudar a resolver este problema, desarrollando altas tecnologías para la producción de alimentos. Tan solo entre el año 2005 al 2011 Estados Unidos invirtió 10 billones de dólares en la investigación de la nanotecnología, una gran cantidad de dinero (Klaine et al., 2012) . En la agroindustria el uso de la nanotecnología y los nanomateriales está comenzando a utilizarse debido a sus grandes ventajas, ya que pueden generar mejores productos con una mayor eficiencia de los elementos utilizados para su producción. Este tipo de tecnología puede considerarse de gran ayuda debido a las ventajas que se obtiene. En la actualidad tecnologías de sensores basados en nanomateriales son estudiados en la investigación de nanotecnología aplicada. El futuro de los nanomateriales es muy prometedor, las investigaciones han demostrado que son de gran ayuda en la creación de nanosensores y agroquímicos que ayudan de manera potencial a la manera de cultivar de manera que se requiere menos cantidades de agua para la obtención de alimentos. Existen nanomateriales como el óxido de grafeno (GO), que funciona como un liberador de forma controlada de zinc (Zn) y cobre (Cu) los cuales permiten una mejor absorción de micronutrientes comparados con sales basadas en sulfatos. Además, los MXenes y el GO podrían ayudar a reducir el consumo de agua con ayuda de agroquímicos especializados, ya que estos nanomateriales prometen lograr liberar agua de forma controlada, permitiendo un consumo controlado y logrando reducir el uso de este elemento (Godínez-García et al., 2023).

El conocimiento que se tiene sobre los nanomateriales y la forma en que se pueden utilizar ha sido de gran relevancia en la actualidad, ya que en áreas de la industria y la investigación han generado un gran impacto económico. En el 2020 con la llegada del virus SARS-CoV-2, grandes compañías farmacéuticas desarrollaron vacunas utilizando nanoliposomas (nanoestructuras lipídicas) como transporte para la secuencia ARNm necesaria para la proteína de pico antigénica (Chávez-Hernández et al., 2024).

Dados los antecedentes mencionados, se considera factible el desarrollar un sistema de espectroscopía Raman, utilizando instrumentos ópticos y electrónicos apropiados, a fin de contar con un sistema de caracterización Raman con flexibilidad suficiente para ser usado en la caracterización de diferentes tipos de muestras, pero con especial énfasis en muestras agroindustriales (tales como muestras de suelos, fertilizantes, fármacos, sustancias contaminantes, etc.) Este sistema Raman sería de bajo costo, con potencial de ser modificado y aplicado en procesos de caracterización química en proyectos de investigación y desarrollo tecnológico en el área agroindustrial.

Capítulo 2 Marco Teórico

La espectroscopía es una técnica utilizada en la ciencia para el estudio de la interacción entre la materia y la radiación electromagnética. Esta técnica cuenta con muchas ventajas entre ellas es que no destruye la muestra analizada y no provoca cambios en la misma (Fernández-Álvarez et al., 2024; Kusnierek et al., 2024; Nakajima et al., 2023; Roy & Prasad, 2022). La espectroscopía Raman analiza la luz emitida, absorbida y dispersada de una muestra, obteniendo propiedades físicas y químicas particulares. Este proyecto se enfocará en el desarrollo de un espectrómetro Raman para caracterizar nanosensores hechos de nanomateriales. Un espectrómetro Raman funciona por el fenómeno de la dispersión inelástica de la luz. Las moléculas, al ser excitadas por un haz de luz, generan rotaciones y vibraciones en sus moléculas, los movimientos que produce la excitación del haz de luz en las moléculas generan transiciones energéticas, lo cual da como resultado una radiación esparcida de una menor frecuencia comparada con la que tienen las moléculas al vibrar, pero también existe la posibilidad de que la molécula en su estado vibracional logre aumentar su energía luminosa, de esta forma tendrá una radiación esparcida mayor a la del haz de luz incidente, por eso el nombre de la dispersión inelástica de la luz, ya que no tiene la misma longitud de onda que la fuente excitante. (Ramos et al., 2013; Schmitt & Popp, 2006)

2.1 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es la distribución de energía que pueden tomar las ondas electromagnéticas, el rango del espectro electromagnético usualmente se representa desde las ondas de radio, que tienen una longitud de onda larga (aproximadamente 1 milímetro hasta 100 kilómetros) hasta los rayos gamma con una longitud de onda muy corta (0.01 nanómetros hasta 0.001 nanómetros). También existen más tipos de ondas electromagnéticas que se encuentran entre

calentar la comida emite rango específico de ondas electromagnéticas con el propósito de calentar comida.

Las ondas electromagnéticas son el resultado de la combinación de los campos eléctricos y campos magnéticos que son transmitidos de manera simultánea sobre un entorno determinado. Estas ondas son creadas por cargas eléctricas en movimiento, y sus campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares entre sí, al igual que la dirección de propagación. Existen diferentes medios por los cuales pueden ser transportadas este tipo de ondas, tales como el agua, el aire, el vacío, etc. (Luque Ordóñez, 2017). En la figura 3 se observa una onda electromagnética en donde se muestra que el campo eléctrico y magnético son perpendiculares y con una misma dirección.

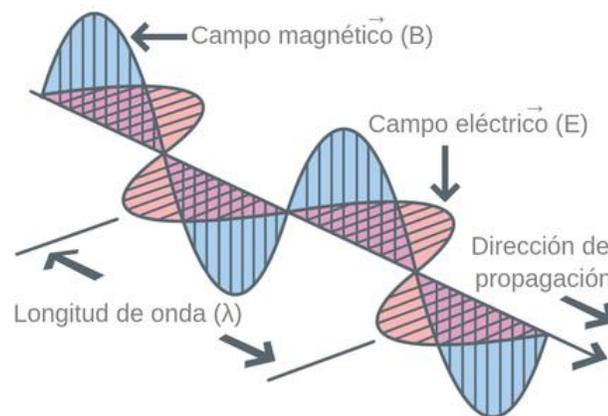


Figura 3. Onda electromagnética.

Fuente: <https://theory.labster.com/es/electromagnetic-waves/>

2.2 Espectro de luz visible

El espectro electromagnético está conformado por un amplio campo de radiación electromagnética. Uno de estos campos es la región del espectro de luz visible. Esta región es muy

importante para los seres humanos, ya que aquí se encuentra todo lo que puede llegar a ser observado por el ojo humano. El espectro de luz visible está conformado por un rango de frecuencia que puede oscilar desde el rango de los 380 nm (nanómetros) hasta los 750 nm, dentro de este rango existen varios tipos de colores, cada uno con diferentes tipos de frecuencia y longitudes de onda (Avila-Camacho et al., 2021).

El espectro de luz visible se compone de varios colores los cuales son el violeta, azul, cian, verde, amarillo, naranja y rojo. Cada uno tiene una longitud de onda específica como se muestra en la figura 4, nos indica los nanómetros que abarca cada color del espectro de luz visible en cuestión de longitud de onda.

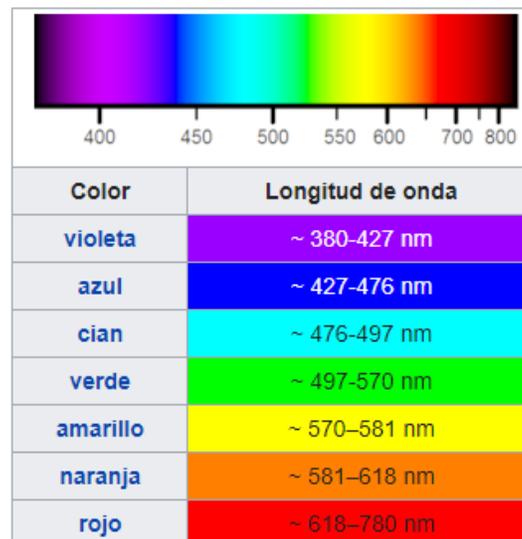


Figura 4. Longitud de onda del espectro visible.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_visible

2.3 Espectroscopía

La espectroscopía, como ya se ha explicado anteriormente, es una técnica capaz de analizar la luz y diferentes formas de radiación electromagnética que son absorbidas, emitidas o dispersadas por las sustancias. Gracias a esto se pueden estudiar e identificar propiedades de los materiales, estructuras moleculares y estructuras atómicas. Cada elemento tiene una forma de interactuar con la radiación electromagnética, debido a esto cada compuesto o elemento tiene un espectro único, que puede ser utilizado como una huella dactilar para reconocerlos y caracterizar diferentes variedades de muestras. Existen diferentes tipos de espectroscopías, las cuales tienen un principio diferente de funcionamiento. Cada una de estas técnicas analizan diferentes tipos de radiación, lo cual es una gran ventaja, ya que la información proporcionada por cada una de estas técnicas es complementaria una de otra.

Una de las técnicas de espectroscopía más utilizadas es la de absorción, la cual mide la cantidad de luz que es absorbida por la muestra en diferentes longitudes de onda. Gracias a esto es capaz de identificar los componentes de una muestra y llegar a determinar las concentraciones. Esta técnica estudia dos tipos diferentes de radiación electromagnética, una de ellas es la radiación ultravioleta visible (UV-Vis) con una longitud de onda de aproximadamente de 200 nm a 800 nm, es utilizada para el análisis de soluciones de compuestos orgánicos e inorgánicos. Otro tipo de radiación es la infrarroja (IR) que se encuentra en el rango de aproximadamente 700 nm a 1 mm. Esta técnica analiza e identifica los grupos funcionales en moléculas orgánicas y para estudiar enlaces químicos y vibraciones moleculares. Además de estas técnicas tan utilizadas en el ámbito científico existe otra técnica llamada Espectroscopía Raman.

2.4 Espectroscopía Raman

El efecto Raman fue descubierto en 1928 por el físico hindú Chandrasekhara Venkata Raman, razón por la cual ganó el premio Nobel de física en 1930, desde entonces ha tenido una gran funcionalidad caracterizando muestras (Li et al., 2023). La espectroscopía Raman es un efecto que se produce cuando una luz monocromática se dispersa de una molécula o átomo, generando un cambio en su longitud de onda, diferente a la de la fuente de excitación. Un inconveniente de la dispersión Raman es que la intensidad de su señal es muy débil (Schmitt & Popp, 2006). Aproximadamente el 0.000001% de la luz cambia de color, este cambio de longitud de onda se conoce como dispersión inelástica de la luz o dispersión Raman. La cual mediante filtros ópticos y sensores de imagen se capta y se procesa para generar un espectro Raman que proporciona información importante sobre la muestra. En la figura 5 se muestra una ilustración de lo que sería un microscopio Raman.

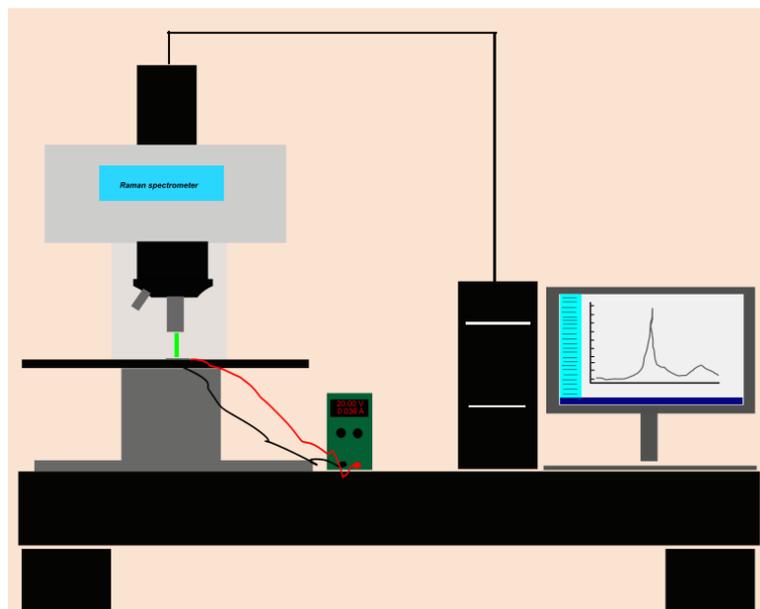


Figura 5. Espectrómetro Raman.
Fuente: Elaboración propia.

La creación de un componente que represento un gran avance en la espectroscopía Raman fue el desarrollo del láser. Este componente permitió el uso de luz totalmente monocromática, lo cual logro que se pudiera utilizar otras fuentes de luz y de filtros en un espectrómetro Raman. (Li et al., 2023).

2.4.1 Dispersión elástica

La dispersión elástica de la luz es un fenómeno sencillo de entender, en este caso la luz al interactuar con un material no tiene cambio de energía de la partícula al medio de dispersión. Lo que significa que la luz que interactúa con la muestra se dispersa con la misma longitud de onda y frecuencia, a este tipo de dispersión también se le conoce como dispersión Rayleigh. Este tipo de fenómeno puede demostrar por que el color del cielo es azul. En aplicaciones científicas este tipo de fenómeno se utiliza para para medir tamaño y concentraciones de gases y aerosoles en la atmosfera terrestre, también es utilizado en para medir concentraciones y tamaños de nanopartículas en soluciones, y se utiliza en más áreas e instrumentos. Es una técnica que complementa a la dispersión inelástica.

2.4.2 Dispersión inelástica

La dispersión inelástica es un fenómeno en el que la energía de una luz interactúa con las moléculas de una sustancia cambia su longitud de onda, lo que resulta en un cambio de color con la luz dispersada. De esta forma cuando los fotones incidentes transfieren parte de su energía a las vibraciones moleculares u otras excitaciones de la muestra, dando como resultado una luz dispersada con una frecuencia diferente a la de la luz incidente. Como anteriormente se mencionó este fenómeno se le conoce como efecto Raman. Este efecto se clasifica en dos secciones: la dispersión Raman Stokes y la dispersión Raman anti-Stokes, en donde la dispersión Raman Stokes

es más intensa, debido a que hay menor cantidad de moléculas en un estado de excitación en comparación con las moléculas en estado fundamental (Li et al., 2023). En figura 6 se muestra el funcionamiento de la dispersión inelástica de la luz, que al incidir en una muestra y reflejarse, esta se puede aumentar o disminuir su energía, lo que resulta en un cambio de su color.

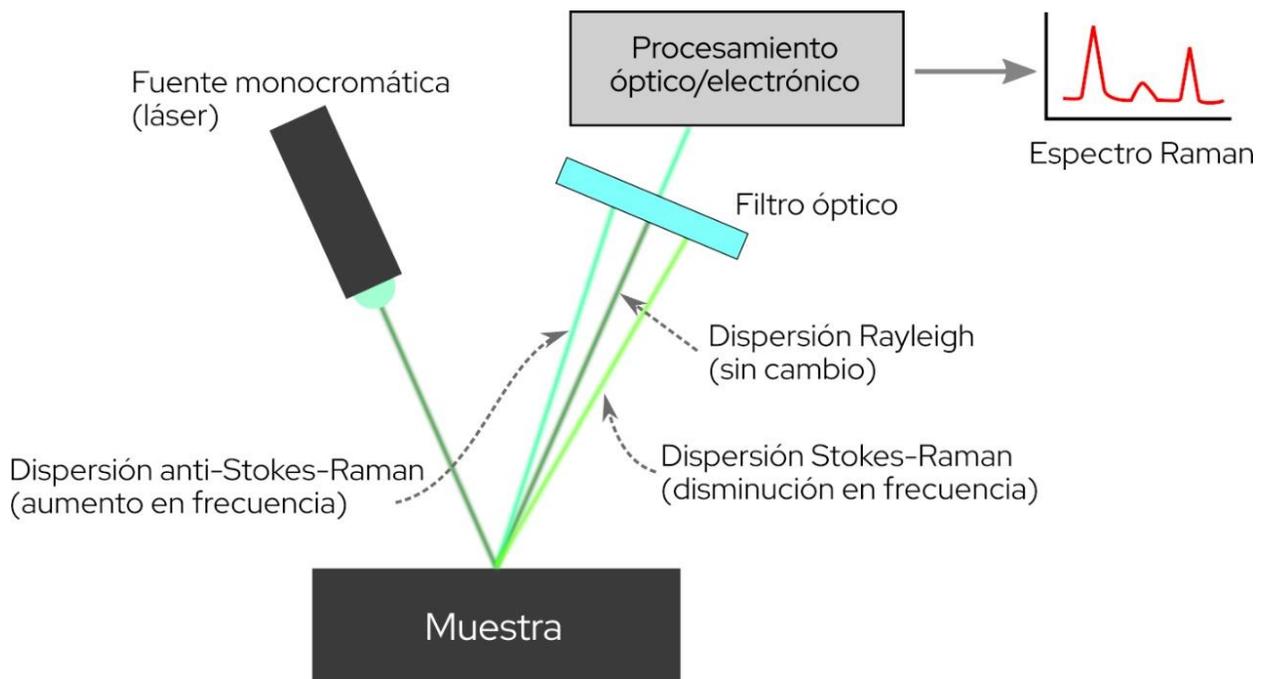


Figura 6. Dispersión inelástica de la luz (dispersión Raman).
Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Dispersión Raman anti-Stokes

La dispersión Raman anti-Stokes es un fenómeno en el cual un fotón incidente, es decir, proveniente de la fuente de excitación, que interactúa con una molécula en un estado vibracional excitado, produce cambios en el fotón dispersado, aumentando su energía y su frecuencia en comparación con la del fotón incidente. El proceso de la dispersión se describe de la siguiente forma:

Una molécula de la muestra se encuentra en un estado vibracional excitado debido a factores externos como lo puede ser la temperatura u otro mecanismo que proporcione energía térmica. Cuando un fotón incidente interactúa con la molécula excitada, origina que cambie a un estado virtual de energía alto, este estado es temporal y solo durante la interacción con el fotón incidente. Cuando la interacción termina la molécula se relaja a un estado virtual de energía más bajo (normalmente estado fundamental), de esta forma se transfiere la energía vibracional de la molécula al fotón dispersado. El fotón dispersado adquiere más energía que el fotón incidente debido a la ganancia de la molécula excitada, debido a esto la frecuencia del fotón dispersado aumenta, y el cambio de color es la respuesta al cambio de frecuencia del fotón.

2.4.3 Dispersión Stokes

La dispersión Raman Stokes es un fenómeno utilizado en la Espectroscopía Raman debido a su funcionamiento, en esta técnica los fotones de la fuente de luz interactúan con las moléculas de una muestra, estos fotones son dispersados de forma inelástica perdiendo parte de su energía. La pérdida de energía es debido a la excitación de las vibraciones moleculares de la muestra, lo que da como resultado un fotón dispersado con menor energía (mayor longitud de onda) con respecto al fotón incidente.

El proceso de la dispersión inelástica Stokes se describe de la siguiente forma: la molécula en un estado inicial se encuentra en su estado vibracional fundamental ($v = 0$), al incidir un fotón del láser sobre la molécula de la muestra, esta se eleva a un estado virtual, este estado se alcanza solo cuando la molécula y el fotón incidente están interactuando, después la molécula se relaja y pasa de un estado vibracional fundamental a un estado vibracional excitado ($v = 1$), el fotón dispersado disminuye su energía y su longitud de onda se hace más larga. De esta forma la energía

que existe entre el fotón incidente y el fotón dispersado corresponde a la energía vibracional de la molécula. En la figura 7 se muestra como una molécula recibe la energía de una fuente de luz monocromática, al reflejarse se transforma en la dispersión Raman Stokes y anti-Stokes.

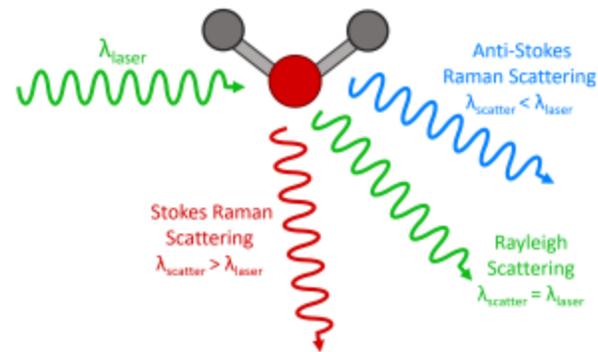


Figura 7. Dispersión Raman Stokes y anti-Stokes.

Fuente: <https://scancotec.com/blog/que-es-la-espectroscopia-raman/>

2.5 Espectrómetro

Un espectrómetro es un dispositivo que permite analizar y medir espectros de frecuencia. Este tipo de dispositivos han sido muy reconocidos y utilizados en la investigación, ya que ayudan a establecer propiedades y composiciones moleculares de los materiales (Bacon et al., 2004). Un espectrómetro funciona de la siguiente manera: separa los componentes de luz en sus diferentes longitudes de onda (color), para después medir y analizar su intensidad luminosa. La variable por medir en este dispositivo suele ser la longitud de onda, que se expresa en submúltiplos del metro. Un espectrómetro necesita de varios componentes como la fuente de luz que interactúa con la muestra, un monocromador o rejilla que descompone la luz en sus diferentes colores y el detector que funcione en términos de longitud de onda. Los espectrómetros son herramientas especiales

que analizan la interacción con la materia, que proporcionan información muy importante de la muestra que se analiza.

2.5.1 Filtros ópticos

Los filtros ópticos son dispositivos que permiten el paso de la luz selectivamente a través de su longitud de onda. Este tipo de dispositivos son muy utilizados en aplicaciones científicas, industriales y comerciales por la ventaja de cómo se puede llegar a manipular la luz. Debido al gran campo de aplicación que tienen estos dispositivos existen una gran variedad de filtros.

2.5.1.1 Filtros de absorción

Este componente es fabricado por materiales que como su nombre lo indica, absorbe ciertas longitudes de onda, y a su vez bloquea las demás. Como ejemplo podemos tener una lente roja, al momento de observar a través de la lente, esta absorbe las longitudes de luz azul y verde y solo permite el paso de las longitudes de onda de color rojo. Este tipo de filtros es muy utilizado en la óptica para pacientes con baja visión, ya que ellos al no poder observar de manera eficiente la luz azul de longitud de onda más corta, causa problemas de visión como el deslumbramiento, ya que la luz azul en pacientes con baja visión disminuye el contraste, lo que significa que al momento de tener más luz el paciente tiene menos visión.

2.5.1.2 Filtros de interferencia

Los filtros de interferencia son componentes que han sido diseñados para seleccionar la luz de manera específica en sus diferentes longitudes de onda, y por el mismo efecto discriminar las todas las demás. El funcionamiento de los filtros de interferencia es a través de varias capas dieléctricas situadas sobre un sustrato, de esta manera las capas crean interferencias constructivas y destructivas que permiten el paso de cierta longitud de onda y el rechazo de las demás. Estos

filtros son de gran ayuda en dispositivos que utilizan técnicas de espectroscopia, microscopia, astronomía, comunicaciones ópticas, etc. Dentro de esta clase de filtros se dividen varias subramas que se explicarán a continuación. En la figura 8 se muestra el funcionamiento de diferentes filtros de banda estrecha, donde solo permiten el paso de un rango pequeño de longitudes de onda.

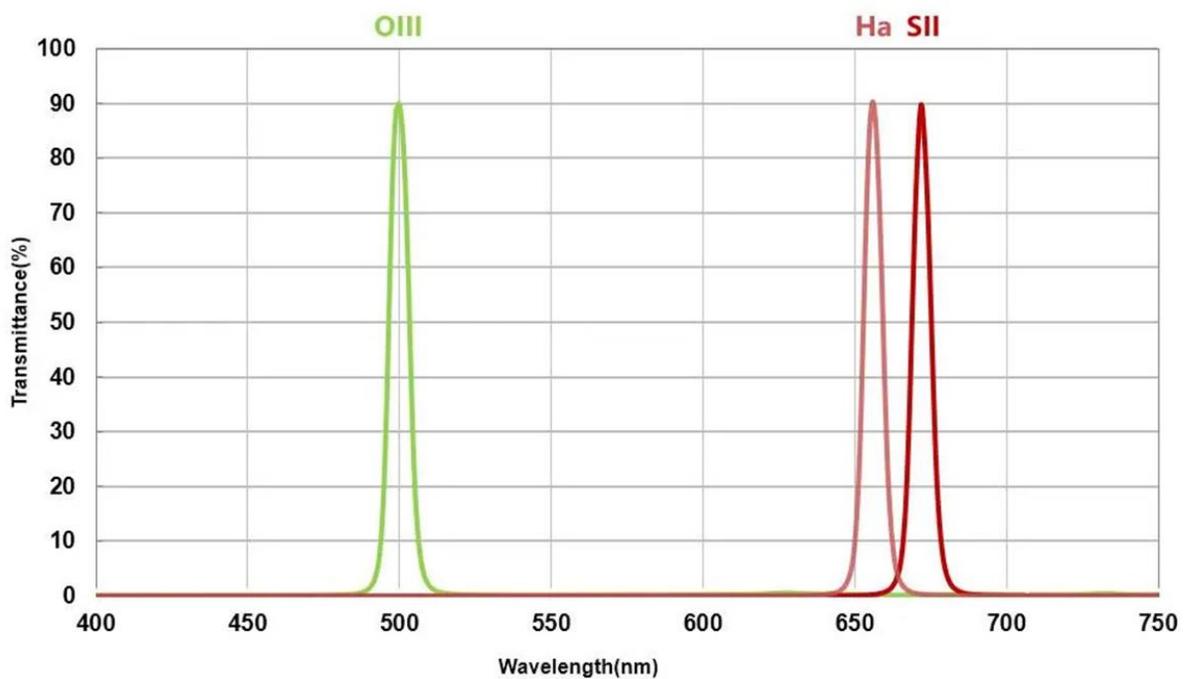


Figura 8. Grafica de filtros de banda estrecha.

Fuente: <https://skyshop.mx/producto/zwo-filtros-de-band-estrecha-nb-7nm-1-25/>

Filtros de banda estrecha: se utilizan para seleccionar un rango muy estrecho de longitudes de onda, estas se utilizan para aislar una línea espectral muy específica.

Filtros de banda ancha: Permiten el paso de un rango de longitudes de onda más amplio. Son utilizados en trabajos donde se necesite una mayor transmisión de luz.

Filtros de longitud de onda corta (*short-pass*): Este tipo de filtros bloquea el paso de longitudes de onda más cortas. Por ejemplo, en un filtro de longitud de onda corta de 570 nm, este permite el paso de los colores como el verde azul y violeta que se encuentran por debajo del valor de 570 nm. En la figura 9 se muestra gráficamente el funcionamiento de un filtro de longitud de onda corta.

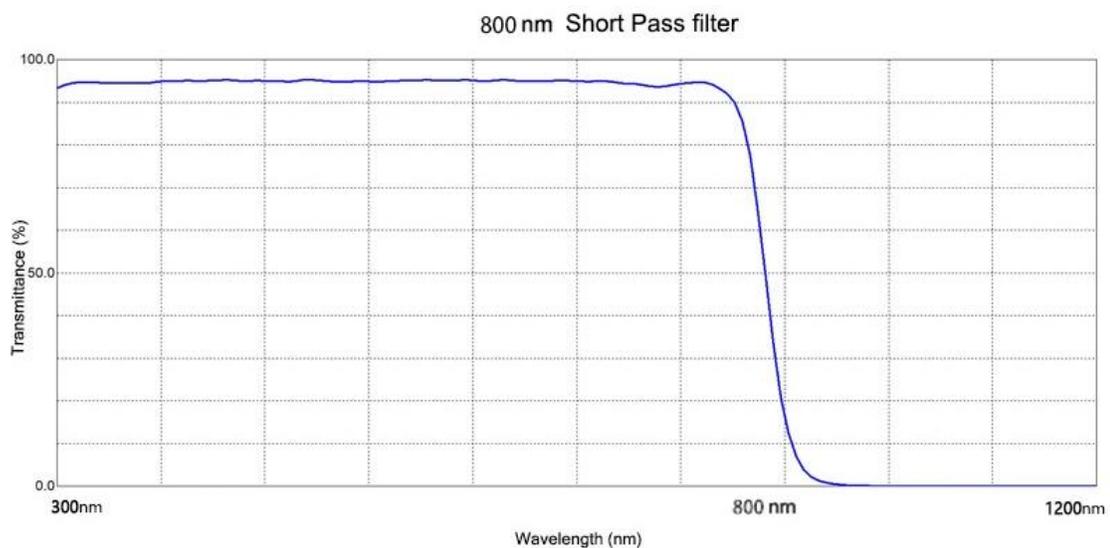


figura 9. Grafica de filtro pasa-bajas (*short-pass*).

Fuente: https://es.made-in-china.com/co_optolongoptics/product_Shortpass-Filter-Short-Pass-Optical-Filter-Short-Pass-Filter-800-Nm_ysosnnisig.html

Filtros de longitud de onda larga (*long-pass*): El filtro de longitud de onda larga es un tipo de filtro el cual realiza lo opuesto al filtro de longitud de onda corto, por lo tanto, este tipo de filtro permite el paso de las longitudes de onda más largas. Por ejemplo, en un filtro de longitud de onda larga de 570 nm, este filtro permite el paso de la luz con una longitud de onda más larga, por lo tanto, colores como el amarillo, naranja y rojo son lo que podrían atravesar este filtro y bloquearía

los demás colores que son de longitudes de onda más bajas. En la figura 10 se muestra el funcionamiento de un filtro de longitud de onda larga

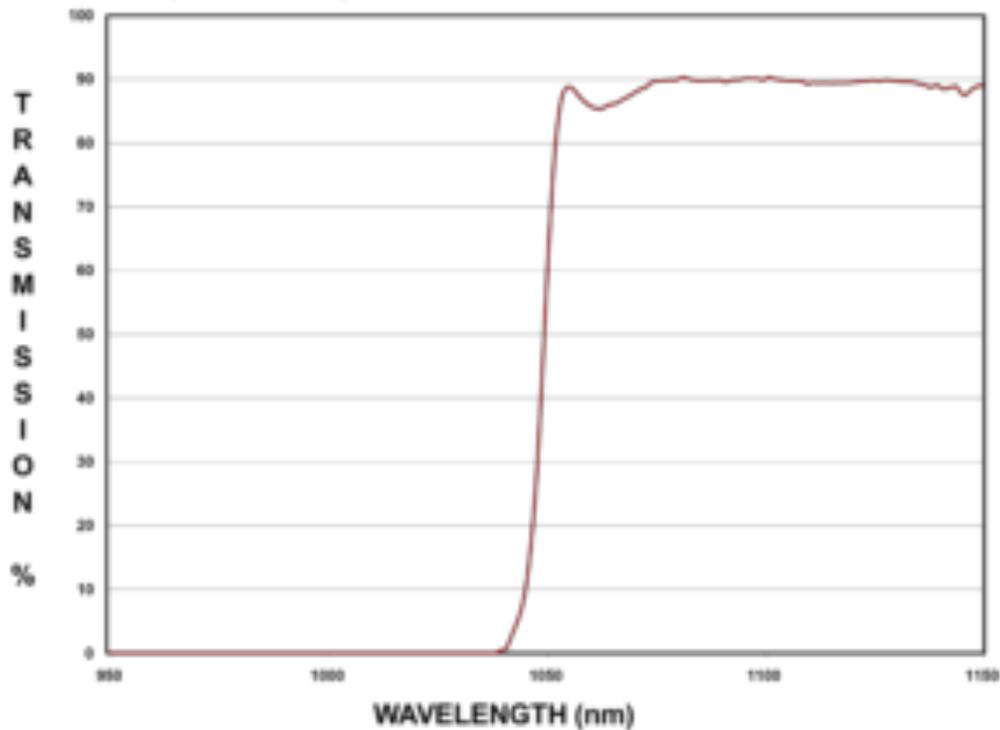


Figura 10. Grafica de filtro Pasa-altas (*long-pass*).

Fuente: <https://www.optometrics.com/product-category/optical-filters/longpass-filters/>

2.5.2 Fibra óptica

La fibra óptica es una tecnología que utiliza filamentos de vidrio o plástico con un grosor del tamaño de un cabello, para transmitir datos. Es un conductor de luz, toda la luz que entra en la fibra óptica se propaga a la máxima velocidad posible a través del cable. La fibra óptica está

compuesta por un núcleo (*core*), un revestimiento y una capa de recubrimiento exterior, el tamaño del núcleo depende del tipo de fibra óptica con el que se esté trabajando. El revestimiento y el núcleo son hechos de distintos materiales, la capa de revestimiento genera el proceso de transmisión guiando la luz que vaya a través del núcleo y no salga de él. La capa de recubrimiento exterior está fabricada normalmente con polímeros, su función es el de proteger el núcleo y el revestimiento de daños y proporcionar al cable propiedades mecánicas.

2.5.2.1 Fibra óptica monomodo

La fibra óptica monomodo (por sus siglas en inglés SMF, *Single Mode Fiber*) es una clase de fibra óptica que tiene como propósito transmitir la luz por un solo camino. Este tipo de fibra funciona gracias a un núcleo extremadamente pequeño (8-10 micrómetros), lo cual permite un solo modo de propagación de la luz sin rebotar internamente.

La fibra monomodo tiene un núcleo pequeño que permite un solo modo de propagación de la luz, una alta capacidad para transmitir datos en forma de luz debido a su capacidad de un solo modo lo cual permite una mayor capacidad de transmisión de datos a mayores distancias.

2.5.2.2 Fibra óptica multimodo

La fibra óptica multimodo (por sus siglas en inglés *Multi Mode Fiber*, MMF) es una clase de fibra óptica que logra que la luz se transmita a través de varios modos o múltiples caminos. Este tipo de fibra es relativamente más grande que la fibra monomodo, debido a esto la luz logra propagarse en múltiples modos o trayectoria dentro del núcleo, lo cual se logra solo con un núcleo relativamente grande.

La fibra óptica multimodo tiene como características principales un núcleo mayor que la fibra monomodo. Para tener múltiples modos de transmisión de la luz, esta es más adecuada para

transmitir datos a distancias más cortas, debido a que la señal se distorsiona a distancias largas. En la figura 11 se muestra la diferencia del tamaño de núcleos de la fibra óptica multimodo y la monomodo.

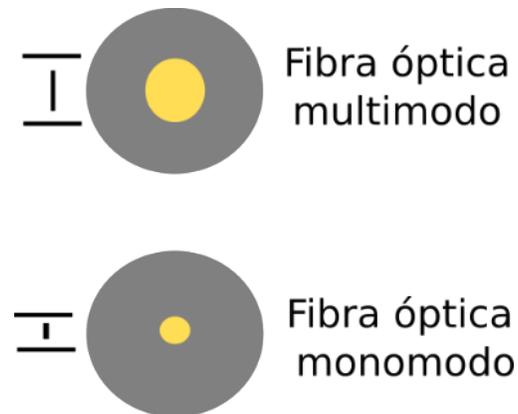


Figura 11. Fibra óptica diámetro
Fuente: Elaboración propia

2.5.3 Láser

La espectroscopía Raman funciona mediante un dispositivo emisor de luz de un solo color, este es uno de los componentes más parte importante del espectrómetro Raman (Fernández-Álvarez et al., 2024). Para del dispositivo se debe de considerar una serie de factores para elegir de manera correcta la fuente de luz, esta debe de ser monocromática, lo que significa que debe emitir una sola longitud de onda. El dispositivo de fuente de excitación debe tener ciertas características esenciales para poder utilizarse en el proyecto. En el pasado no existían fuentes de luz monocromáticas, por dicha razón era más difícil trabajar con un espectrómetro. Con el avance

de la tecnología se fueron creando fuentes de luz, o como se le conoce popularmente como LED (diodo emisor de luz).

El láser es un dispositivo emisor de luz que pasa por un proceso de amplificación óptica emisión estimulada de radiación electromagnética. Las principales características de un láser son: una longitud de onda específica por este motivo la luz que emite el láser suele llamarse monocromática (correspondiente a un solo color), son extremadamente direccionales por lo que diverge muy poco en distancias muy grandes y tienen una gran intensidad concentrando grandes cantidades de energía en pequeño espacio, creando un haz de alta intensidad.

El funcionamiento de este dispositivo se debe a varios factores: el medio de ganancia que es material que amplifica la luz mediante emisión estimulada, la fuente de energía que excita el medio de ganancia, la cavidad óptica que permita la amplificación de la luz al reflejarse de un lado a otro, la emisión estimulada es cuando los átomos se excitan en el medio de ganancia con fotones de una fuente de luz externa para producir fotones adicionales que amplifican la luz dentro de la cavidad óptica. En la figura 12 se muestra el láser utilizado para el desarrollo del espectrómetro.



**Figura 12. Láser verde 520 nanómetros (nm) OxLasers.
Fuente: datos de fabricante**

Para utilizar el láser en muestras más frágiles y evitar daños, se necesita disminuir la intensidad de luminosidad del láser. Para controlar la potencia del láser se utilizan módulos de lógica de transistor a transistor (TTL, por sus siglas en inglés) en conjunto con un modulador de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) que proporciona un control sobre la salida de un pulso modulado, para tener un control sobre la potencia del láser y de esta forma evitar daños que perjudiquen la muestra.

2.5.3.1 Modulo TTL

El módulo TTL es una tecnología que utiliza señales digitales para controlar salidas moduladas. Los módulos TTL reciben en la entada valores específicos, normalmente 0 volts para un nivel lógico bajo y 5v para un nivel lógico alto. Estos niveles de voltaje corresponden de la siguiente manera:

- Nivel bajo (lógica 0): normalmente entre 0 V y 0.8 V.
- Nivel alto (lógica 1): normalmente entre 2 V y 5 V.

Los módulos TTL como características tienen tiempos de conmutación rápidos, lo que lo hace muy adecuados para aplicaciones de alta velocidad, además tienen buena tolerancia al ruido, por lo que los hace más fiables.

2.5.3.2 PWM (Pulse Width Modulation)

La modulación por ancho de pulso es un tipo de señal de voltaje utilizada para controlar la cantidad de energía utilizada en una carga. Es una técnica utilizada en la electrónica que ayuda a controlar la potencias a través de la variación de ancho de pulsos de una señal digital. De esta forma se permite controlar la energía entregada a un dispositivo sin variar la cantidad de voltaje. Este tipo de señal se genera mediante una serie de pulsos digitales en donde se varían los tiempos altos (encendido) y los tiempos bajos (apagado). El tiempo total del ciclo se le conoce como periodo es la suma del tiempo bajo y del tiempo alto. El ciclo de trabajo de un PWM es un concepto fundamental que se refiere al momento en el que una señal digital se encuentra en un estado alto (activado). En la figura 13 se muestra el ciclo de trabajo de 3 diferentes operaciones en la que se muestran los diferentes porcentajes de un ciclo de trabajo con respecto a los tiempos activos de la señal digital.

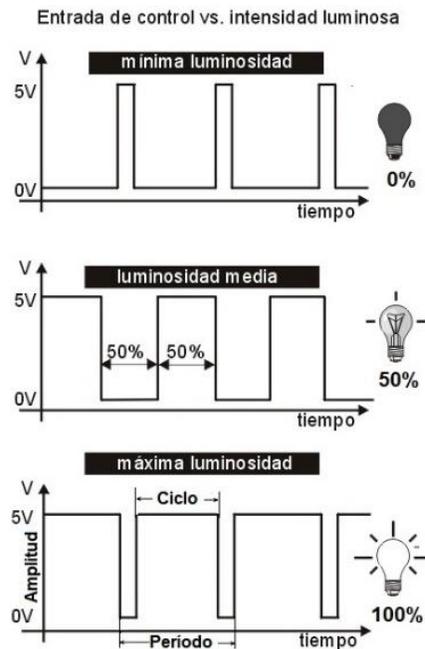


Figura 13. Duty cycle (tiempo de trabajo).

Fuente: <https://www.shoptronica.com/curiosidades-tutoriales-y-gadgets/4517-que-es-pwm-y-como-funciona-0689593953254.html>

2.5.4 Rejilla de difracción

Una rejilla de difracción es un dispositivo óptico que divide y difracta la luz en varias direcciones y en sus componentes espectrales. Está compuesta de una serie de ranuras paralelas que se encuentran finamente separadas, grabadas o impresas en materiales transparentes o reflectantes. Este dispositivo interfiere con la luz que incide sobre ella y separa la luz en diferentes longitudes de onda. La resolución de este dispositivo depende de la cantidad de líneas o ranuras que por longitud tenga, entre más líneas tenga se obtiene una mayor resolución espectral.

2.5.5 Sensores ópticos

Los sensores ópticos son dispositivos que detectan cambios en la radiación electromagnética del espectro de luz visible y en algunos casos en otros rangos del espectro electromagnético. Estos sensores se encargan de transformar la señal de luz en una señal eléctrica. Un sensor óptico está compuesto por componentes sensibles a la luz. Estos generan una corriente eléctrica al momento de detectar la luz proporcional a la intensidad de esta. Existen diversos tipos de sensores ópticos, como los fotodiodos, fototransistores y sensores de imagen. Estos últimos son importantes en la espectroscopía ya que de ellos depende la detección de las señales de luz dentro del dispositivo. Debido a que algunas veces las señales de luz son muy mínimas, estos sensores están creados para poder captar esos cambios de luz. Dentro de los sensores de imagen existen los sensores de imagen CCD (*Charge-Coupled Device*) y los sensores de imagen CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) los cuales están hechos de silicio. También existen los sensores InGaAs (Arseniuro de Indo y Galio) y MCT (Telururo de Mercurio y Cadmio) estos sensores son conocidos por ser utilizados en rangos del infrarrojo. Los sensores de silicio CCD y CMOS tienen una resolución mayor comparado con los sensores InGaAs y MCT, además de ser menos costosos (Triolo, 2024).

2.5.5.1 Sensor de imagen CCD (*Charge-Coupled Device*)

Los sensores CCD son un tipo de sensor que es muy utilizado en cámaras profesionales digitales y otros dispositivos de captura de imagen. Los sensores CCD están compuestos por una matriz de pequeños fotodiodos, que llevan el nombre de píxel. Los píxeles que capturan la luz y a través de unos circuitos dentro de la cámara, la convierten en una señal eléctrica, estos fotodiodos

convierten los fotones en electrones. Cuando termina la exposición, la carga acumulada en cada píxel es transferida de manera secuencial a una serie de condensadores, este proceso es preciso y gracias a este se logra obtener una imagen de alta calidad. Para convertir la imagen a señal digital la carga de cada píxel se transforma en una señal de voltaje, esta señal se digitaliza, se procesa y se convierte en la imagen capturada.

Una de las principales características de estos sensores es su alta calidad de imagen, ya que no generan tanto ruido y tienen una alta fidelidad en la reproducción del color, gracias a la forma de transferencia de cargas que ocurre dentro del sensor.

Así como tienen ventajas en su calidad de imagen, también cuentan con pequeñas desventajas, ya que el consumo de energía de este tipo de sensores es mayor comparado con los sensores CMOS y el costo de fabricación también es mayor por lo que son más caros que los sensores CMOS.

2.5.5.2 Sensor de imagen CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor).

Los sensores de imagen del tipo CMOS son sensores utilizados en cámaras digitales y otros dispositivos, estos son un tipo de sensor de imagen que convierten la luz (fotones) en señales eléctricas para crear imágenes digitales. El nombre de este dispositivo se debe al uso de transistores complementarios, los cuales son los transistores de metal-óxido-semiconductor de tipo n (nMOS, por sus siglas en inglés) y los transistores de metal-óxido-semiconductor de tipo p (pMOS, por sus siglas en inglés) que funcionan de manera complementaria para crear compuertas lógicas que pueden utilizarse en los circuitos. La tecnología metal-Oxido-semiconductor (MOS, por sus siglas en inglés) se refiere a la estructura de fabricación de estos transistores de metal y óxido de silicio, ya que normalmente un transistor semiconductor está fabricado con silicio.

Este tipo de sensores está construido por una matriz de píxeles, la cual está construida con fotodiodos que detectan la luz y un conjunto de transistores que amplifican y procesan la señal eléctrica obtenida por los fotodiodos. También tomar en cuenta que cada pixel funciona de manera independiente, por lo tanto, su funcionamiento no es uniforme, por lo que pueden llegar a producir más ruido en las imágenes con respecto a sus similares CCD. En la figura 14 (parte derecha) se encuentra el sensor CMOS, en donde se observa que, al incidir la luz en los fotodiodos, estos emiten un electrón, los cuales, son amplificados individualmente y de igual forma mandados a la señal de salida. En cambio, en el sensor CCD (parte izquierda de la figura 14) que se observa que al incidir la luz en los fotodiodos emiten un electrón. Cada columna de fotodiodos tiene un registro vertical, que están unidos por un registro horizontal, en donde llegan las señales de los registros verticales. A través del registro horizontal se mandan todas las cargas a un solo amplificador y después a la señal de salida. Por este motivo se dice que en los sensores CMOS los pixeles se trabajan individualmente.

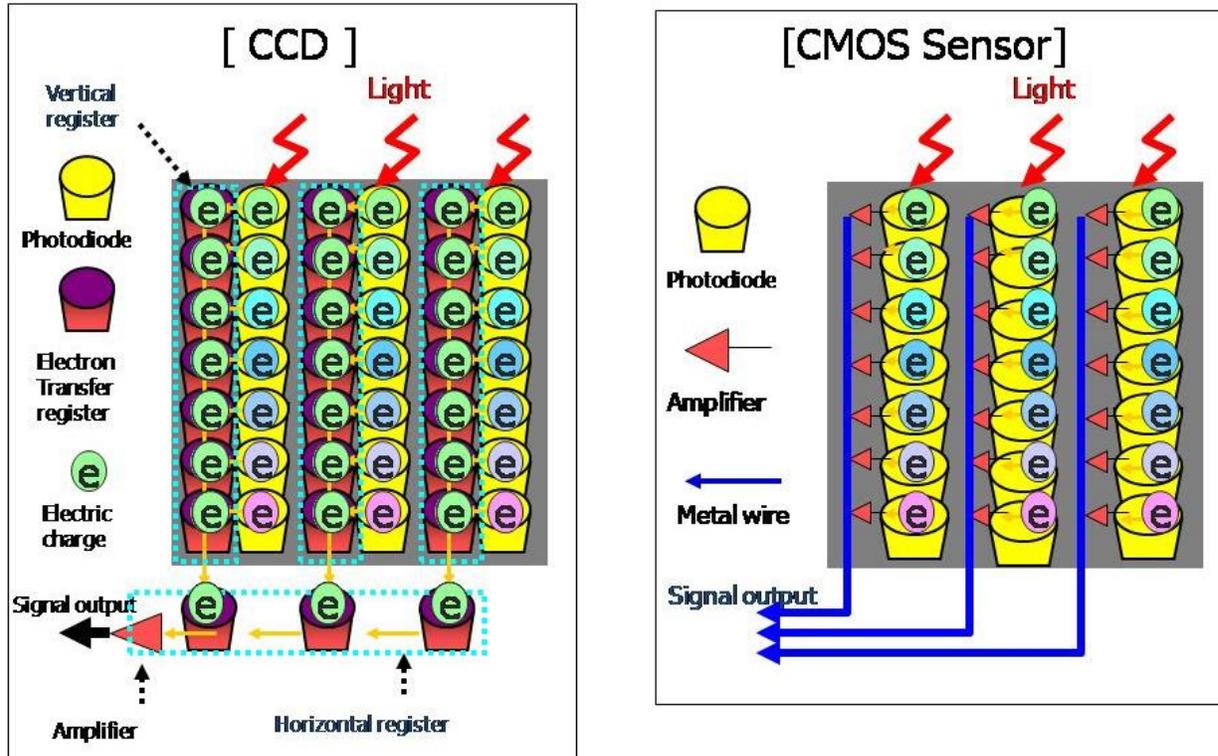


Figura 14. Ilustrativo de funcionamiento interno de sensores CMOS y CCD.

Fuente: <https://www.institutoimago.com/blog/tecnologia-de-los-sensores-fotograficos/1488>

2.5.6 Programación de interfaz en Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel y de propósito general, ha ganado prestigio por su simplicidad y legibilidad. Este lenguaje fue creado por Guido van Russom y lanzado en 1991. Python es un lenguaje de código abierto, lo que significa que no es necesario tener una licencia para poder utilizarlo, además el código fuente que son las instrucciones escritas por los programadores está disponible. Gracias a esto la comunidad de Python ha tenido grandes avances en cuestión de programación, ya que tiene la colaboración de muchos programadores alrededor del mundo, pues la participación de esta persona permite contribuir al desarrollo del

software, revisando el código, reportando errores, creando nuevas funcionalidades o proponiendo mejoras.

Para el desarrollo del programa del espectrómetro Raman es necesario utilizar librerías que permitan acceder a los datos obtenidos del sensor de la cámara digital, ya que al obtener esta información se puede interpretar de manera eficaz y transformarla en lo que conocemos como espectros, que son las gráficas que muestran picos de intensidad de luz y en corrimiento Raman que es el cambio de longitud de onda con respecto a la longitud de onda original, en este caso del láser verde. Existen librerías en Python que permiten el uso de los datos obtenidos de la cámara, una de ellas es *OpenCV* (Pulli et al., 2012) que es una biblioteca de código abierto, que es utilizada en ramas como visión artificial y procesamiento de imágenes. Debido a su funcionalidad es de gran ayuda en aplicaciones que involucran análisis y procesamiento de imágenes. Para el caso del espectrómetro Raman es necesario detectar los cambios de longitudes de onda con respecto al láser, con la ayuda de los filtros ópticos y la rejilla de difracción el cambio en longitudes de onda debe ser detectado por el sensor de imagen.

Existen otras librerías tales como *Pyserial* (pyserial, 2020), que permite la comunicación en el puerto serial para enviar y recibir datos, logrando controlar los datos del puerto a través del computador. Esta librería es de gran utilidad para poder interactuar con microcontroladores, módulos de comunicación y otros dispositivos electrónicos. Por otra parte, la librería *Numpy* (Harris et al., 2020) es una gran herramienta que permite realizar cálculos, proporciona la ventaja de trabajar con matrices y una gran colección de funciones matemáticas. La librería *Matplotlib* (Hunter, 2007) que nos permite la visualización de datos a través de gráficos generados con una variedad de formatos y estilos. Por último, la librería *TKinter* (Roseman, 2020) es utilizada para crear interfaces gráficas de usuarios, es una gran herramienta que nos permite crear aplicaciones

de escritorio con muchos componentes visuales interactivos como ventanas, botones, cuadros de texto, menús, etc.

2.5.7 Objetivo microscópico

La dispersión de la luz va en todas direcciones, una forma de concentrar la luz y evitar pérdidas es con un objetivo para microscopio. Este es un componente muy importante, ya que determinan la calidad de la imagen. Un objetivo para microscopio tiene ciertas características a tomar en cuenta al momento de elegir el correcto, uno de ellos, es la magnificación, la cual es la capacidad que tiene el objetivo para ampliar el tamaño de la imagen de una muestra. Hay distintas magnificaciones como de 4x, 10x, 40x, 100x, etc. Otras características principales de este componente es la apertura numérica que es la medida de la capacidad que tiene el objetivo para captar la luz, por lo que un objetivo con una apertura con un valor grande tiene la capacidad de distinguir más detalles. La apertura numérica describe la capacidad de captar luz y definir detalles de la muestra, para ello se utiliza la siguiente formula:

$$NA = n \cdot \sin(\theta)$$

Donde:

n = índice de refracción del medio (aire, agua o aceite de inmersión).

θ = ángulo de medio-apertura del cono de luz que entra al objetivo.

De esta manera se obtiene la apertura numérica de un objetivo para microscopio. En la figura 15 se observa el objetivo utilizado en el proyecto.



Figura 15. Objetivo para microscopio x100.

Fuente: <https://skyshop.mercadoshops.com.mx/MLM-947030586-objetivo-acromatico-para-microscopio-100x-quasar- JM#&gid=1&pid=3>

Dentro de la microscopia existen diferentes tipos de objetivos para los microscopios. Cada uno de estos cuenta con diferentes características y especificaciones que permiten realizar tareas específicas, como por ejemplo los objetivos acromáticos que se utilizan en la educación y zonas que no requieren alta precisión, los objetivos apocromáticos que son requeridos para captar imágenes de alta precisión, los objetivos semi-apocromáticos estos son ideales para técnicas de microscopia de fluorescencia, los objetivos plan-acromáticos que proporcionan un campo de visión plano y son utilizados en campos como la histología, los objetivos plan-apocromáticos los cuales son de gran calidad y brindan un campo de visión plano, también se encuentran los objetivos de inmersión en aceite los cuales pueden mejorar la calidad de la imagen al tener una gota de aceite entre el objetivo y la muestra, los objetivos de inmersión en agua cumplen la misma función que los objetivos de inmersión en aceite y en este caso se utiliza agua, etc. En la siguiente imagen se observa un ejemplo de los diferentes objetivos para microscopio. En la figura 16 se muestran diferentes tipos de objetivos utilizados en microscopios.



Figura 16. diferentes tipos de objetivos para microscopio.

Fuente: https://www.microscope.healthcare.nikon.com/es_AMS/products/optics/cfi-e-plan-achromat-series

2.5.8 Impresora 3D

Las impresoras 3D son dispositivos capaces de crear objetos tridimensionales mediante modelos digitales. Este tipo de tecnología utiliza una serie de materiales y dispositivos para construir capa por capa objetos diseñados, siguiendo un conjunto de instrucciones en código G.

Existen diferentes tipos de tecnologías de impresión que se mencionaran a continuación:

- *Fused deposition modeling (FDM)*: este tipo de tecnología es de las más reconocidas dentro del mundo de la impresión 3D, este tipo de tecnología utiliza materiales de filamentos termoplásticos como el PLA (ácido poli láctico) O ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) los cuales pasan a través de una boquilla a una alta temperatura para modelar el material.

La boquilla se encarga de posicionar el filamento en capas sucesivas sobre una plataforma caliente, que permite que el material se solidifique y se adhiera para formar el diseño de la impresión.

- *Stereolithography* (SLA): esta técnica emplea la luz ultravioleta para solidificar las capas de una resina líquida fotosensible. De esta manera el láser actúa trazando los contornos de cada capa en la resina, permitiendo el estado de solidificación.
- *Selective laser sintering* (SLS): El SLS utiliza materiales en polvo, algunos de ellos son poliamida aluminio, nylon, o acero, estos materiales son fundidos con una laser de alta potencia que permite la fusión de estos materiales, creando las capas necesarias para construir el objeto diseñado.

Existe varios tipos de técnicas de impresión, las anteriores son una de las técnicas más utilizadas en el mundo de la impresión 3D (mint, 2024).

2.6 Nanotecnología

La nanotecnología estudia los materiales a escalas moleculares, para ser más exactos del tamaño de los nanómetros, generalmente de dimensiones menor a los 100 nanómetros. Gracias al tamaño de estos materiales, se obtienen propiedades únicas y excepcionales en comparación con los materiales que utilizamos comúnmente. La nanotecnología tiene varias aplicaciones en la ciencia y la tecnología, y la ventaja es que puede resolver problemáticas que enfrenta la sociedad, además de generar innovación tecnológica y científica (Gómez Garzón, 2018). Uno de los sectores con gran interés en la nanotecnología es en la agricultura (Zhu et al., 2022), ya que es uno de los campos con más crecimiento en la nano-investigación debido a la necesidad de generar mayor cantidad y calidad de los alimentos para satisfacer las necesidades alimenticias de la población

mundial. Además, el uso de agroquímicos puede mejorar la calidad de los alimentos, pero también afecta de manera negativa el suelo. La nanotecnología puede ayudar a mejorar los procesos, creando sensores que detecten enfermedades, combatiendo patógenos en los cultivos, reduciendo al mínimo la pérdida de nutrientes en fertilizantes que absorben los cultivos del suelo. Además de crear nanopesticidas, nanofertilizantes, etc. que reduzcan la contaminación en el suelo y mejoren la productividad. (Godínez-García et al., 2023; Lira-Saldivar et al., 2018; Zhu et al., 2022). En la figura 17 se observa los campos de la industria agrícola donde está la nanotecnología.

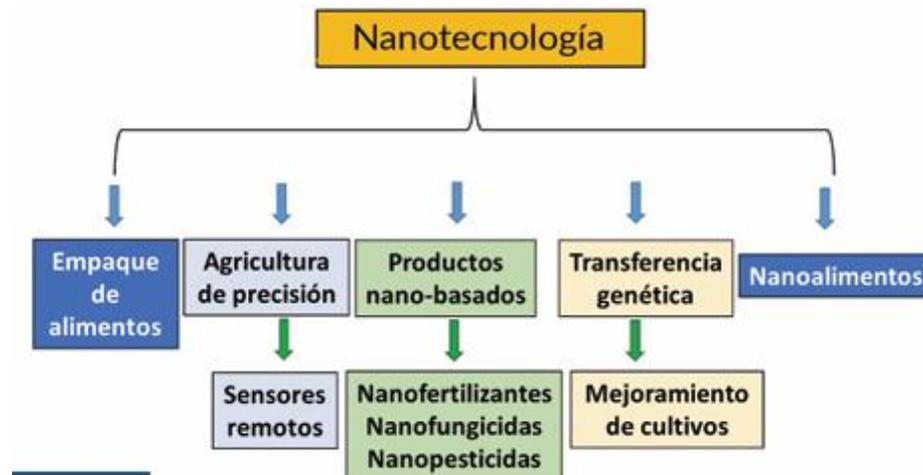


Figura 17. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura moderna de precisión.

Fuente: (Lira-Saldivar et al., 2018).

2.4.1 Nanomateriales

Los nanomateriales son materiales con alguna dimensión entre 1 – 100 nm. Debido a su pequeño tamaño, se han estudiado y se ha llegado a comprobar que tienen propiedades físicas, químicas y biológicas muy interesantes, tanto así que comparados con sus mismos materiales a

granel tienen efectos muy distintos, todo esto por los efectos cuánticos y a una mejor interacción con los átomos de la materia por el tamaño que tienen. Existen diversos tipos de nanomateriales, para tener una mejor visualización de estos pueden clasificarse según su composición química en varias categorías, esto con el fin de comprender mejor sus propiedades y aplicaciones.

Las nanopartículas son materiales de escalas nanométricas. Estas partículas son metálicas, semiconductoras, poliméricas, cerámicas o materiales compuestos. Este tipo de nanomateriales tienen excelentes propiedades y aplicaciones en muchas áreas como en la agricultura, biotecnología, electrónica, medio ambiente, etc. (Godínez-García et al., 2023)

Otro tipo de nanomaterial son los nanotubos de carbono (CNTs, por sus siglas en inglés) es un material con cilindros huecos de átomos de carbono, están hechos de una o varias capas de grafeno enrollados, y pueden tener excelentes propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas debido a su estructura. Existen 2 tipos de CNTs, los primeros son los nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs, por sus siglas en inglés) que es una sola capa de grafeno enrollada en forma de cilindro y los nanotubos de carbono de pared múltiple (por sus siglas en inglés MWCNTs) que son varias capas de grafeno enrolladas concéntricamente.

Los nanomateriales comparten diferentes estructuras moleculares, gracias a esto se pueden clasificar de acuerdo con sus estructuras, a continuación, se muestran las estructuras y tipo de nanomateriales que corresponden a cada una:

- Nanomateriales 0D (cero dimensiones):
 - Fullerenos
 - Partículas coloidales
 - Puntos cuánticos

- Nanopartículas de Au (oro) y Ag (plata)
- Nanomateriales 1D (una dimensión):
 - Nanocables y nanofibras
 - Nanotubos
 - Nanovarillas
 - Fibras poliméricas
- Nanomateriales 2D (dos dimensiones):
 - Nanolaminas (grafeno, disulfuro de molibdeno)
 - Nanosheets (capas delgadas de materiales como óxidos metálicos)
- Nanomateriales 3D (tres dimensiones):
 - Nanocompuestos poliméricos
 - Nanopartículas core-shell (nanopartículas con núcleo de un material recubierto por otro)
 - Nanocatalizadores

En la siguiente figura se muestra una ilustración de nanomateriales de acuerdo con su estructura molecular.

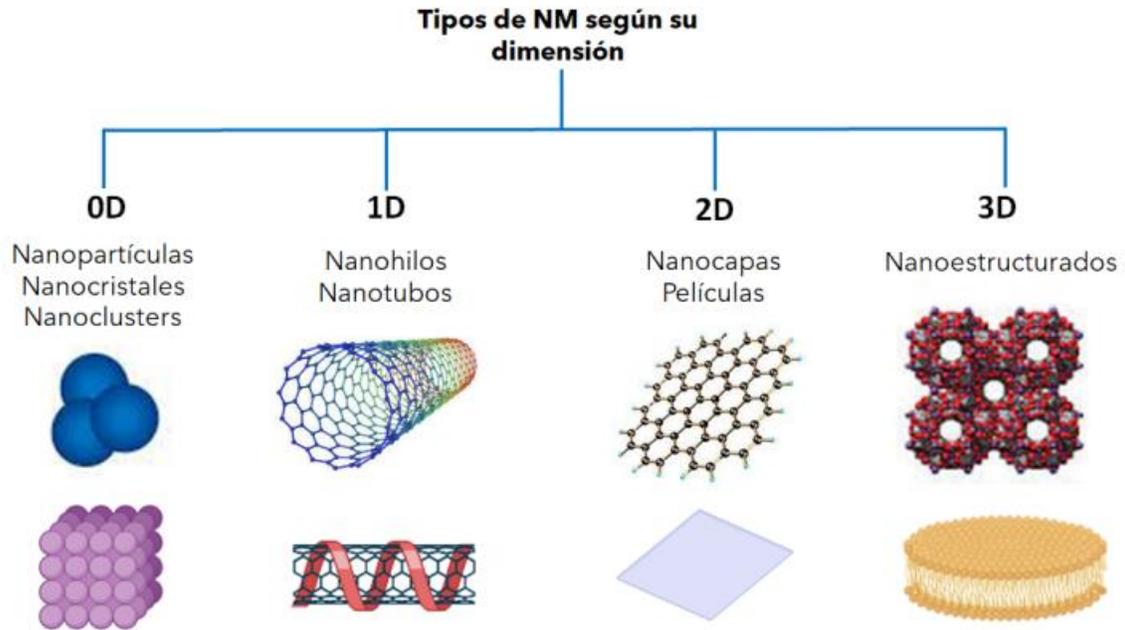


Figura 18. Nanomateriales de acuerdo con su estructura molecular.
Fuente: <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v22n1/E0242.htm>

Capítulo 3 Materiales y Métodos

3.1 Componentes del espectrómetro Raman diseñado

3.1.1 Láser

El láser es un componente fundamental de un espectrómetro Raman, ya que es el encargado de proporcionar la luz del instrumento que es la base principal de su funcionamiento. Existen diferentes tipos de láser en el mercado, para el desarrollo del espectrómetro Raman se utilizó un láser verde con una longitud de onda de 520 nm, el cual cuenta con una potencia de 50 mW, y un módulo TTL que nos permite variar la intensidad del láser mediante un PWM. Se eligió un láser verde para poder trabajar con un mayor rango de longitudes de onda sobre el espectro de luz visible y en categoría de dispersión Raman Stokes. El láser de 520 nm fue utilizado para el desarrollo del espectrómetro. En la figura 19 se observa el láser de la marca Oxlasers utilizado para el desarrollo del espectrómetro.



**Figura 19. Láser verde 520 nanómetros (nm) Oxlasers.
Fuente: Datos de fabricante.**

3.1.2 Filtro pasa banda

Para el uso de un filtro pasa-banda que es el encargado de permitir el paso de un rango de longitud de onda definido, se tomó en cuenta el tipo de laser y su longitud de onda. Esto es para tener una luz monocromática más exacta y poder hacer las mediciones de forma más segura. Este tipo de filtros son de gran importancia y muy utilizados en una gran variedad de aplicaciones que necesiten un rango específico de luz, mientras se eliminan las longitudes de ondas que no estén dentro del rango. En la **figura 20** se muestra una gráfica que muestra el funcionamiento de un filtro pasa-banda, en la imagen se muestra el *central wavelength* que es la longitud de onda central en este caso que el filtro tiene como características de su diseño, también se tiene en la anchura a media altura (por sus siglas en inglés *Full Width at Half Maximum*, FWHM) que nos muestra la anchura del espectro que llega a tener el filtro en este caso de 10 nm, lo que significa que dentro de los 520 nm como longitud de onda central la luz puede atravesar desde 515 nm hasta 525 nm, indicando la pureza de la luz que atraviesa el filtro pasa-banda.

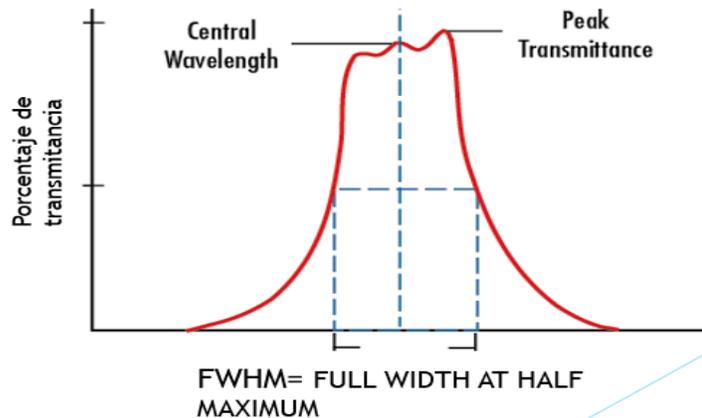


Figura 20. Grafica del funcionamiento de un filtro pasa-banda.
Fuente: Datos de fabricante.

Para comprobar el funcionamiento correcto del filtro pasa-banda se realizaron pruebas con luz blanca, el filtro pasa-banda corresponde a una longitud central de 520 nm y un FWHM de 10 nm. Con una lampara led se hizo incidir la luz para atravesar el filtro, lo que debe permitir solo el paso de la luz en longitudes de onda de 515 nm – 525 nm, en este caso el color verde.

3.1.3 Rejilla de difracción

La rejilla de difracción nos permite descomponer la luz en las longitudes de onda del espectro de luz visible, que son todos los colores que podemos observar los humanos. Para corroborar el funcionamiento correcto de la rejilla de difracción se utilizó una lampara la luz blanca, dentro de la cual por teoría se encuentran todos los colores o las longitudes del espectro de luz visible. Esta rejilla de difracción está hecha con un substrato de sílice fundida lo cual lo hace muy puro y adecuada para este tipo de actividad, cuenta con una densidad de ranuras de 1200 l/mm lo cual nos recuerda la resolución espectral de la rejilla de difracción.

Se puede observar que la rejilla de difracción descompone la luz blanca en el espectro de luz visible de una manera óptima. El ángulo de difracción de la rejilla es de 36.9° para poder observar el espectro de luz visible de una mejor manera se coloca la rejilla de difracción el espectro se verá reflejado en un ángulo de 36.9° .

3.1.4 Filtro pasa-altas

Un filtro óptico pasa altas permite el paso de longitudes de onda más con respecto a un cierto valor de corte, bloqueando de esta manera las longitudes de onda más cortas. Este tipo de filtro son muy utilizados en diversas aplicaciones donde es necesario estudiar o identificar cierto

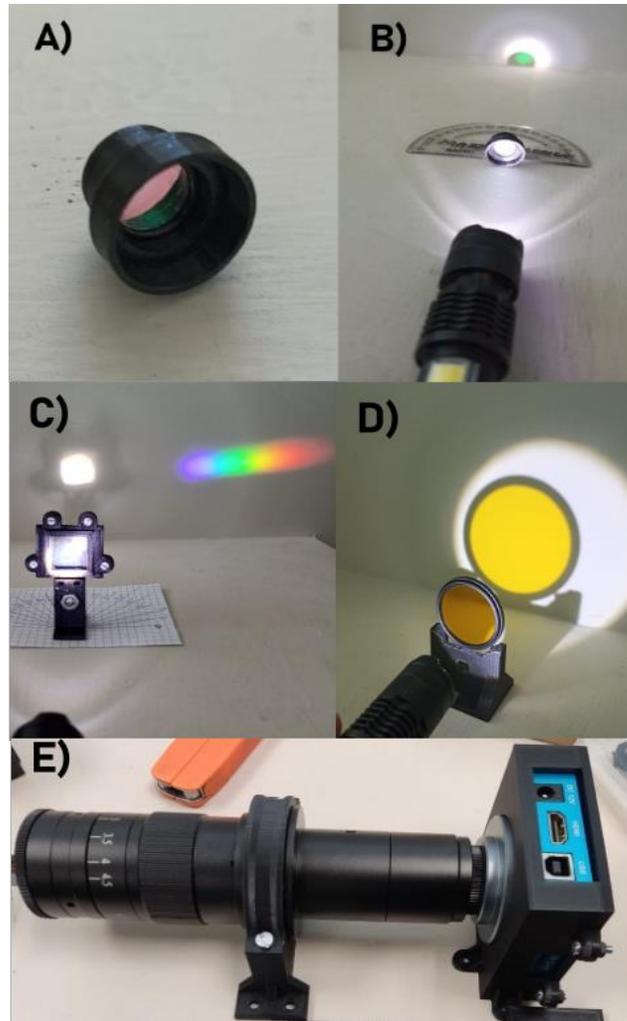
tipo de luz. Para comprobar su funcionamiento se realizó la siguiente prueba: con una lámpara de luz blanca se hizo incidir sobre el filtro para observar la luz que atraviesa el filtro.

El filtro pasa altas tiene como característica una longitud de onda de corte de 530nm lo cual permite el paso de la luz de longitudes de onda mayores de 530 nm, dentro de los cuales el color amarillo, naranja y rojo pueden ser observados.

3.1.5 Sensor de imagen (Cámara)

El sensor de imagen es uno de los dispositivos más importantes del espectrómetro, es el encargado de capturar la señal, en este caso la luz dispersada que se obtiene de la muestra. Para el desarrollo del espectrómetro se ha utilizado una cámara microscópica, el tipo de sensor que tenemos en la cámara es Panasonic CMOS de 48 megapíxeles, con un tamaño de píxel de $1.335 \mu\text{m} \times 1.335 \mu\text{m}$ y tiene una resolución de 1920x1080p a 60 FPS (Frames por segundo). El microscopio cuenta con un aumento digital y con un monóculo que permite un aumento mecánico adicional.

En la figura 21 A) se muestra el filtro pasa-banda. En la figura 21 B) se muestra el funcionamiento del filtro pasa-banda, este solo deja pasar las longitudes de onda correspondientes al color verde. En la figura 21 C) se muestra la rejilla de difracción utilizada para el desarrollo del espectrómetro. En la figura 21D) se muestra la prueba del filtro pasa altas y el resultado obtenido. En la figura 21 E) se observa el cámara utilizado con el monóculo utilizado para el desarrollo del espectrómetro.



**Figura 21. A) Filtro pasa-banda. B) Funcionamiento de filtro pasa-banda. C) Rejilla de difracción. D) Filtro pasa-altas. D) Cámara de espectrómetro con monóculo.
Fuente: Elaboración propia.**

3.1.6 Objetivo

Al momento de utilizar laser de un espectrómetro Raman la función principal es la de interactuar con la muestra, los fotones que inciden sobre la muestra interactúan con las moléculas y después se reflejan en todas direcciones. Para que la luz que se refleja de la muestra sea captada y esta no se pierda con el medio, se utilizó un objetivo de microscopio. El deseado funcionamiento

de este componente es el de captar toda la luz posible reflejada de la muestra para evitar pérdidas de la luz reflejada, de esta manera se espera obtener más intensidad en la dispersión Raman, ya que la luz que se perdía ahora será transportada por medio de una fibra óptica. En la figura 26 se observa como la luz que pasa por el objetivo se enfoca hasta el punto de llegar a ser muy pequeño, se pretende que esta luz que se enfoca sea del tamaño de la fibra óptica para que se transporte lo más eficientemente posible. Se observa como en la figura 22 A) se observa la luz saliendo del objetivo más pequeña, en comparación con la figura 22 B) y 22 C).

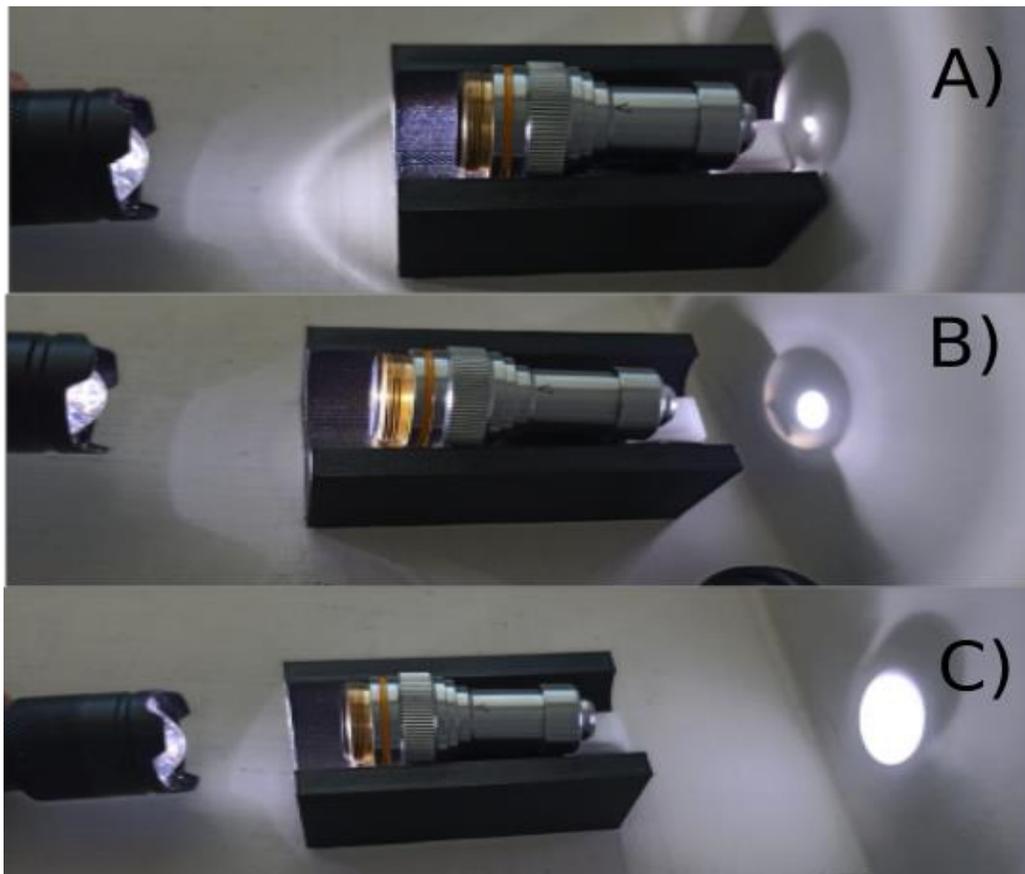
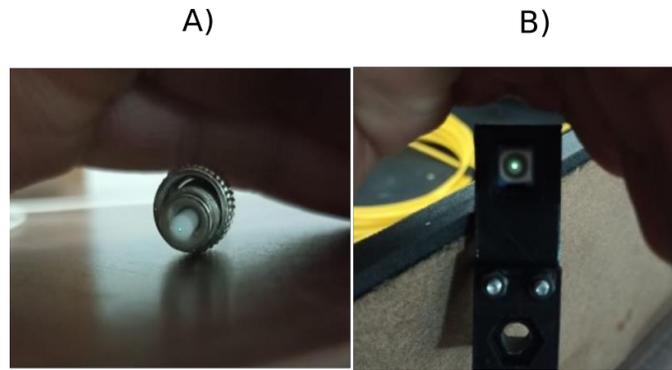


Figura 22. Funcionamiento de objetivo microscópico.
Fuente: Elaboración propia.

Para poder enfocar de manera correcta esta luz sobre la fibra óptica existen acopladores que permiten conectar la fibra óptica con el objetivo, para que de esta forma la luz sea enfocada de manera óptima y no tener perdida de la luz al momento de transportarla, ya que es importante captar todo lo más posible la luz Raman, debido a que esta luz solo cambia de color 1 de 1000000 de fotones lo que es el 0.0000001% de la luz que se refleja, como es una cantidad muy pequeña, se debe tener en cuenta cualquier detalle para poder captar de la mejor manera la luz dispersada.

3.1.7 Fibra óptica

La fibra óptica es un componente importante de gran ayuda para este proyecto, el funcionamiento de la fibra óptica es el de transportar la luz que entra por el núcleo, hasta el otro extremo del cable, gracias a sus características la luz que entre por el núcleo sale con la misma intensidad. Para el desarrollo del espectrómetro Raman de hicieron pruebas con 2 tipos de fibra óptica, la fibra óptica monomodo y la fibra óptica multimodo. Se realizaron pruebas con las fibras ópticas, donde se hacía incidir sobre esta el láser de 520 nm (color verde). Esta prueba se realizó de varios ángulos y se buscó la mejor manera de captar la luz que emite el láser. En la siguiente imagen se observa la intensidad a la salida de cada fibra óptica del tipo multimodo en el inciso a) y en el inciso b) se observa la fibra óptica.



**Figura 23. A) fibra óptica multimodo B) fibra óptica monomodo.
Fuente: elaboración propia.**

3.1.8 Programa

El diseño del programa consiste en la detección de la dispersión Raman. Esta es la última fase del diseño del espectrómetro, es aquí donde los espectros de luz visible analizan los datos sobre las muestras estudiadas. Para la detección de estos espectros el sensor de la cámara debe detectarlos y posteriormente mandar la información obtenida a la computadora, la cual se encargará de procesar la señal y convertirla a en una gráfica, que mostrará los resultados en términos de intensidad y corrimiento Raman.

Para el desarrollo del programa se debe acceder a la información que se detecta en el sensor, esta información se puede obtener con una librería de acceso abierto (en su versión para Python), llamada *OpenCV*, la cual se utiliza para el procesamiento de imágenes, en este caso será para analizar espectros. La librería se encargará de obtener información sobre la intensidad de cada píxel de la cámara, después la cual almacena la información en una matriz utilizando la librería *Numpy*, la cual almacena los valores de la intensidad de los pixeles, de esta forma se pretende obtener la intensidad de la luz obtenida.

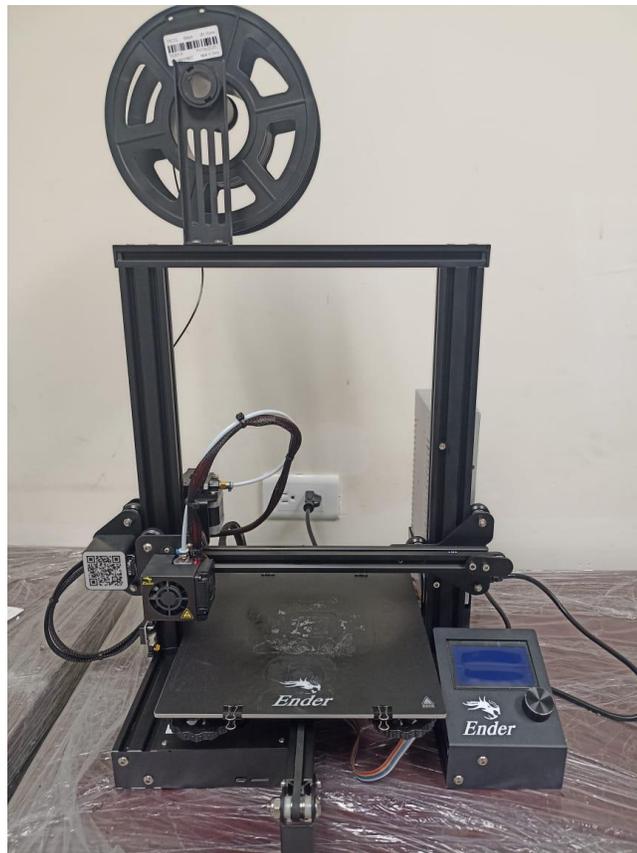
Se necesita calibrar la imagen con respecto a las longitudes de onda del espectro visible, siguiendo este concepto se utilizaron dos laser de color verde y de color rojo, el cual en las especificaciones del fabricante el láser verde es de 520 nm y un láser rojo con una longitud de onda de 650 nm. De esta forma se cuentan los pixeles entre estos valores y así poder detectar un cambio de acuerdo los colores que detecta el sensor de imagen. Por último, para poder observar los datos de manera grafica se utilizará la librería *Matplotlib*, esta se encargará de plotear los datos de manera que pueda observarse un espectro, para plotear los datos el eje de las x será el corrimiento Raman, y en el eje de las y será la intensidad de la luz captada.

3.1.9 Impresora 3D

La impresora 3D Ender 3 es una impresora que cuenta con un tamaño de 220 x 220 x 250 mm y una precisión de impresión de 0.1 mm, cuenta con una boquilla con un tamaño de 0.4mm la cual puede cambiarse por boquillas más pequeñas de 0.3 y de 0.2 mm, la temperatura máxima a la que puede calentar la boquilla según las especificaciones de la maquina es de 255°C, también tiene la capacidad de imprimir filamento de 1.75mm y puede utilizar materiales para impresión 3D como ABS, PLS, TPU, etc. Esta impresora cuenta con una cama caliente la cual puede llegar hasta temperaturas de 100° C, llega a alcanzar esta temperatura en un tiempo de 5 minutos. Esta impresora 3D es compatible con softwares como Ultimaker cura, Repetier y Simplify 3D.

El diseño de este tipo de piezas es relacionado a su funcionamiento, para el caso de la porta muestra se pretende evitar la interacción con luz exterior dando paso a la luz monocromática del láser, poner la muestra de manera correcta y captar la luz de manera óptima. También están los demás componentes como el objetivo, la fibra óptica, la rejilla de difracción, la cámara digital y el

monóculo los cuales necesitan estar de manera alineada a la altura y los ángulos correctos. Debido a que las lecturas del dispositivo deben de ser demasiado precisas los componentes deben serlo de la misma forma, es necesario mantener los componentes en un lugar fijo y específico. En la figura 24 se observa la impresora grafica utilizada.



**Figura 24. Impresora 3D utilizada en el desarrollo del espectrómetro Raman.
Fuente: Elaboración propia.**

3.1.10 Diseño del set de espectrómetro

El diseño de piezas personalizadas ha ido cambiando con el paso del tiempo, diseñar las piezas necesarias para algún trabajo es indispensable para su buen funcionamiento. El diseño de un espectrómetro Raman debe ser preciso, en particular con respecto a la alineación de los rayos de luz hacia y desde la muestra. Por ello es necesario tener piezas que puedan dar una altura adecuada y un correcto funcionamiento de los componentes, para obtener de manera correcta las mediciones. Para el diseño del set de espectrómetro se necesita un software que permita diseñar las piezas en una forma tridimensional, el software de *Solid Works* es un programa muy útil para el diseño de piezas y ensamblajes en 3D. En este caso, para elaborar el diseño es necesario tomar en cuenta el funcionamiento del espectrómetro, tener las medidas exactas e incluso tener en cuenta que puede haber cierto margen de error en las piezas, son factores que interfieren a la hora del diseño de nuevas piezas. Las piezas diseñadas en el software pueden guardarse en un formato STL esto nos permite utilizar otro software llamado Ultimaker cura, este programa permite transformar diseños hechos en CAD y STL a diseños que puedan ser impresos en una impresora 3D. Dentro de este programa se puede configurar el tipo de impresora que se utiliza, ya que existen muchos modelos de diferentes marcas, este software cuenta con una lista de modelos de impresoras que tienen parámetros establecidos, haciendo más fácil la impresión, además permite elegir el tipo de material a utilizar, las temperaturas que necesita cada tipo de material, la velocidad y la calidad de impresión.

3.2 Elaboración de películas resistivas a base SWCNTs

Para la elaboración de los sensores resistivos se utilizaron SWCNTs y PDMS (Polidimetilsiloxano) para su adecuado funcionamiento. Para dispersar los nanotubos de carbono se utilizó Tritón X-100, del cual se agregaron 15 ml solución de tensioactivo al 1% (reactivos químicos Hycel). Posteriormente se agregaron 10 mg de SWCNTs (98.1% de pureza, Sigma Aldrich) y 5 ml de agua destilada. En la figura 25 A) se observa la máquina homogeneizadora para hacer la dispersión y en la figura 25 B) se muestran los elementos utilizados para la dispersión.

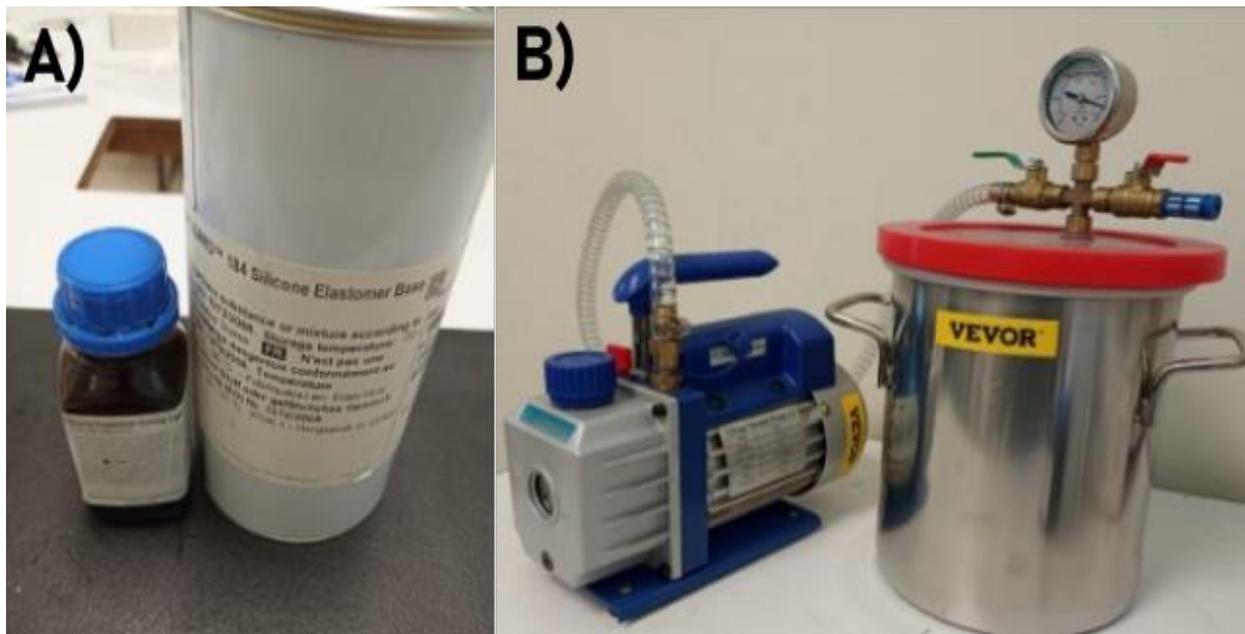


Figura 25. Materiales utilizados en la dispersión de nanotubos de carbono.
Fuente: elaboración propia.

La mezcla fue puesta en un homogeneizador durante 6 horas, esta mezcla logro una concentración de un color oscuro, se eligió este tipo de dispersión porque es considerado como un método de dispersión no destructivo, ya que preserva las propiedades de los materiales.

Por otra parte, para crear la base para los nanotubos de carbono se utilizó PDMS (Sylgard 184) siguiendo las concentraciones del fabricante que es de 10 partes de PDMS por 1 parte de agente de curado. Se mezclaron y se homogeneizó cuidadosamente, posteriormente se sometió a una bomba de vacío, en donde se pretende eliminar el oxígeno de la mezcla para evitar que existan burbujas dentro del PDMS.

En la figura 26 A) se muestra los agentes utilizados para la elaboración de las bases de PDMS. En la imagen 26 B) se observa la bomba de vacío que se utilizó para crear los sensores de SWCNTs y PDMS. Esta bomba elimina el aire que se queda en la mezcla, esta función evita que el PDMS al cercarse tenga burbujas que hace más fácil de dañarse al estirarse. En la imagen 31 se muestra la bomba utilizada para quitar aires de burbujas.



**Figura 26. A) PDMS. B) Bomba de vacío.
Fuente: Elaboración propia.**

Al eliminar las burbujas de aire, la mezcla fue depositada en un molde donde se esparció para tener una forma uniforme en la superficie, se colocó sobre una cama caliente para acelerar el proceso de secado de los sensores durante 5 minutos, se cortaron en formas de rectángulos, para concluir con la fabricación de estos sensores se colocó una cantidad de 5 ml en una pistola de aire para dispersar de manera uniforme los nanotubos de carbono en toda la superficie del PDMS, al tener los sensores con los nanotubos de carbono se dejaron secar al ambiente una noche. Al tener los sensores listos para su uso se le agregaron dos electrodos de aluminio, uno en cada extremo, para tener una mejor lectura y mejor contacto con la superficie. En la figura 27 se observa los materiales utilizados para la dispersión de los nanotubos de carbono y el sensor en su forma final. En la figura 27 A) se observa la pistola utilizada para la dispersión de los nanotubos, en la figura 27 B) se muestran los sensores dispersados de nanotubos de carbono, y en la figura 27 C) se muestra el sensor terminado, con sus electrodos de aluminio.

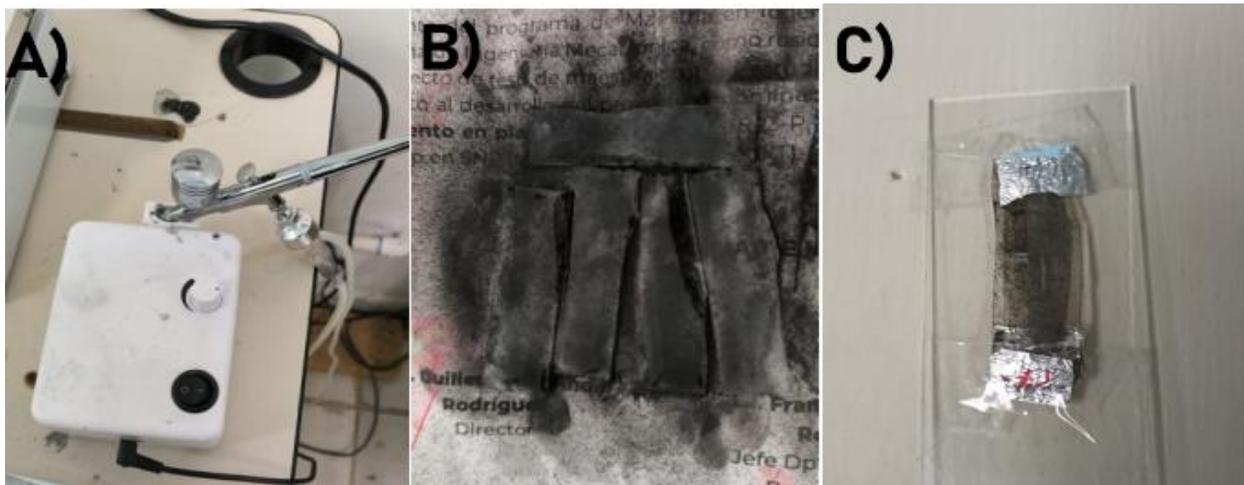


Figura 27. Proceso final de sensor de nanotubos de carbono en PDMS. A) Pistola para dispersión. B) sensores dispersados con nanotubos. C) Sensor.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4 Resultados y Discusión

4.1 Construcción de espectrómetro Raman

Para la construcción del espectrómetro Raman fue necesaria hacer diseños sobre los componentes del dispositivo como lo son el láser, los filtros, la rejilla de difracción y la cámara microscópica, los cuales fueron diseñados en *Solid Works*. En un inicio se propuso hacer el diseño del set para los componentes del espectrómetro, esto con la finalidad de manipular los componentes de una forma más eficiente. Se tomaron medidas de los componentes con un vernier digital para tener una mejor precisión con las medidas de los componentes del espectrómetro, para después trabajar en el diseño de las piezas.

Obteniendo las mediciones se continuo al siguiente paso que es el diseño por computadora, es aquí donde se utilizó el programa Solid Works que permite diseñar piezas en tres dimensiones, además nos ayuda a guardar el diseño en diferentes formatos para que sean compatibles con otros programas que son necesario para imprimir las piezas en 3D. Se realizaron diseños de las piezas para los componente, en el Apéndice B figura 1 se muestra las medidas del set del filtro pasa-banda, en el Apéndice B figura 2 se observa las medidas del set de la rejilla de difracción, en el Apéndice B figura 3 se muestran las medidas del soporte del monóculo del sensor y en el Apéndice B figura 3 se observan las medidas del set de la parte delantera de la cámara .

Al tener los diseños de las piezas se procedió a guardar las piezas en dos formatos en SLDPRT y en STL. El formato SLDPRT guarda la pieza con una compatibilidad con el programa de *Solid Works*, el formato STL permite abrir el archivo en otro programa llamado Ultimaker cura, el cual es el encargado de crear el código compatible con la impresora 3D, este programa convierte el diseño de la pieza en una serie de instrucciones que conllevan a la creación de la pieza mediante la impresora, este tipo de impresoras trabajan con un código G, que se le conoce como lenguaje

máquina. En la figura 28 A) se muestra el porta láser, en la figura 28 B) se observa la porta muestra utilizado, en la figura 28 C) se observa la base para el porta láser.

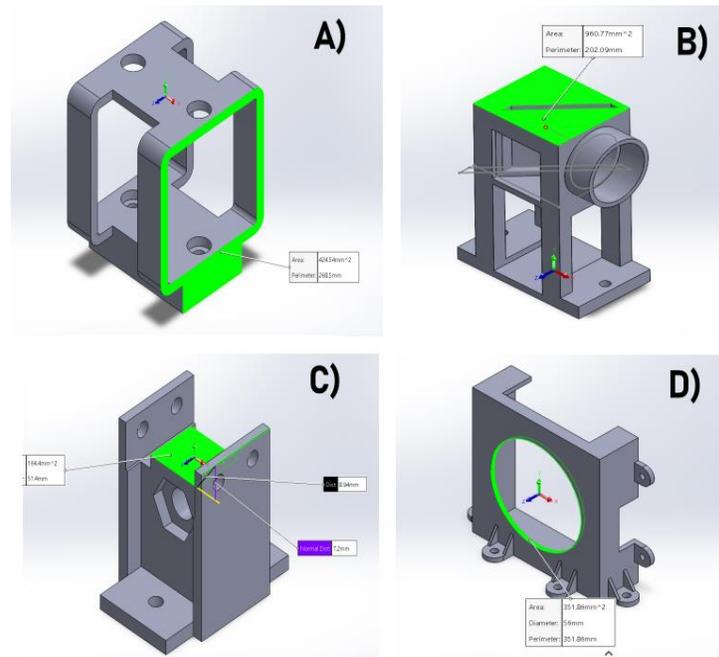


Figura 28. Diseños de solid Works. A) Porta láser. B) Porta muestra. C) Base para láser. D) Porta cámara parte delantera.

Fuente: elaboración propia.

En el programa Ultimaker cura se editan los parámetros de impresión de la impresora, utilizando un material como impresión PLA, Estos parámetros son tomados de acuerdo al tipo de material que se utiliza para la impresión, los cuales vienen establecidos dentro del programa los parámetros específicos para el uso de los diferentes materiales. En la figura 29 se muestra una parte del programa en donde se editan los parámetros de impresión.

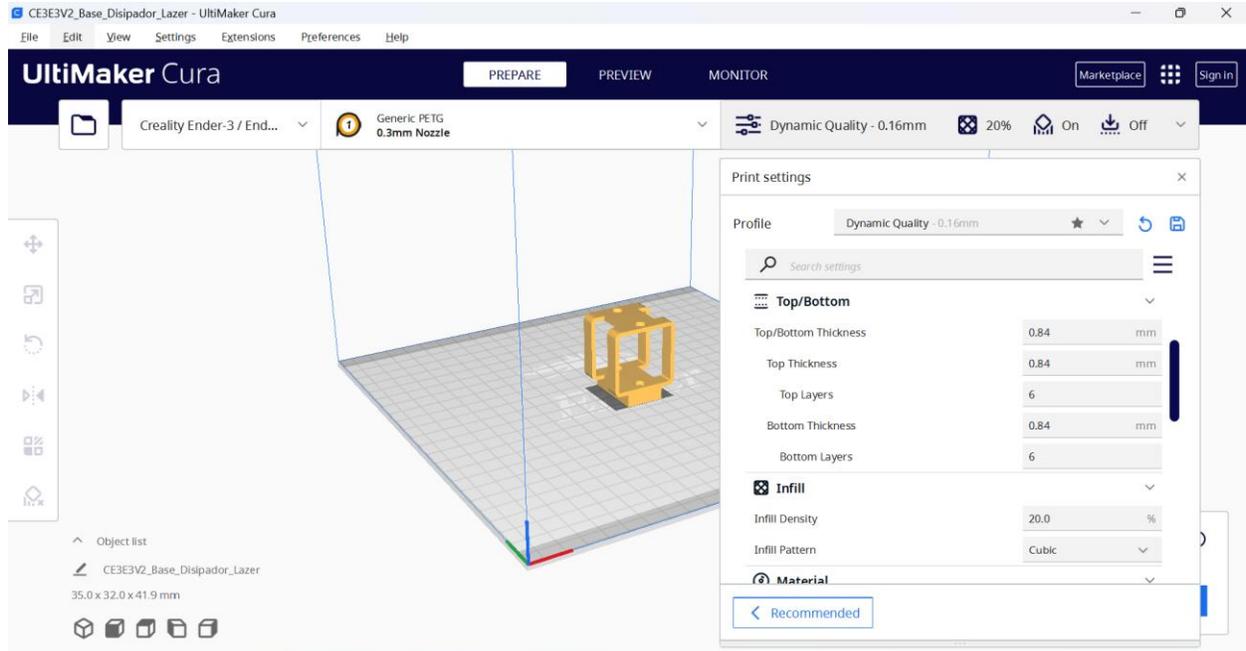
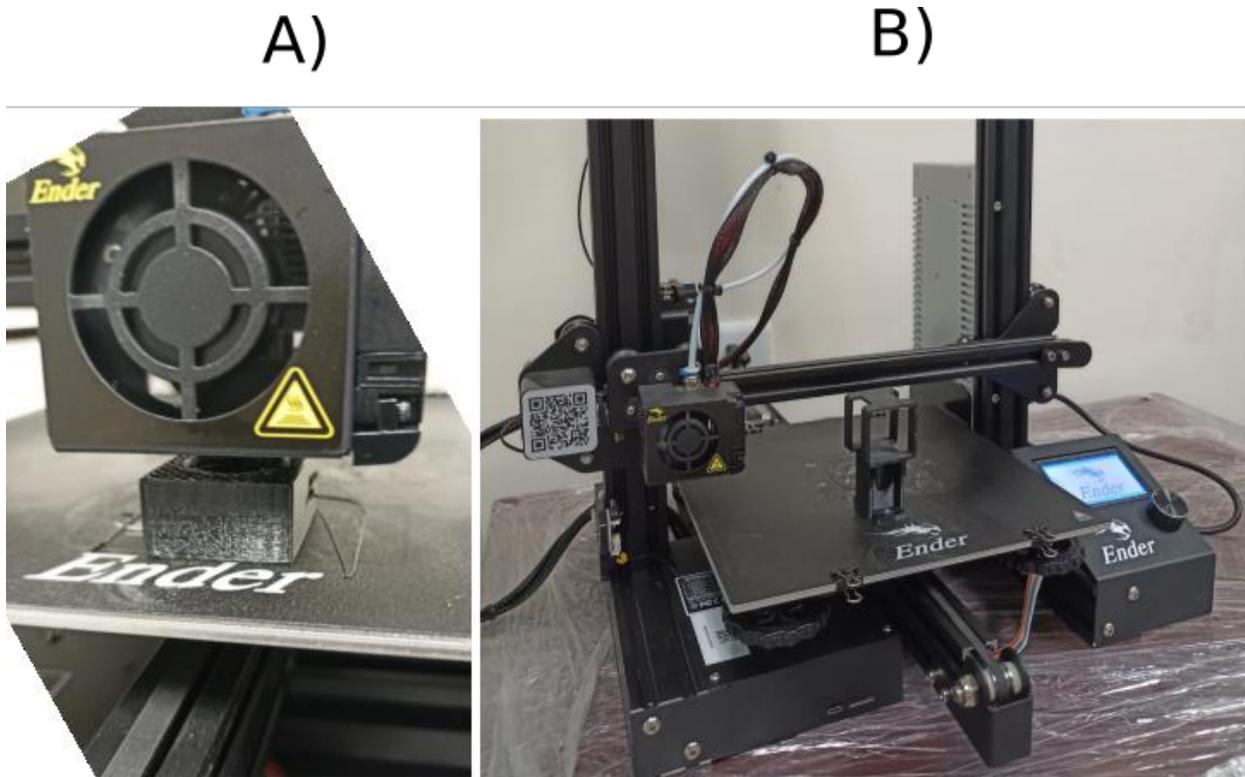


Figura 29. Configuración de parámetros para impresión.
Fuente: elaboración propia.

Al tener configurados los parámetros de acuerdo con el tipo de impresora y de material de impresión se pasa el archivo a la impresora para que comience con el proceso. En un principio las piezas salieron con diferentes medidas por lo que se decidió poner una tolerancia de acuerdo con las mediciones que se obtuvieron de las piezas impresas anteriormente. De esta manera se logró coincidir con las medidas de los componentes para que funcionaran de manera correcta. A continuación, se muestra en la figura 37 A) el proceso de impresión de la impresora 3D, en la figura 37 B) se muestra la pieza impresa terminada.



**Figura 30. A) impresora en curso. B) Finalización de impresión de pieza.
Fuente: Elaboración propia**

Las piezas impresas quedaron de la medida correcta, y una calidad de impresión bastante aceptable. Una vez teniendo las piezas impresas se procedió al ensamblado de las partes del espectrómetro para empezar a realizar pruebas con luz. Se colocó el láser verde sobre una pieza impresa y esta a su vez en un riel de aluminio para controlar el movimiento del láser, a la salida del láser se colocó el filtro pasa-banda, encargado de filtrar la luz verde de 520 nm, se diseñó una pieza la cual sería la encargada de sostener la muestra para que la luz del láser incidiera sobre ella. En la figura 31 se muestran las medidas del riel de aluminio utilizado.

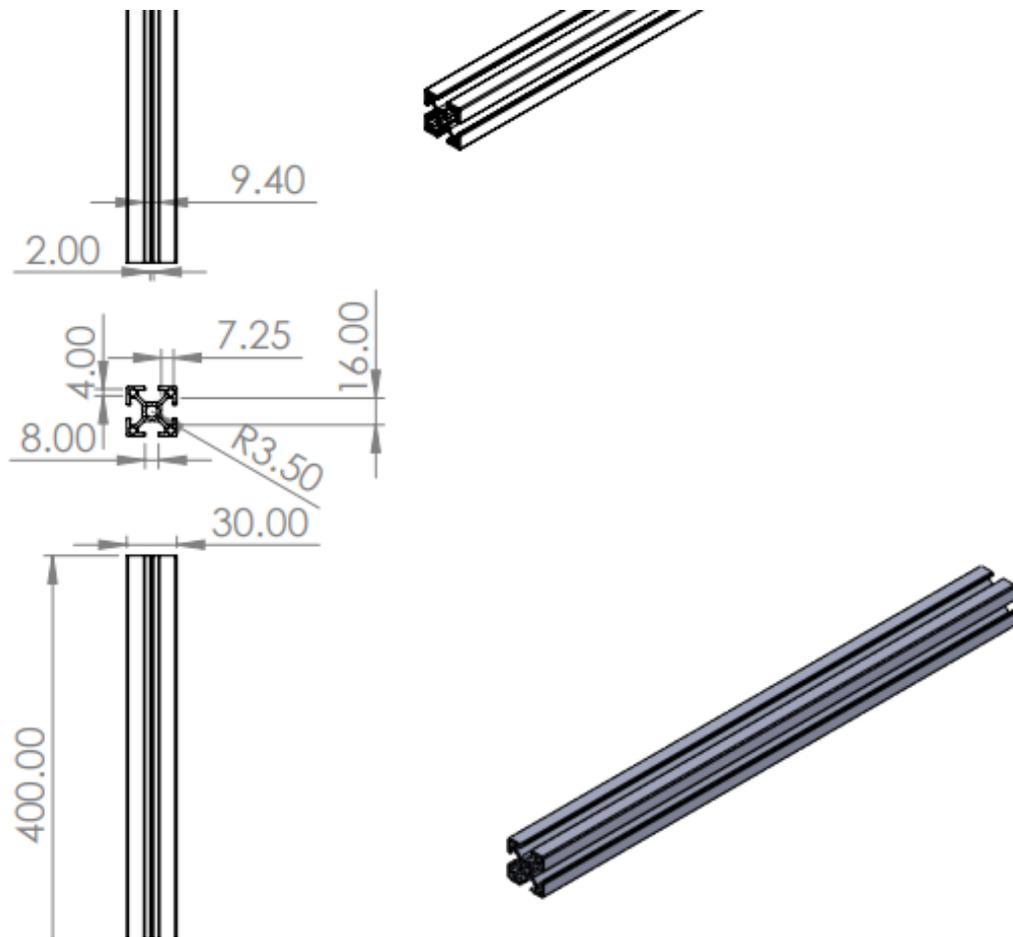
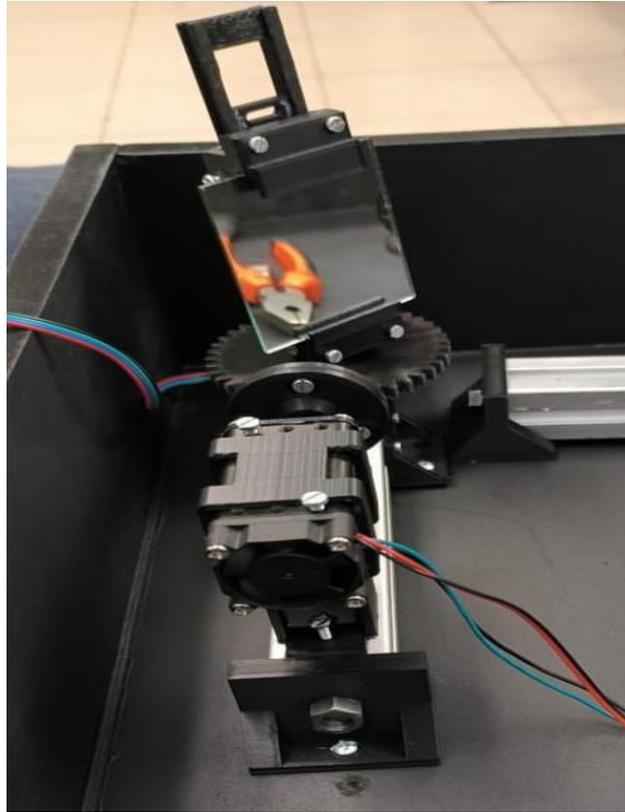


Figura 31. Medidas de riel de aluminio.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 32 se puede observar lo anterior mencionado incluyendo un espejo en la parte de la muestra, con el fin de observar la dirección de la dispersión de la luz que incidía sobre la muestra.



**Figura 32. Parte de espectrómetro.
Fuente: elaboración propia.**

De la misma manera que el láser se colocó el filtro pasa altas sobre un riel de aluminio direccionando la luz de la muestra hacia el lugar donde se encontraba este filtro. La rejilla de difracción se colocó sobre un motor a pasos para poder controlar el ángulo al momento de capturar el espectro de luz para de esta forma poder elegir la vista más adecuado de la rejilla y poder direccionar la luz de acuerdo con la cámara para obtener una buena imagen. La cámara microscópica se colocó en un riel de la misma manera que el láser y los filtros ópticos, teniendo la posibilidad de moverse a través del riel, de esta manera poder enforcar la luz dispersada de manera correcta y evitar perdida de la imagen. En la figura 33 se muestra una parte del espectrómetro.

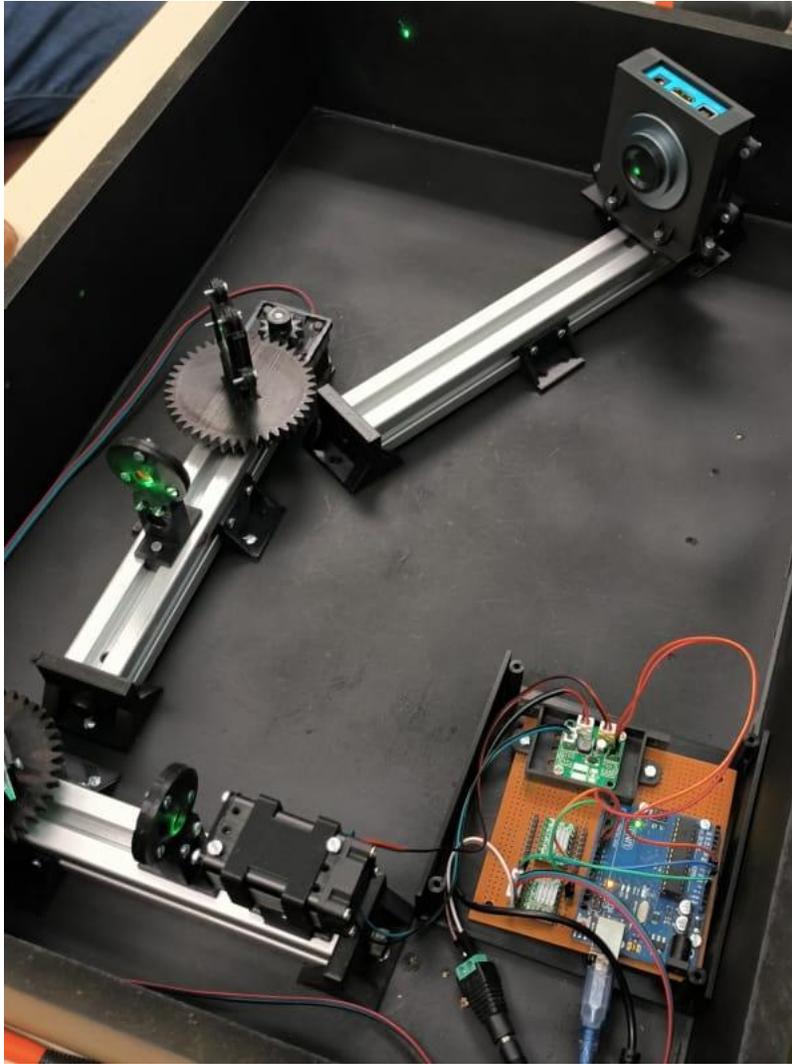


Figura 33. diseño de espectrómetro.
Fuente: elaboración propia.

Para tener una mayor precisión se montaron dos motores a paso nema 17 son motores, estos motores fueron puestos en la parte final de los rieles, para ser más exactos en la porta muestra y en el riel que ocupa la rejilla de difracción y el filtro pasa altas. Para el correcto funcionamiento de los motores se utilizó un par de controladores A4988 y un Arduino One, los controladores son los encargados de controlar la potencia del motor, el Arduino es el microcontrolador que se encarga

de enviar y recibir las señales digitales u analógicas que se le proporcionan por medio de los programas realizados para tener un funcionamiento correcto y deseado. En la figura 34 se muestra el armado de una tablilla fenólica perforada, donde se montaron los controladores de los motores y el microcontrolador Arduino one.

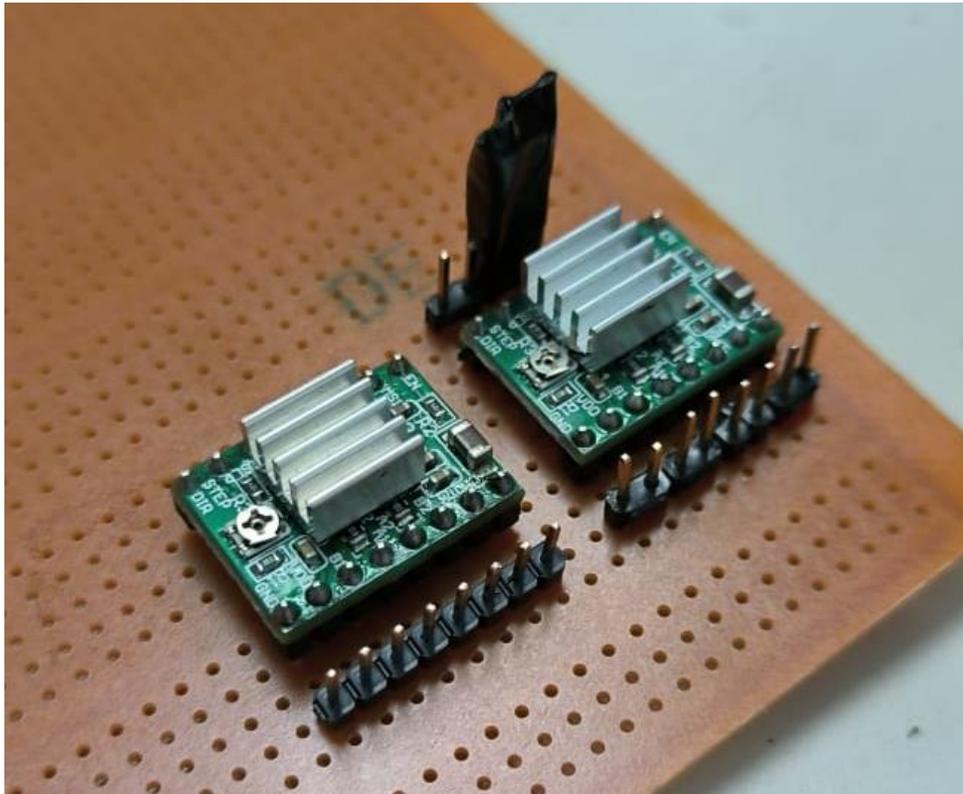


Figura 34. Controladores A4988.
Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a conectar los motores a la fuente de alimentación y a los controladores. Para que los motores funcionen de manera correcta y evitar un sobrecalentamiento que pueda dañar el embobinado del motor, se deben leer las especificaciones del motor, cuál es su corriente de

operación, para de esta forma ajustar el controlador por medio de una fórmula para que no estregue la corriente óptima para el funcionamiento de este. Para un correcto funcionamiento en la figura 35 se muestra el esquema eléctrico de la conexión de los motores a pasos y la placa de Arduino.

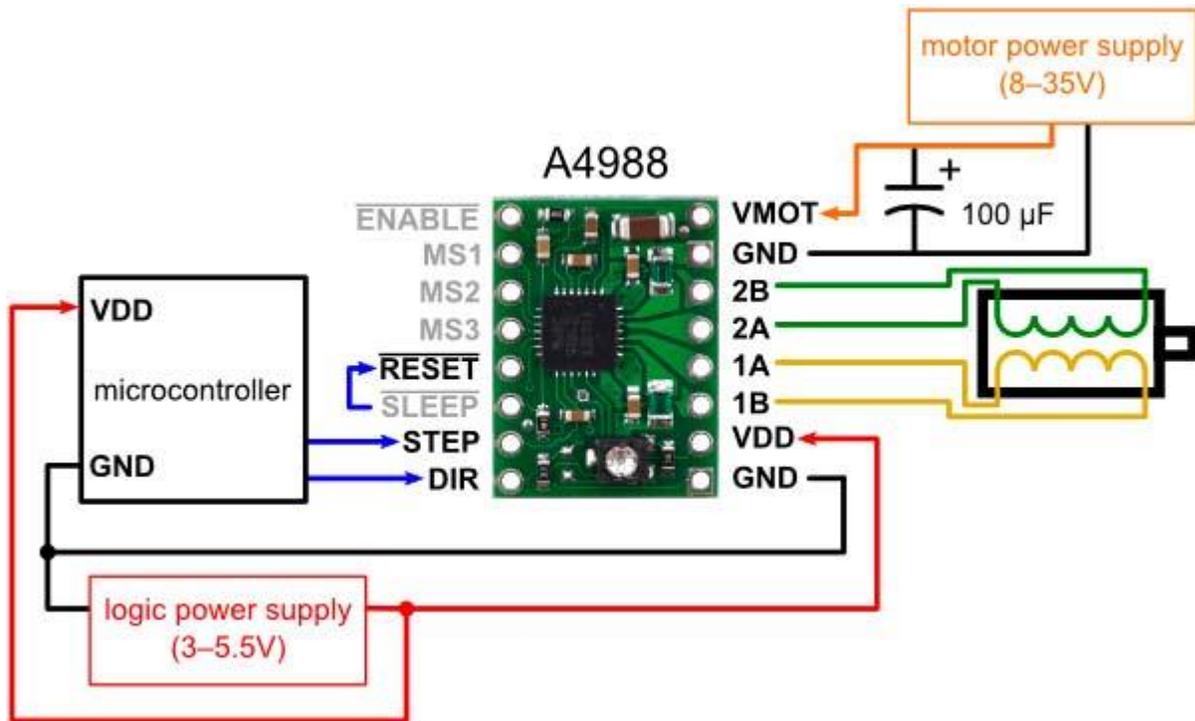


Figura 35. Diagrama de conexión de motor a pasos nema 17.
Fuente: <https://yomaker.com/control-de-motor-paso-a-paso/>

Los pasos que tienen el motor nema 17 corresponde a 1.8° , para tener pasos más exactos existe una configuración de los controladores los cuales pueden reducir los pasos en $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$. Dependiendo del número de pasos y de la configuración que se le dio al controlador era el tamaño de paso del motor, en este caso tenía la configuración más pequeña de $1/16$.

El sensor de imagen con el que cuenta la cámara digital tiene un área pequeña (figura 36), lo que evitaba captar de manera completa el espectro, por esta razón el poner un motor a pasos en la rejilla de difracción suponía pasar el espectro completo a través del sensor de imagen. El problema que se mostró a realizar este procedimiento era que la luz reflejada muchas veces no coincidió en el área del sensor y la calibración del dispositivo era muy constante y consumía tiempo calibrarlo constantemente.

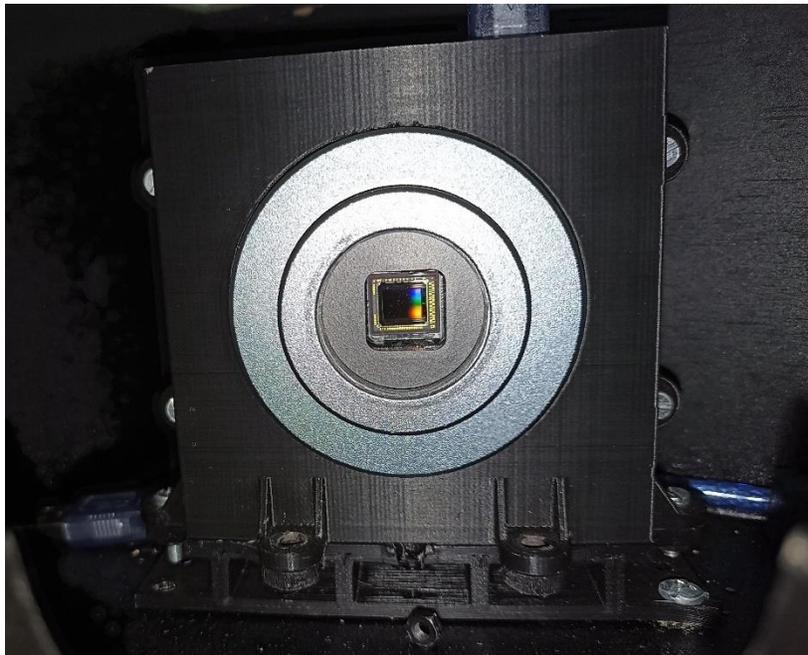
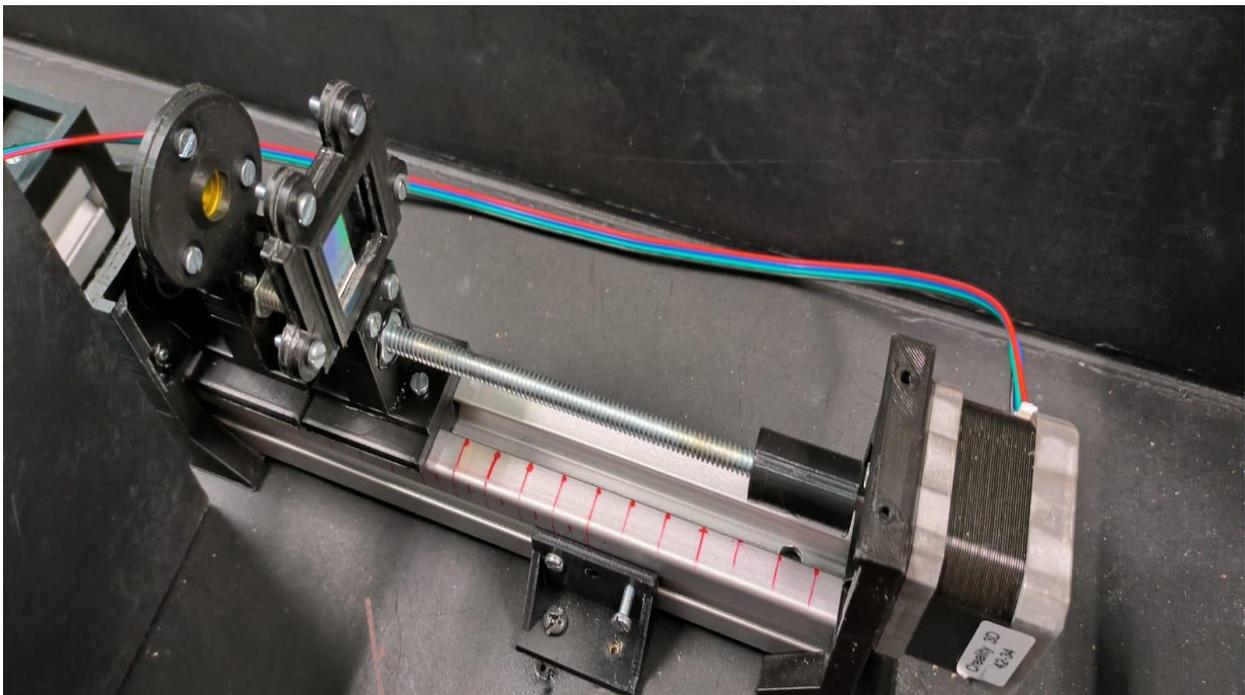


Figura 36. Sensor de imagen CMOS.
Fuente: Elaboración propia.

Se propuso un nuevo diseño para tratar de evitar este problema, el cual consistió agregar un tornillo sin fin. el objetivo de agregar el tornillo sin fin fue tener un movimiento lineal del filtro óptico pasa-altas y de la rejilla de difracción, esto para que el espectro de luz que se obtenía

atravesara el sensor completamente. Para colocar el tornillo sin fin se tuvo que realizar unos cambios en las piezas anteriores ya que, para poner el tornillo, este tenía que acoplarse al filtro y a la rejilla para colocar una tuerca que ayudara a mover estos componentes a través del tornillo, además se tuvo que agregar una altura adicional a todos los diseños hechos, para poder captar la imagen. La figura 37 muestra la adaptación del tornillo sin fin.



**Figura 37. Movimiento lineal de rejilla de difracción y filtro pasa-altas con tornillo sin fin.
Fuente: Elaboración propia.**

Después de tener las partes listas para el funcionamiento de comenzó a diseñar el programa en Python y en Arduino. Comenzando por el láser, este tiene una potencia de 50 mW, debido a la potencia del láser se decidió poner un PWM para variar la intensidad de este, ya que algunas muestras pueden llegar a ser sensibles a dicha intensidad. Para variar el PWM se utilizó el módulo

TTL que tiene el láser de fábrica. Con ayuda del microcontrolador Arduino se conecta al módulo TTL y a una salida digital de PWM, en las especificaciones del microcontrolador mención los puertos con dichas salidas. Una vez identificado el puerto se realiza el programa en Arduino que varía el ciclo de trabajo del PWM para de esta forma variar la intensidad el láser. En la figura 38 se muestra el funcionamiento del PWM. En la figura 38 A) la intensidad del láser baja en su ciclo de trabajo al 5%, en la 38 B) se observa a una intensidad media en un ciclo de trabajo del 50 % y en la figura 38 C) se observa el incrementó de la intensidad de la luz verde al aumentar el ciclo de trabajo casi al máximo al 95%.

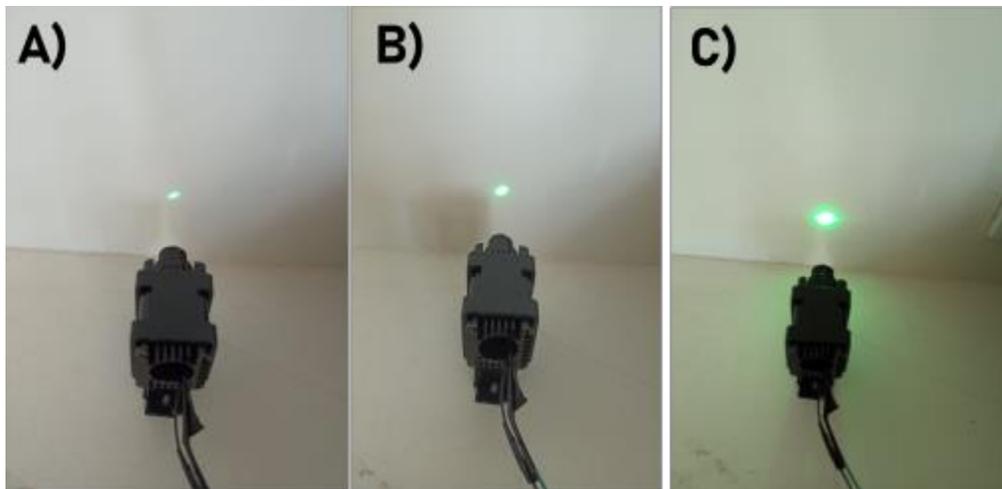


Figura 38. Variación de intensidad de laser con PWM.
Fuente: Elaboración propia

El programa en Python fue diseñado para controlar las variables del espectrómetro, en este caso, los motores a pasos y la intensidad del láser, además de hacer el procesamiento de la cámara digital, para convertirlo en una señal Raman. Para tener un control mediante el programa hecho en Python y controlar el Arduino se utilizó una librería llamada *Pyserial*, el cual nos ayuda a utilizar

el puerto serial para comunicar el microcontrolador con la computadora. De esta manera los datos que se escribieron en el programa eran enviados e interpretados por el microcontrolador. Se diseñada una interfaz gráfica para tener una mejor interacción con el programa. En la figura 39 se muestra la interfaz para conectar el puerto del Arduino one con el programa de Python.

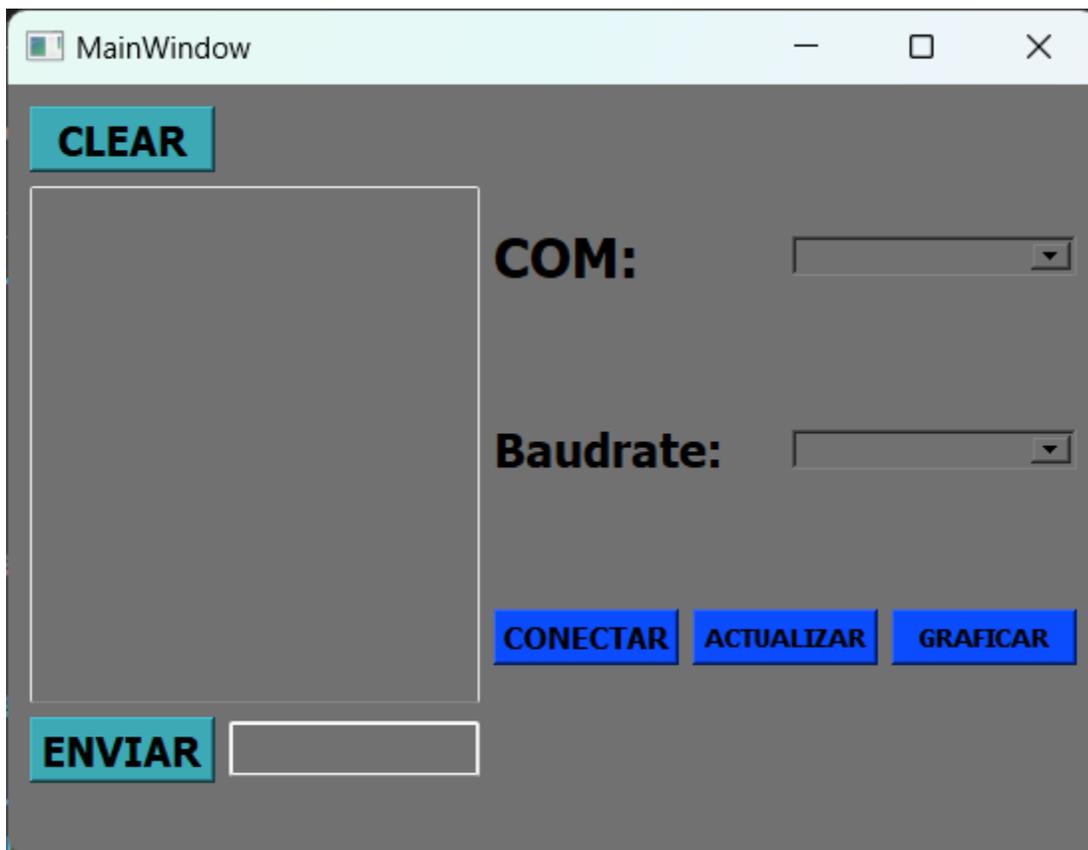
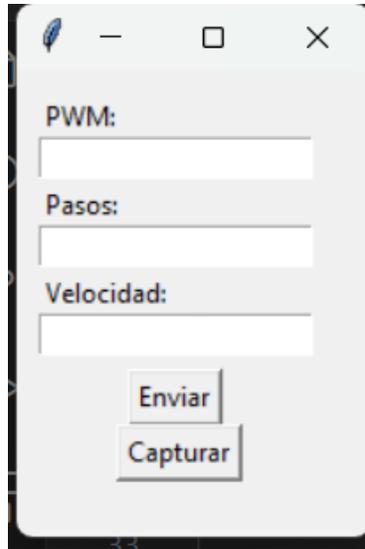


Figura 39. Interfaz gráfica conexión de puerto.
Fuente: Elaboración propia.

El programa utilizó diferentes librerías, como por ejemplo utilizó las librerías *Pyserial*, *Matplotlib*, *Numpy*, en donde cada una tenía una diferente tarea se agregó una librería llamada *Tk*

inter donde se colocaron las variables velocidad, pasos, PWM y la opción de capturar el espectro. En la figura 40 se muestra la interfaz gráfica del control del láser y del espectrómetro.



**Figura 40. interfaz gráfica de variables d espectrómetro Raman.
Fuente: Elaboración propia.**

Se comprobó el correcto funcionamiento del espectrómetro de manera mecánica para observar si el movimiento de las piezas y los componentes se median de manera correcta. En la siguiente imagen se muestra el diseño completo del espectrómetro desarrollado. En la figura 41 se un antes y un después del espectrómetro diseñado.

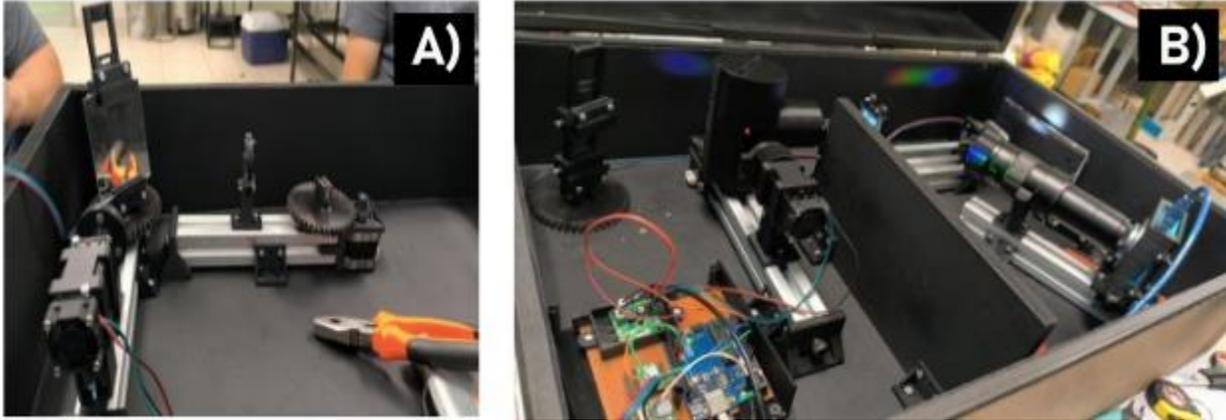
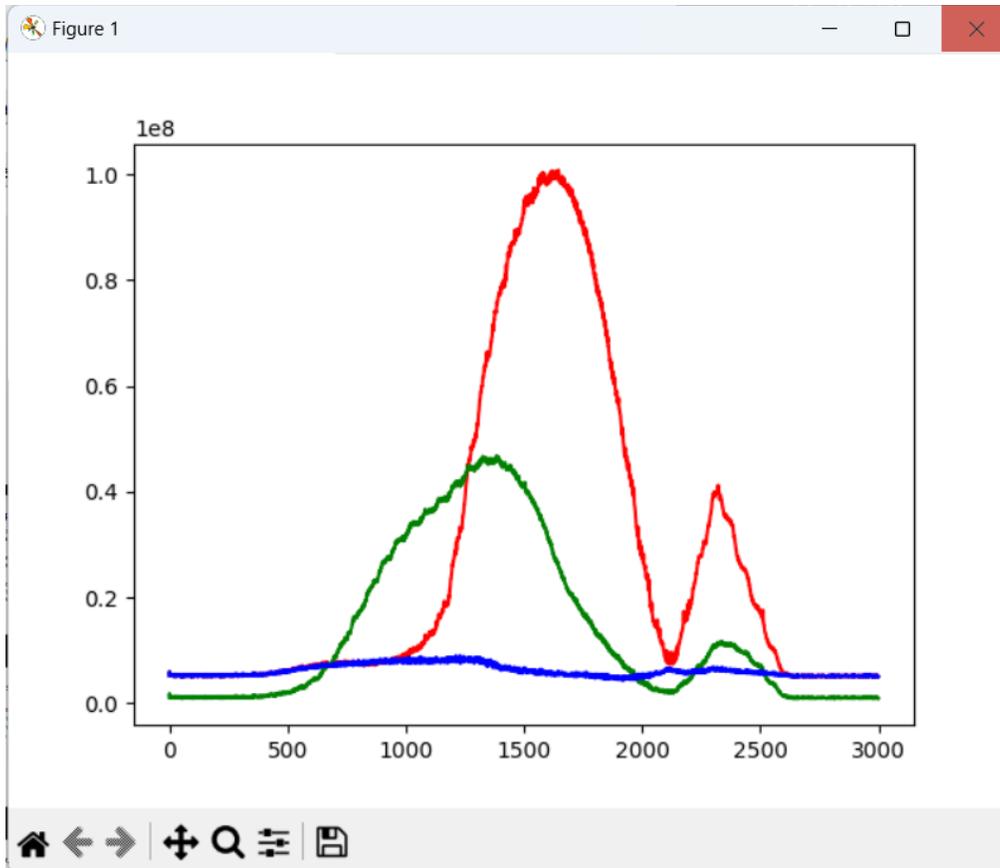


Figura 41. Prototipo de espectrómetro Raman. A) Inicio del armado de espectrómetro Raman. B) Diseño terminado.

Fuente: Elaboración propia.

En un principio para identificar si el equipo detectaba los colores se utilizó luz blanca y un espejo, este fue colocado de forma que la luz pasara a través del filtro pasa altas y la rejilla de difracción. Una vez calibrado el equipo, se corrió el programa de Python, en donde se insertan los valores de número de pasos de los motores, la intensidad del láser, y el inicio del proceso de graficar el espectro. Se obtuvo una gráfica donde se observa el resultado, en la gráfica se observa los colores verde y rojo, que son los colores que se alcanzan a observar después del filtro pasa altas y la rejilla de difracción. En donde el color rojo tiene más intensidad, por lo que se podría decir que el sensor es más sensible al color rojo. En la figura 42 se muestra un espectro tomado con el espectrómetro, en donde se obtuvo una medición de varios colores, ya que se utilizó la luz blanca y la rejilla de difracción.



**Figura 42. grafica de prueba con luz blanca y filtro pasa altas.
Fuente: Elaboración propia.**

Se realizaron pruebas con el espectrómetro desarrollado, para identificar un rango de medición del espectrómetro se utilizó el láser verde de 520 nm, en la porta muestra se colocó un espejo, la idea era captar la luz del láser e identificar un punto de inicio de longitud de onda para el programa, después se utilizó un láser rojo de 650 nm y se corrió el programa para ver el análisis que hacía. En la siguiente figura se muestran las gráficas obtenidas al utilizar el láser verde y el láser rojo. En la figura 43 A) se observa el espectro obtenido con el láser verde y en la figura 43 B) se observa el espectro obtenido con el láser rojo.

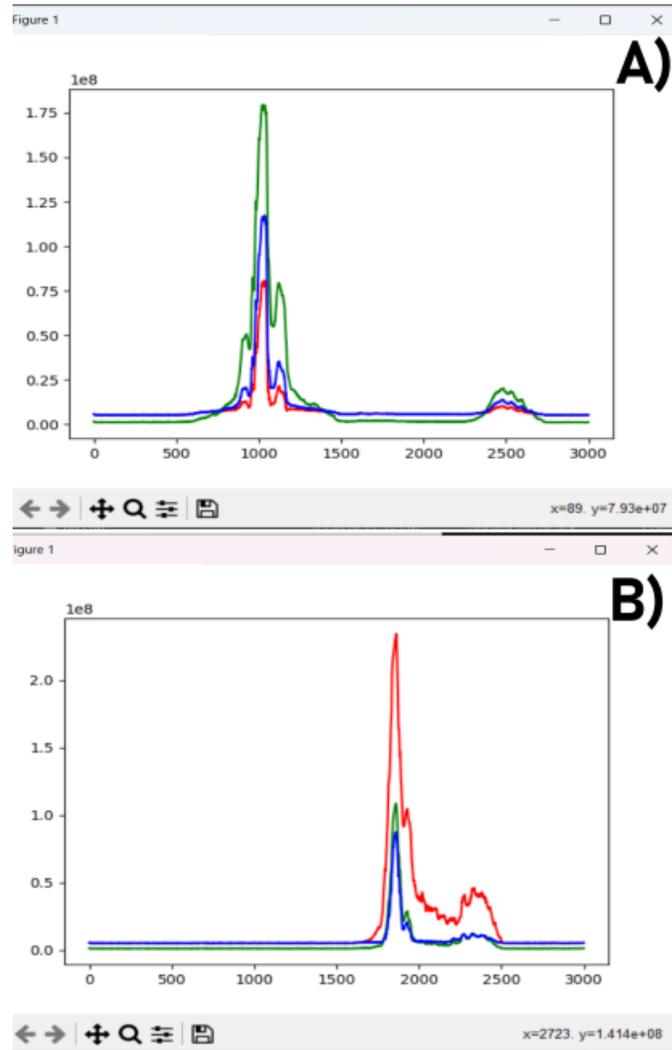


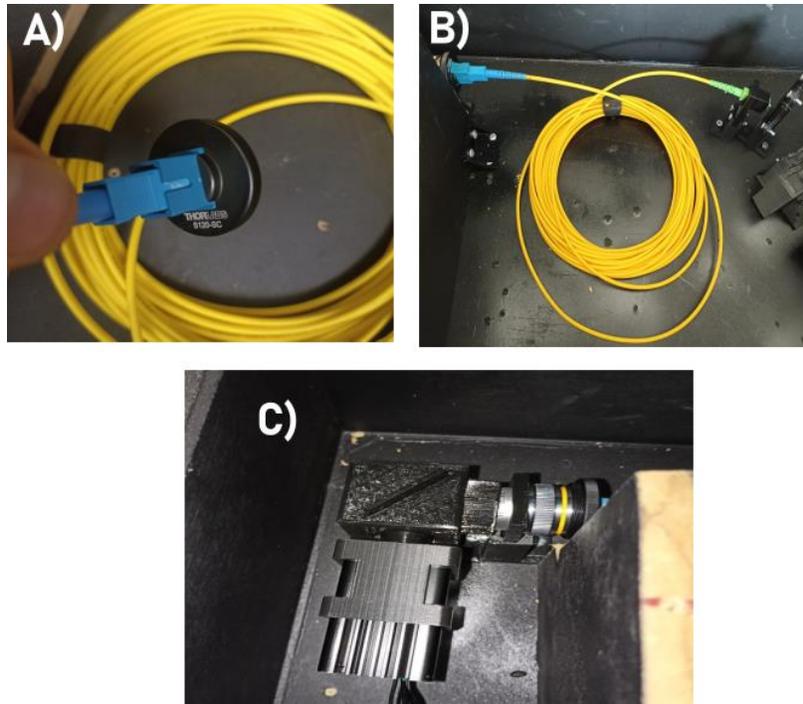
Figura 43. Espectros de láser verde y láser rojo.
Fuente: Elaboración propia.

Se empezaron a realizar pruebas con muestras de nanotubos de carbono, se colocaba el láser verde con diferentes intensidades y se buscaba un espectro. Los resultados obtenidos no mostraban ningún espectro, se observó el dispositivo, la luz que pasaba a través del filtro pasa alta

Se decidió agregar fibra óptica al diseño, la cual serviría para transportar la luz reflejada directamente hacia la rejilla de difracción, de esta manera se evitaba el problema de pérdida de la luz antes de llegar a la rejilla y el filtro pasa altas. También para se optó por un objetivo de microscopio para concentrar todo lo posible la luz dispersada de la muestra, de esta manera se pretendía transportar la mayor cantidad de luz entre ella la dispersión Raman.

Existen dos tipos de fibra óptica, la monomodo y el multimodo, cada una tiene especificaciones diferentes, y su uso también puede ser útil para diferentes actividades. Se realizaron pruebas para determinar cuál tipo de fibra óptica se adecuaba mejor al funcionamiento del espectrómetro. Para comprobar su funcionamiento se utilizó una lámpara de luz blanca, se enfocó la luz hacia la fibra óptica, en ambos casos, y se observó la salida de la fibra óptica para observar cual tenía mejor intensidad.

Se eligió la fibra óptica monomodo, debido a que obtenía mejores resultados. Para lograr enfocar la luz dispersada se propuso el uso de un objetivo para microscopio, la cual su función principal es captar la luz dispersada de la muestra, enfocarla y mandarla a través de la fibra óptica, de esta manera se buscó evitar lo más posible perder la luz dispersada. Una vez enviada la luz se coloca directamente sobre la rejilla de difracción, para descomponer su espectro en sus longitudes de onda. En la figura 52 A) se observa la fibra óptica conectado al adaptador del objetivo microscópico, para enfocar la luz de manera correcta, en la figura 45 B) se observa la fibra óptica instalada en el espectrómetro y en la figura 45 C) se muestra la porta muestra con el objetivo, el adaptador y la fibra óptica monomodo conectada.



**Figura 45. Componentes ultimo diseño de espectrómetro.
Fuente: Elaboración propia.**

Se realizaron varios cambios en donde se eliminaron algunos elementos anteriormente mencionados, como los motores, el tornillo sin fin se diseñó una nueva porta muestra, para poder captar mejor la luz y poder colocar el objetivo microscopio para captar mejor la luz. También en el programa se agregaron nuevas funciones que consisten en definir un área específica que abarque la sección del espectro y de esta forma captar la luz, dentro del programa se definen los pixeles del área de interés, donde se tomaron los cuadros (*frames*). En la figura 46 se observa el proceso para identificar los pixeles del espectro de luz visible obtenido en el espectrómetro desarrollado.

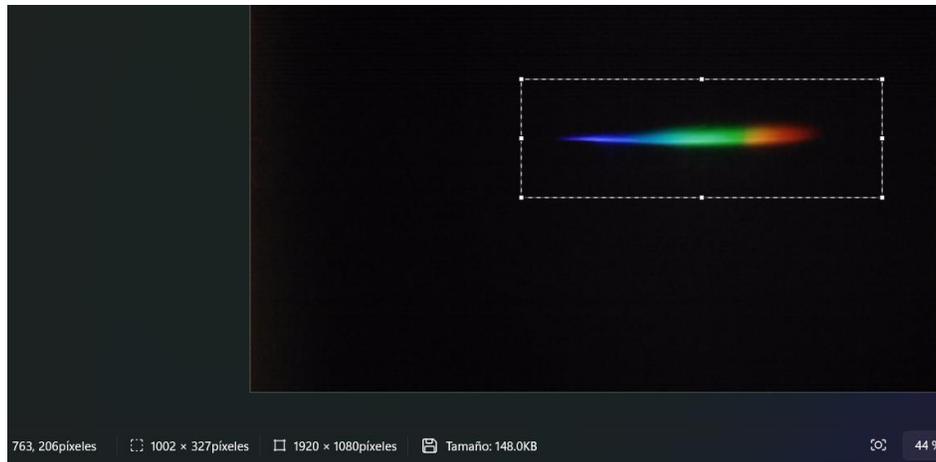
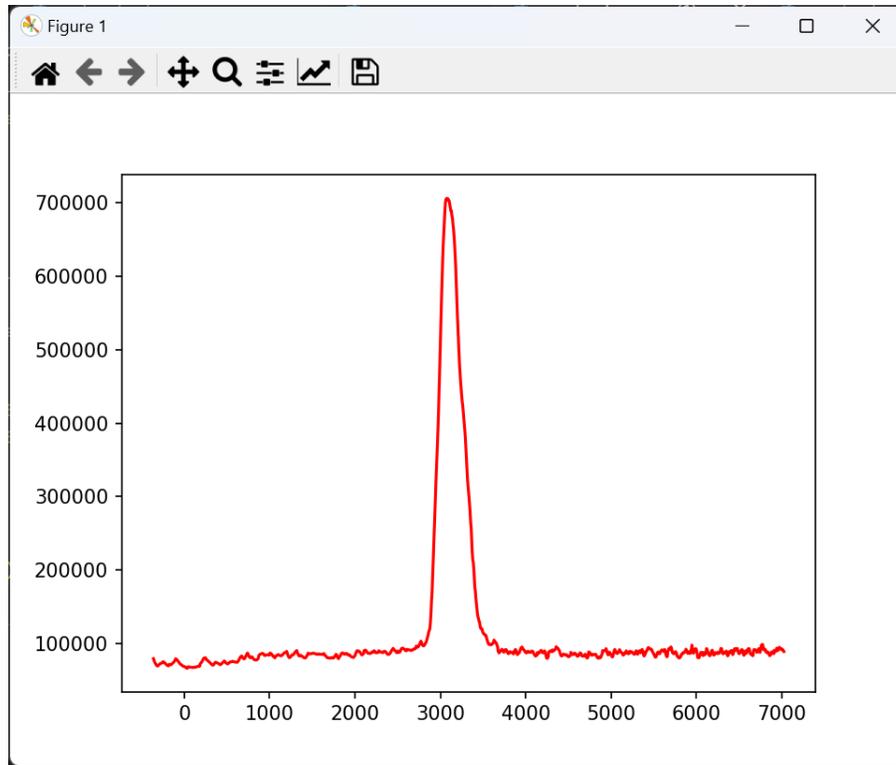


Figura 46. Píxeles de espectro.
Fuente: Elaboración propia.

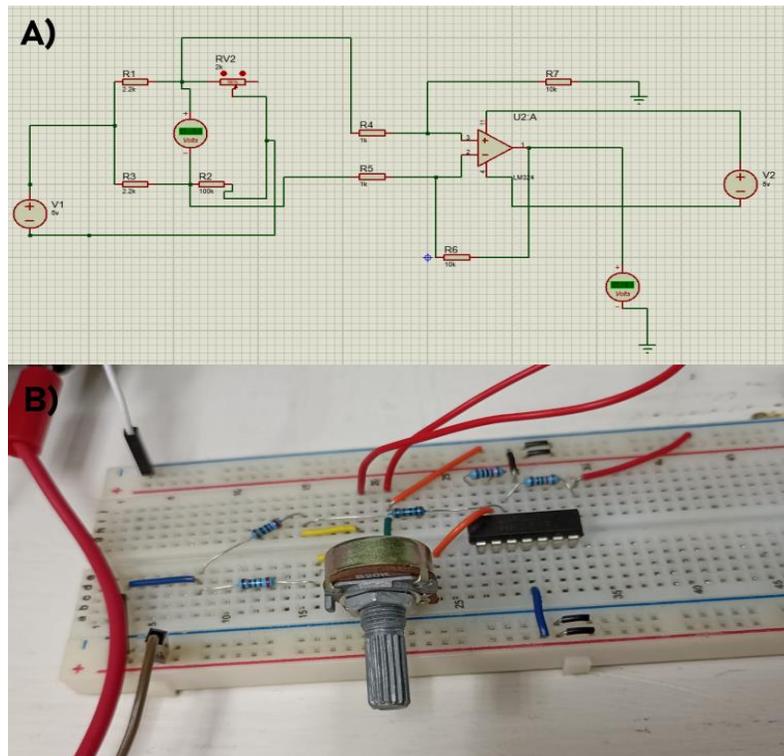
Los datos obtenidos se muestran en una gráfica en donde se obtiene la intensidad de la luz y el corrimiento Raman, en esta gráfica se observa el espectro final, donde se analizan los distintos picos obtenidos. Esta información igualmente es guardado en un archivo .txt para tener los datos de manera que se puedan utilizar en otros programas. En la figura 47 se observa el espectro obtenido de la medición de un sensor con nanotubos de carbono y el espectrómetro desarrollado.



**Figura 47. Grafica de corrimiento Raman de programa diseñado en Python.
Fuente: Elaboración propia.**

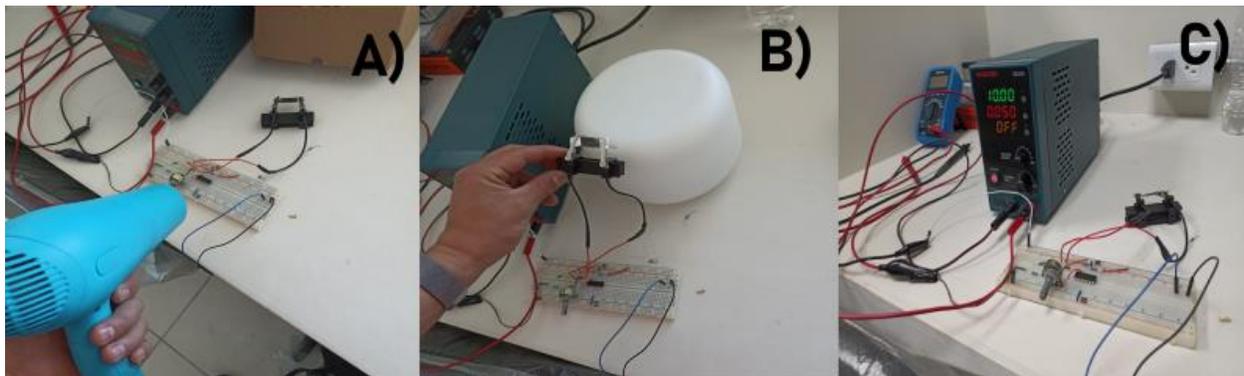
Aplicación Raman: monitoreo de sensor

Para comprobar el funcionamiento del sensor se en un primer paso se determinó medir la resistencia de los sensores, mediante la ayuda de un multímetro. Se escogían los sensores con valores de resistencia de entre 500 y 1500 ohms. Una vez elegido los sensores se sometieron a diferentes pruebas para verificar su funcionamiento en diferentes entornos y se diseñó un circuito eléctrico para medir los cambios que estos presentaban. El circuito fue diseñado por software para verificar el funcionamiento y después llevado a protoboard para comprobar el funcionamiento y realizar las pruebas adecuadas. En la figura 48 A) se observa el circuito diseñado en proteous y en la figura 48 B) se muestra el circuito hecho en protoboard.



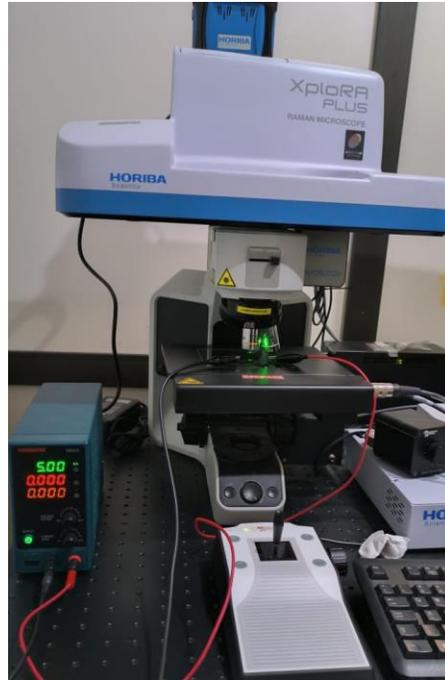
**Figura 48. Circuito amplificador.
Fuente: Elaboración propia.**

La función del circuito era para determinar las variaciones que se obtenían a la salida del amplificador. Teniendo en cuenta que el sensor actúa como una resistencia variable a las diferentes variables físicas, se utilizó un humidificador, una pistola de aire caliente y una fuente de voltaje. Al variar la resistencia del sensor, también variaba el voltaje a la salida del circuito. De esta manera se podía visualizar el funcionamiento de los sensores de PDMS con SWCNTs. En la figura 49 A) se utilizó el sensor con una pistola de aire caliente, en la figura 49 B) se utilizó el sensor con un humidificador y en la figura 49 C) se aplicó voltaje al sensor.



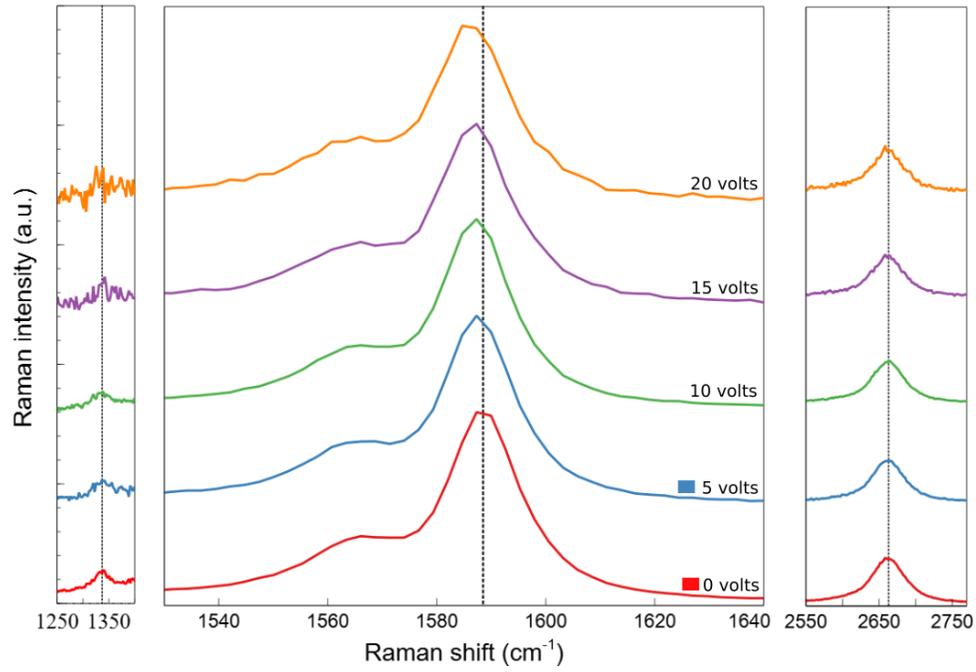
**Figura 49. Sensor Sometido a diferentes pruebas.
Fuente: Elaboración propia.**

Debido a cuestiones de tiempo se continuó realizando pruebas solo con la fuente de voltaje, ya que, con pruebas como calor y humedad, las variaciones eran inestables y se necesitaba más tiempo para poder estudiar el comportamiento de estas variables. Sin embargo, el funcionamiento del sensor fue adecuado por lo que se puede confirmar que su funcionamiento se debe a su forma de desarrollo. En la figura 50 se observa el microscopio Raman utilizado para tomar las diferentes lecturas en los sensores de nanotubos de carbono.



**Figura 50. Micro espectrómetro Raman, pruebas de sensor.
Fuente: Elaboración propia.**

En las pruebas con voltaje el sensor tenía un comportamiento más estable, por lo que se prosiguió a realizar pruebas en un micro espectrómetro Raman de la marca Horiba, en donde se encontraron corrimientos Raman con la variación de voltaje. Se tomaron varios espectros Raman del sensor en los cuales se variaba el voltaje. Se comenzó aplicando 0v, después los aumentos de voltaje se dieron de 5v en 5v hasta llegar a 20v. En cada cambio de voltaje se tomaba el espectro Raman del sensor. Se obtuvo un corrimiento Raman hacia la izquierda de la gráfica, con el aumento del voltaje.



**Figura 51. Corrimientos Raman de pruebas con sensor de PDMS y nanotubos de carbono.
Fuente: Elaboración propia.**

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de un espectrómetro Raman consta de muchos conocimientos en varios campos de la ingeniería, es un gran reto que requiere de un gran conocimiento en diversas áreas, como la electrónica, la programación, la óptica y la mecatrónica. Todos esto es necesario para poder llevar a cabo este dispositivo. Un espectrómetro Raman tiene muchas ventajas en el mercado, comparado con otros equipos que son utilizados para el análisis de muestras. El espectrómetro Raman no necesita de preparación para analizar las muestras y además no daña las muestras, es una de las principales ventajas de la espectroscopia Raman.

Para el desarrollo del espectrómetro Raman los componentes deben tener una muy buena calidad y que sean muy precisos en su funcionamiento. Para obtener datos exactos, el programa del espectrómetro creado necesita valores definidos que corresponden a los valores de longitudes de onda del láser y de los filtros utilizados. Por ejemplo, al utilizar los filtros pasa-banda y pasa-altas, los valores especificados por el fabricante son tomados como referencia, esto debido a que no se cuenta con equipo especial que nos ayude a determinar exactamente los valores de longitud de onda de la luz que se obtienen de los filtros. Estos valores son tomados en cuenta para la programación del espectrómetro, las cuales son variables predeterminadas que ayudan a que el programa funcione de manera correcta. Los filtros ópticos utilizados son componentes que tienen costos muy elevados, además son difíciles de encontrar. Incluso en internet los fabricantes de este tipo de filtros son pocos, ya que la construcción de este tipo de componentes es difícil y costoso. En México fue difícil encontrar este tipo de componentes por lo que la mayoría utilizados en el espectrómetro fueron pedidos en el extranjero desde China y Estados Unidos, ya que es más fácil encontrar empresas dedicadas al desarrollo de tecnología óptica en los países más desarrollados. La cámara microscópica, los filtros pasa-banda y pasa-altas, la rejilla de difracción son

componentes traídos de China. Estos tenían un mejor precio comparados con los encontrados en Estados Unidos, aunque el tiempo de espera era mayor. Al tener los componentes disponibles se empezaron a realizar los diseños de los mismo, para poder manejarlos, sin dañarlos y utilizarlos de manera correcta. Los diseños se realizaron tomando en cuenta la interacción de la luz y la altura del sensor de imagen, además de tomas distancias para los enfoques de la cámara, el objetivo microscópico y el láser.

Los filtros utilizados fueron los filtros pasa-banda y pasa-altas. En el caso del filtro pasa altas (530 nm) bloquea la luz roja y cierta parte de la luz verde, esto se debe a que la luz verde va desde los 490 nm hasta 570 nm. En el filtro pasa-banda tiene como especificación que la luz que atraviesa el filtro es de 520 nm, este valor puede varía entre 515 y 525. El porta-muestra se diseñó con la finalidad de mantener la luz en un solo lugar, para que la luz fuera de este no interfiriera con la luz del láser, además cuenta con una apertura para colocar la muestra y otra para colocar el objetivo para microscopio, de esta forma el ángulo del láser y el objetivo pueda captar de menor manera la luz dispersada. El objetivo ayudo a enfocar de manera significativa la luz dispersada y a través de la fibra óptica esta luz se transportaba hasta la rejilla de difracción. La fibra óptica cumplió de manera correcta el funcionamiento esperado. La rejilla de difracción funciono de manera correcta, en este punto las especificaciones de la abertura del espectro de la rejilla era de 36.9 pero al hacer pruebas se determinó que el mejor ángulo era de 40°. El sensor detecta el espectro de luz visible de manera correcta, una desventaja del sensor, ya que al aumentar el enfoque para visualizar el espectro de luz de manera más grande, este perdía la imagen por lo que se recomienda conseguir una cámara con una alta resolución que logra tener un acercamiento adecuado sin perder la claridad de la imagen, ya que la falta de resolución perdía intensidad al ser

observado mediante la cámara. Por esta razón el acercamiento se configuro de la manera mejor posible para evitar perdida de la intensidad.

El programa detecto de manera correcta las intensidades de los láseres, por lo que se determinó que si podía detectar espectros de manera correcta. Al hacer las pruebas, el sensor mostraba una imagen den la cámara lo que se determinaba como el espectro Raman, ya que los filtros eliminaban la luz que no se quería observar. Después de realizar pruebas, las lecturas captadas no eran muy significativas. Las pruebas que se fueron realizando mostraban mejores resultados, permitía la lectura de un espectro en las muestras analizadas. Al obtener las gráficas de los espectros, el corrimiento era nulo por lo que se llegó a la conclusión que no se estaba detectando el Raman de manera correcta.

Al obtener los espectros se pretendía observar los picos G, 2D y D, los cuales son característicos de los nanotubos de carbono, el resultado no tenía mucho corrimiento, ya que el sensor no podía detectar la luz Raman. Los nanotubos de carbono tienen mucho campo de investigación y tienen propiedades muy importantes que pueden ayudar a desarrollar nanotecnología dentro de la agroindustria, crear sensores que puedan detectar enfermedades, plagas, sustancias toxicas y control de agua pueden ser posibles investigan más a fondo este tipo de nanomateriales. Dentro de la Maestría en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Durango se desarrollaron sensores flexibles de nanotubos de carbono, lo cuales mediante espectroscopia Raman fueron analizados, en donde se obtuvo corrimiento en los picos G y 2D. Se comprobó que estos sensores pueden ser utilizados para el monitoreo de cambios morfológicos en plantas.

Consideramos que el resultado que se obtuvo fue muy bueno. Sin embargo, se recomienda que al utilizar filtros pasa-banda y pasa-altas, se compruebe el funcionamiento con un equipo especializado. Utilizar los filtros adecuados permitirían una mejor lectura de los espectros. El

sensor CMOS es muy importante debido a que la luz del espectrómetro Raman es muy débil, contar con un sensor que sea más sensible y con una mejor resolución a la hora de captar este tipo de espectro puede ayudar de manera significativa al diseño de este espectrómetro. Con la información obtenida y el trabajo realizado en este proyecto, crear un espectrómetro Raman con un costo más accesible es factible. Es necesario tomar en cuenta que el equipo debe de ser preciso para evitar errores en las mediciones, contar con un mejor sensor que pueda detectar el espectro Raman sería de gran ayuda.

Referencias

- Abu Bakar, N., & Shapter, J. G. (2023). Silver nanostar films for surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) of the pesticide imidacloprid. *Heliyon*, 9(3), e14686. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14686>
- Avila-Camacho, F. J., Moreno-Villalba, L. M., Cerón-Montes, G. I., Garrido-Hernández, A., Cardoso-Chávez, C. A., & Pacheco-Piña, C. J. (2021). Diseño de un espectrofotómetro UV-VIS de bajo costo para la industria bioquímica: Una Revisión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 9(Especial2), 19–28. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9iespecial2.7788>
- Bacon, C. P., Mattley, Y., & DeFrece, R. (2004). Miniature spectroscopic instrumentation: Applications to biology and chemistry. *Review of Scientific Instruments*, 75(1), 1–16. <https://doi.org/10.1063/1.1633025>
- Chávez-Hernández, J. A., Velarde-Salcedo, A. J., Navarro-Tovar, G., & Gonzalez, C. (2024). Safe nanomaterials: from their use, application, and disposal to regulations. *Nanoscale Advances*, 6(6), 1583–1610. <https://doi.org/10.1039/D3NA01097J>
- Feng, Y., Wang, X., Chang, Y., Guo, J., & Wang, C. (2022). Sensitive and handy detection of pesticide residue on fruit surface based on single microsphere surface-enhanced Raman spectroscopy technique. *Journal of Colloid and Interface Science*, 628, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.045>

- Fernández-Álvarez, M., Moure, A., Reinoso, J. J., Diz, E. L., & Fernández, J. F. (2024). New Protocol for Twinning of Raman Devices Toward a Raman Intensity Harmonization. *Applied Spectroscopy*, 78(8), 837–850. <https://doi.org/10.1177/00037028241260377>
- Godínez-García, F. J., Guerrero-Rivera, R., Martínez-Rivera, J. A., Gamero-Inda, E., & Ortiz-Medina, J. (2023). Advances in two-dimensional engineered nanomaterials applications for the agro- and food-industries. In *Journal of the Science of Food and Agriculture* (Vol. 103, Issue 11, pp. 5201–5212). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12556>
- Gómez Garzón, M. (2018). *de Medicina y Cirugía*. 27(2), 75–80. <https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27>
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. In *Nature* (Vol. 585, Issue 7825, pp. 357–362). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Khudoyberdieva, D., Otajonov, S., Eshchanov, B., Eshquvatov, H., & Abdullayev, N. (2024). Mechanisms of Raman scattering spectrum of light from pyridine molecule in the lower frequency range. *Results in Optics*, 16, 100685. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2024.100685>
- Kim, Y.-K., Qin, J., Baek, I., Lee, K.-M., Kim, S.-Y., Kim, S., Chan, D., Herrman, T. J., Kim, N., & Kim, M. S. (2023). Detection of aflatoxins in ground maize using a compact and automated

- Raman spectroscopy system with machine learning. *Current Research in Food Science*, 7, 100647. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100647>
- Klaine, S. J., Koelmans, A. A., Horne, N., Carley, S., Handy, R. D., Kapustka, L., Nowack, B., & von der Kammer, F. (2012). Paradigms to assess the environmental impact of manufactured nanomaterials. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31(1), 3–14. <https://doi.org/10.1002/etc.733>
- Kusnierek, K., Woznicki, T., & Treu, A. (2024). Quality control of wood treated with citric acid and sorbitol using a handheld Raman spectrometer. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139925. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139925>
- Li, Z., Deng, L., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2023). Raman spectroscopy of carbon materials and their composites: Graphene, nanotubes and fibres. In *Progress in Materials Science* (Vol. 135). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101089>
- Lira-Saldivar, R. H., Argüello, B. M., Villarreal, G. D. los S., & Reyes, I. V. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9–24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- Luque Ordóñez, J. (2017). *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*.
- Maia, L. F., Fernandes, R. F., Almeida, M. R., & de Oliveira, L. F. C. (2015). Rapid assessment of chemical compounds from *Phyllogorgia dilatata* using Raman spectroscopy. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 25(6), 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2015.09.002>
- mint. (2024). *Impresión 3D por descripción de material*. https://mintforpeople.com/noticias/tipos-impresion-3d/#Fused_Deposition_Modeling_FDM

- Monago-Maraña, O., Wold, J. P., Remberg, S. F., Sanden, K. W., & Afseth, N. K. (2024). Raman spectroscopy as a tool for characterisation of quality parameters in Norwegian grown apples during ripening. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 323, 124903. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124903>
- Nakajima, S., Kuroki, S., & Ikehata, A. (2023). Selective detection of starch in banana fruit with Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 401. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134166>
- Pulli, K., Baksheev, A., Korniyakov, K., & Eruhimov, V. (2012). Real-time computer vision with OpenCV. *Communications of the ACM*, 55(6), 61–69. <https://doi.org/10.1145/2184319.2184337>
- pyserial. (2020). *pySerial — pySerial 3.4 documentation*.
- Ramos, J. C., Villanueva Luna, A. E., & Ortiz Lima, C. M. (2013). Espectroscopia Raman y sus aplicaciones. *Optica Pura y Aplicada*, 46(1), 83–95. <https://doi.org/10.7149/OPA.46.1.83>
- Roseman, Mark. (2020). *Modern Tkinter for busy Python developers : quickly learn to create great looking user interfaces for Windows, Mac and Linux using Python's standard GUI toolkit*. Late Afternoon Press.
- Roy, M., & Prasad, A. (2022). Raman spectroscopy for nutritional stress detection in plant vascular tissue. *Materialia*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101474>
- Schmitt, M., & Popp, J. (2006). Raman spectroscopy at the beginning of the twenty-first century. *Journal of Raman Spectroscopy*, 37(1–3), 20–28. <https://doi.org/10.1002/jrs.1486>

- Triolo, P. A. M. (2024). Implementation of the diagnostic capabilities of the CMOS sensor in the NIR environment, using 1070 nm interference filter and a conventional IR-pass filters set. *Journal of Cultural Heritage*, 70, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.08.007>
- Vallejo-Pérez, M. R., Sosa-Herrera, J. A., Navarro-Contreras, H. R., Álvarez-Preciado, L. G., Rodríguez-Vázquez, Á. G., & Lara-ávila, J. P. (2021). Raman spectroscopy and machine-learning for early detection of bacterial canker of tomato: The asymptomatic disease condition. *Plants*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/plants10081542>
- Weng, S., Hu, X., Wang, J., Tang, L., Li, P., Zheng, S., Zheng, L., Huang, L., & Xin, Z. (2021). Advanced Application of Raman Spectroscopy and Surface-Enhanced Raman Spectroscopy in Plant Disease Diagnostics: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(10), 2950–2964. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c07205>
- Zhu, L., Chen, L., Gu, J., Ma, H., & Wu, H. (2022). Carbon-Based Nanomaterials for Sustainable Agriculture: Their Application as Light Converters, Nanosensors, and Delivery Tools. In *Plants* (Vol. 11, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants11040511>

Apéndice A: Programas desarrollados.



```

import cv2
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# ---- Parameters for Raman plots ----
green_pix = 480
red_pix = 1441

m_param = (650 - 520)/(red_pix - green_pix)

b_param = 650 - (m_param * green_pix)

laser_wlength = 520
# -----
# ---- Parameters for image ROI -----
min_x = 300
max_x = 1520

```

Apéndice A figura 1. Código de programa en Python
Fuente: Elaboración propia.

```

int pwm = 9; // Pin de salida 9
int DIR = 4; // Pin de salida 2
int STEP = 7; // Pin de salida 3

void setup() {
  pinMode(pwm, OUTPUT);
  pinMode(DIR, OUTPUT);
  pinMode(STEP, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    String datos = Serial.readStringUntil('\n'); // Lee los datos recibidos hasta el salto de línea
    int var1, var2, var3;
    sscanf(datos.c_str(), "%d,%d,%d", &var1, &var2, &var3); // Extrae los valores de las variables
    delay(5000);
    analogWrite(pwm, var1);
    delay(40000);

    digitalWrite(DIR, HIGH); // giro en sentido opuesto
    for(int i = 0; i < var2; i++){ // 200 pasos para motor de 1.8 grados de angulo de paso
      digitalWrite(STEP, HIGH); // nivel alto
      delay(var3); // por 10 mseg
      digitalWrite(STEP, LOW); // nivel bajo
      delay(var3); // por 10 mseg
    }
    delay(2000);
  }
}

```

Apéndice A figura 2. Código de programa en Arduino para control de motor e intensidad de láser.
Fuente: Elaboración propia.

```

class Interfaz(object):
    def __init__(self, master):
        global ax, line
        xy = 0.20
        window.geometry('940x450')
        window.configure(bg='beige', )
        window.title("Arduino")
        # -- Frames ---
        left_frame = Frame(window)
        left_frame.place(relx=0.03, rely=0.05, relwidth=0.25, relheight=0.9)

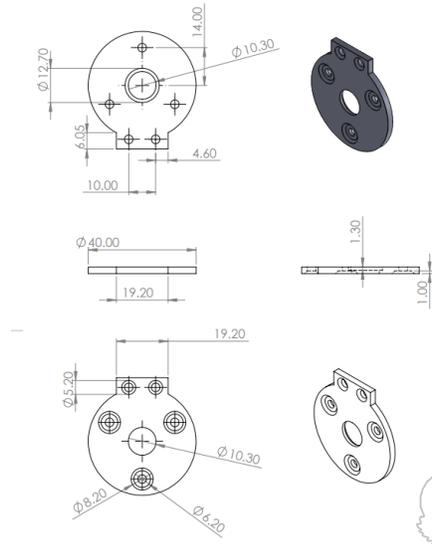
        right_frame = Frame(window, bg='#C0C0C0', bd=1.5)
        right_frame.place(relx=0.3, rely=0.05, relwidth=0.65, relheight=0.9)
        # -----
        btnp = Button(left_frame, text='Iniciar', bg="green", fg='green', command=iniciar)
        # btnp.place(x=9, y=9)
        btnp.place(rely=0.03,relwidth=1, relheight=xy)
        btna = Button(left_frame, text='Detener', command=apagar)
        btna.configure(bg='red', fg='green', )
        #btna.place(x=10, y=50)
        btna.place(rely=(0.15 + xy * 0.54),relwidth=1, relheight=xy)
        btng = Button(left_frame, text='Grafica', command=iniciarG)
        btng.configure(bg='red', fg='green', )
        # btng.place(x=10, y=150)
        btng.place(rely=3 * (0.15 + xy * 0.54),relwidth=1, relheight=xy)
        btns = Button(left_frame, text='Salir', command=salir)
        btns.configure(bg='red', fg='green', )
        # btns.place(x=10, y=100)

```

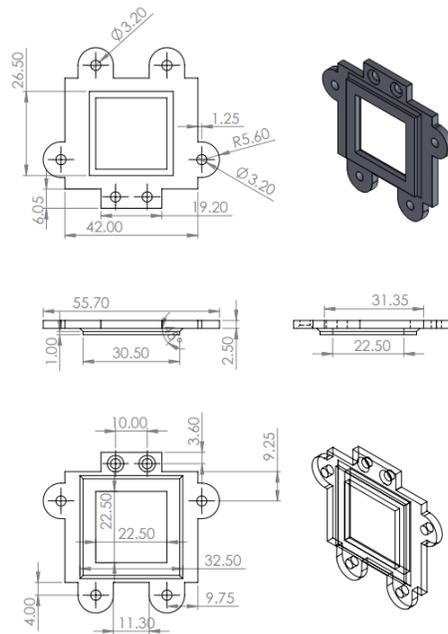
Apéndice A figura 3. Código de programa de interfaz gráfica.

Fuente: Elaboración propia.

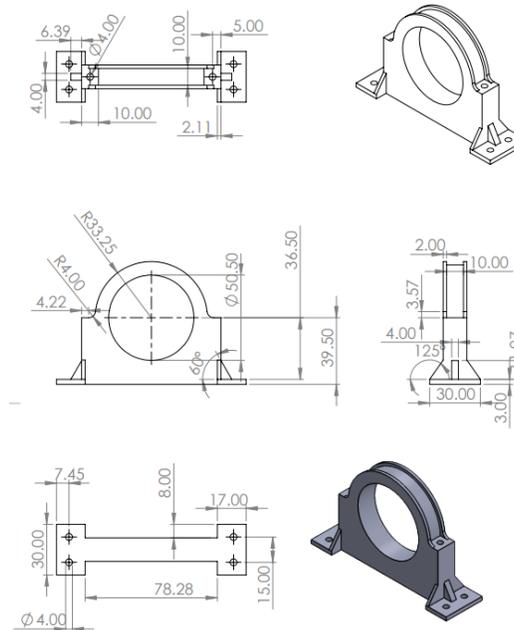
Apéndice B: Piezas diseñadas por computadora.



Apéndice B figura 1. Diseño de porta filtro.
Fuente: Elaboración propia.

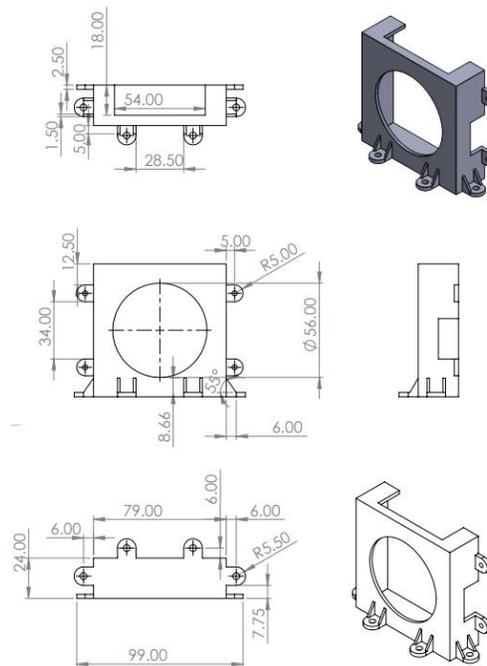


Apéndice B figura 2. Diseño de porta rejilla de difracción.
Fuente: Elaboración propia.



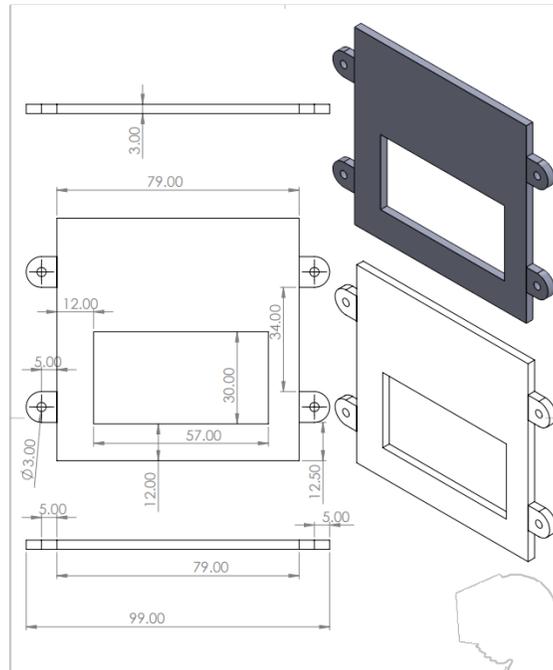
Apéndice B figura 3. Diseño de soporte de monóculo de cámara.

Fuente: Elaboración propia.

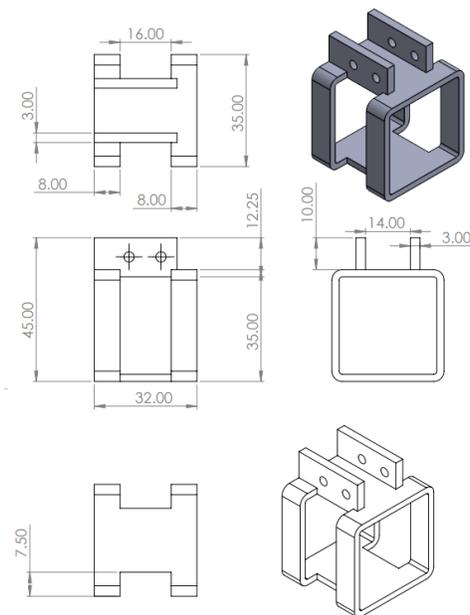


Apéndice B figura 4. Diseño de porta cámara parte delantera.

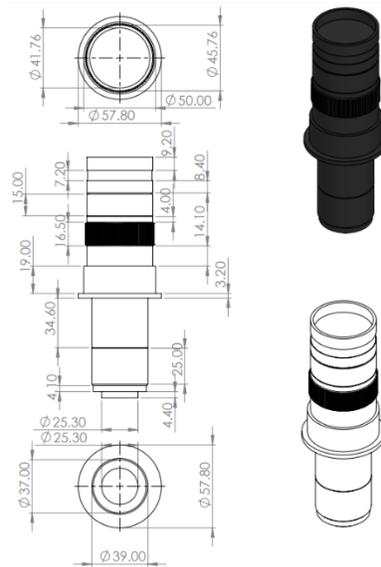
Fuente: Elaboración propia.



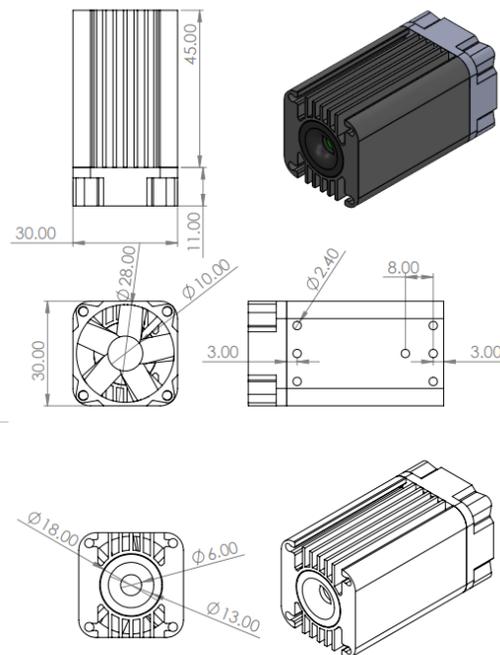
Apéndice B figura 5. Diseño de porta cámara parte trasera.
Fuente: Elaboración propia.



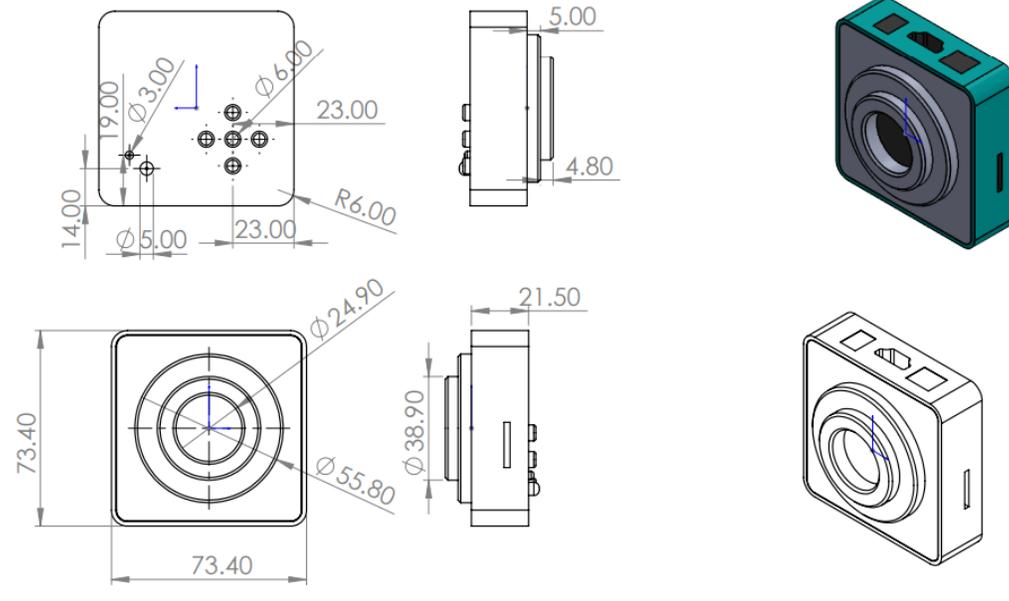
Apéndice B figura 6. Diseño de porta láser.
Fuente: Elaboración propia.



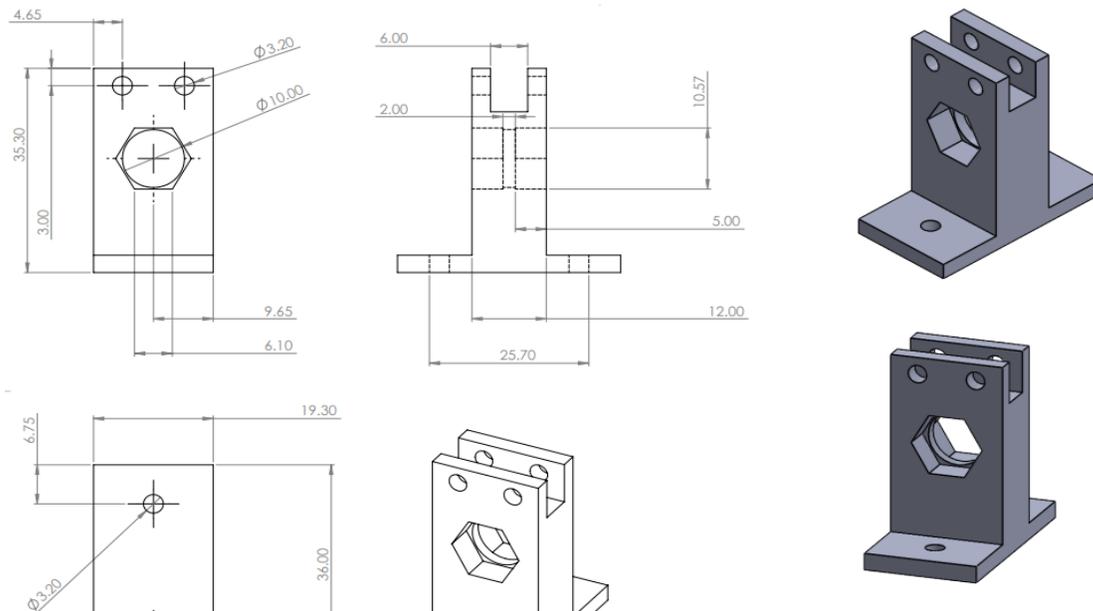
Apéndice B figura 7. Medidas de monóculo de cámara.
Fuente: Elaboración propia.



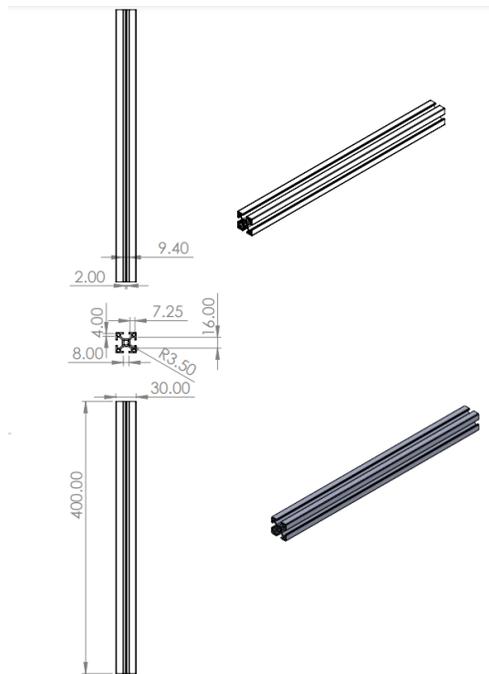
Apéndice B figura 8. Medidas de láser.
Fuente: Elaboración propia.



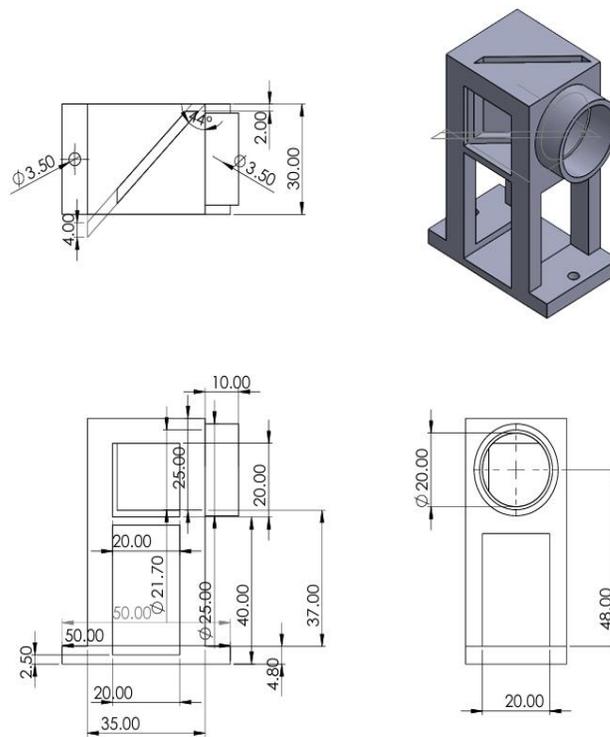
Apéndice B figura 9. Medidas de cámara.
Fuente: Elaboración propia.



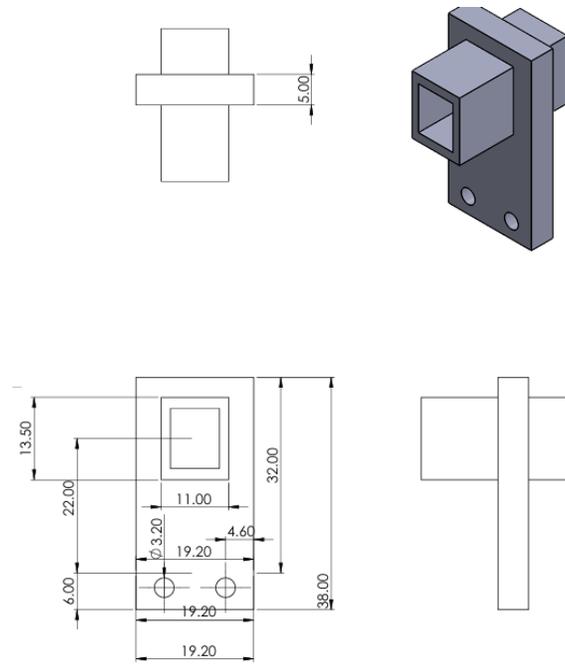
Apéndice B figura 10. Diseño de base para porta filtros y porta fibra óptica.
Fuente: Elaboración propia.



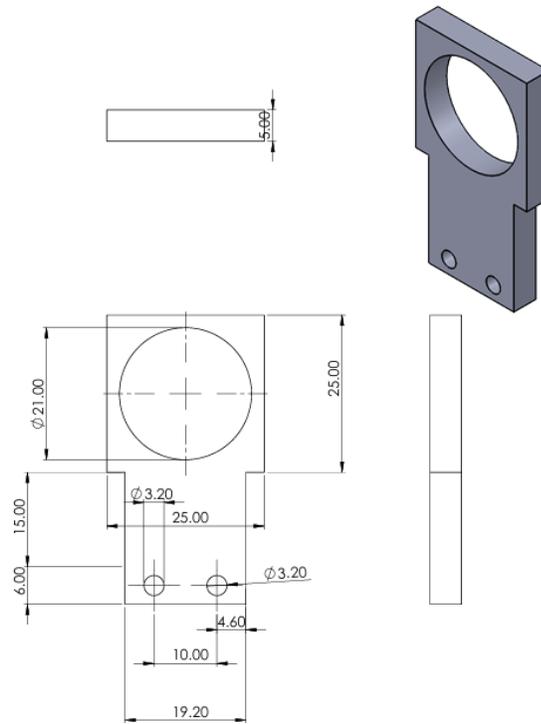
Apéndice B figura 11. Medidas de riel.
Fuente: Elaboración propia.



Apéndice B figura 12. Diseño de Porta muestra.
Fuente: Elaboración propia.



Apéndice B figura 13. Diseño de porta fibra óptica.
Fuente: Elaboración propia.



Apéndice B figura 14. Diseño de porta objetivo.
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice C: Artículo publicado.

Raman spectroscopy for carbon nanotubes-based flexible sensor instrumentation: a proof of concept

Manuel Carrillo-Velázquez

Division of Postgraduate Studies and Research.

TecNM / Instituto Tecnológico de Durango.

Durango, Dgo., México.

16040344@itdurango.edu.mx

Ignacio Villanueva-Fierro

Academia de Genómica.

Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR- Unidad Durango.

Durango, Dgo., México.

ifierro62@yahoo.com

Francisco J. Godínez-García

Division of Postgraduate Studies and Research, and Department of

Electrical/Electronics Engineering.

TecNM / Instituto Tecnológico de Durango.

Durango, Dgo., México.

fgodínez@itdurango.edu.mx

José A. Gómez-Elizalde

Division of Postgraduate Studies and Research.

TecNM / Instituto Tecnológico de

Durango.

Durango, Dgo., México.

16041278@itdurango.edu.mx

Eduardo Gamero-Inda

Division of Postgraduate Studies and Research, and Department of

Electrical/Electronics Engineering.

TecNM / Instituto Tecnológico de Durango.

Durango, Dgo., México.

egamero@itdurango.edu.mx

Josue Ortiz-Medina

Division of Postgraduate Studies and Research, and Department of

Electrical/Electronics Engineering.

TecNM / Instituto Tecnológico de Durango.

Durango, Dgo., México.

j.ortiz@itdurango.edu.mx

Abstract— This study reports on the use of Raman spectroscopy in combination with conventional amperometric measurements, for the characterization of mechanical deformations of single-walled carbon nanotubes based flexible sensors. The sensitivity of specific Raman spectroscopy features (i.e., G and 2D-bands) to the electronic environment in graphene-related nanomaterials, proved to be useful for the characterization of morphological changes in the fabricated flexible sensors, through the monitoring of changes in the associated currents in the percolating carbon nanotubes networks. Assessments on the detection of mechanical deformations, in the form of bending at determined angles, were carried out. The expected changes in electrical currents through the flexible sensor were observed, as well as significant responses in key Raman features, which could be used for complementary optical/spectral characterization of the morphological changes. The results suggest that Raman spectroscopy could be a useful and practical technique to complement conventional instrumentation approaches for nanomaterials-based devices, potentially providing additional information on the physical phenomena occurring at the nanoscale.

Keywords—carbon nanotubes, flexible sensor, Raman spectroscopy, instrumentation

I. INTRODUCTION

Innovative sensor technology is among the top areas where strong research and development activities are focused, and the use of nanostructured materials is currently fueling the development of advanced sensing devices [1], [2], [3]. Single walled carbon nanotubes (SWCNTs), which are a carbon-based 1-dimensional nanostructure, can be considered as constructed from a rolled graphene sheet, which present a set of interesting physical and chemical properties potentially useful for high-performance sensing devices. Several

examples of SWCNTs in advanced sensors have been reported, including sensors for different types of gases [4], [5], toxins in food [6], [7], explosives [8], radiation [9], etc. During the technical implementation of such devices, there are some alternatives which can exploit the interesting electronic and other physical properties of nanostructures. Amperometric and/or potentiometric measurements based on chemiresistive phenomena are, for instance, one of the most recurrent modes of operation for SWCNT- and other nanocarbons-based sensors [10]. Nevertheless, this technique used by itself is sometimes limited by the nature of the analyte under study, which interaction with the nanostructure surface or attached functional groups is to be detected.

The realization of practical nanosensing devices is thus suitable for the interaction of two or more fundamental methods of detection. There are examples of this in the literature; for example, the use of nanostructured substrates of doped graphene and carbon nanotubes (CNTs) for surface enhanced Raman spectroscopy (SERS) [11], [12]. Raman spectroscopy is a non-invasive and non-destructive technique, which is being extensively used given its practicality in the detection and identification of a wide variety of chemical compounds. It is based on the inelastic scattering of monochromatic light from the analyzed sample, and it can be integrated into devices with nanostructured substrates, which are necessary for the SERS phenomenon to occur [13]. These features make Raman spectroscopy attractive for advanced sensing and measurement not only of specific chemical species in nanostructured substrates, but also in applications that could harness its practicality for advanced instrumentation, by potentially detecting physical phenomena by measuring changes in the electronic nature of the material or device under analysis. Thus, in this work we explore the use of Raman spectroscopy, in conjunction with conventional amperometric measurements, for characterizing morphological changes in flexible sensors based on SWCNTs. We believe this could help to combine Raman spectroscopy with

This work was partially supported by the National Institute of Technology (TecNM, México) research grant 17375.23-P.



**Apéndice C figura 2. Reconocimiento al mejor artículo publicado en la conferencia ICSIMA 2024.
Fuente: Elaboración propia.**