

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**DETECCIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES EN ACEITES  
AISLANTES PARA TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS  
MEDIANTE UN SISTEMA FORMADOR DE IMÁGENES.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**PRESENTA:**

**GARCÍA DÍAZ FRANCISCO JAVIER**

**DIRECTORES DE TESIS:**

**DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL**

**DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO**

**SINODALES:**

**DR. J. JESÚS ESCOBEDO ALATORRE**

**DR. JOSÉ ANTONIO MÁRBÁN SALGADO**

**DR. EDGAR EDUARDO ANTÚNEZ CERÓN**

**DR. JONNY PAUL ZAVALA DE PAZ**

**DRA. PATRICIA PADILLA SOSA**

**CUERNAVACA, MORELOS**

**MAYO, 2023**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, 25 de abril de 2023.

**DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN**  
**COORDINADOR DEL POSGRADO**  
**EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: **DETECCIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES EN ACEITES AISLANTES PARA TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS MEDIANTE UN SISTEMA FORMADOR DE IMÁGENES**, que presenta el alumno **FRANCISCO JAVIER GARCÍA DÍAZ**, para obtener el título de **DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente  
*Por una humanidad culta*

**DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE**

**DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO**

**DR. EDGAR EDUARDO ANTÚNEZ CERÓN**

**DR. JONNY PAUL ZAVALA DE PAZ**

**DRA. PATRICIA PADILLA SOSA**

**DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL**

**DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO**

Se adiciona efirma UAEM



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**OMAR PALILLERO SANDOVAL | Fecha:2023-05-08 16:22:11 | Firmante**

WfW4oRRx00QJDyHwfgDbe4F19S5ozB3dqJYtajiQtXOO1spCxN+uS2pWzEniZiAe/xJ2r0ek1+HkD+XWRPqIAE0UY0kr9n4CN7BjX8LXV3uXOidSxbNxyzhKMfxZ+DmxG5B/RwNcjYLCVWxQa6mCxPohYnqsulXRDd+pEU8PLRiPbDUIMyzXaS2dAjyakiwGQCMT+VPjgzujmUTYdwGg3oFqmAO0tDjVKEbgu3mUGL+6uKnpNjW3LFP9iusVfPasG1XV7uUE TBupeTUw/M22BGM11vysSJe+XwpRgavDAboig+azxUrcXuISVXuCOZPhjvF6KIG07YiIDEYA==

**JONNY PAUL ZAVALA DE PAZ | Fecha:2023-05-08 16:23:10 | Firmante**

8J9E4IYVBM3WRRwTvm6kYbmA+x7M5aR9IzWY+1aaoawxvq27TexW71/cMEswpYOyzyldjyx/2AP+BPhSPhHMrYJMbSJeU6BsA6hgboRgwPm9pB62gwd/S6f/WYX1PZ4Ph i1TWXZ7/wXczr9eudNYZTkeolimxq67ml+Bjnxr03xoVfMx7FTD71JRkk46Zzmgv1xoSpXZdPRM+e+gM6yBFIFhcX/BQmQ7Rz3iTe770oJfu8EqYdyd9uLfguf1zdpjRVuDmO3J WYIUL nehSI1zxfuwlLcHEetAewfJXajeEUhfSfBRof8at6JmpBRUGuc2e434O5kLRHrB9ZGLKvEYA==

**J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2023-05-08 18:44:37 | Firmante**

WxvsQBeg23FCDBS5msSrKGuLL+pd6fOh/xnprElmXdbt3bceba2THk3W46mLWdne6zl33NWDlzVo7CGK5naUfx0T7X3jSfpK1rcNYPHs8oSg4V77UqBIQi6w+oPMvxLi+9b kGsBU4bTHDgSZakeLVY/IQ3G4EOjUf48ikQHc98AGVa8MsKqDyYzsvR9fKZEDSOzddWW9q/XkjjmJdVxbZWZ2M8DgMCCi6M5NuOQ2JTg+3LTxuvZBUGRetLwK3Z18f6 WKX6hg tptFJRTB8ey0An21udYv+kAsQaSF+CjRvUIDur280/xkl2v8sogiBtFDXaXDU8GjMgulpVUtA==

**MIGUEL ANGEL BASURTO PENSADO | Fecha:2023-05-08 21:09:49 | Firmante**

YkUBAKI2r4ltwxW8RoRrX+ur5evQQkhG7pQ8Ci30Ep/U7LIUhfVZkqWNIgjsNE3yaDNwPZUYvsB2RaHrjeWcqqzsj62k/OgpRHuv8MvJ1ZuTRG1A9qiMe7I6SjITWgz0P64U0k Dok5cgolEtg+xVjan+Vxo+3je7rmqHLhoni1SaZLz9RPuNE85Uvj3r+gld5PKguxkKg2k4eCo3qTkmZ+M7oA1GQf4u9r5gV59+ghghVTETdbQkaDN9yxjqp2AkK0wD5Xi/nCzy dbgFhx M8N6PGRuiPheak/SF6mxjVCxcl16eJNAoxTW60gw8TPMOGZqqPrl7nS+JltnLJA==

**EDGAR EDUARDO ANTUNEZ CERON | Fecha:2023-05-09 08:49:30 | Firmante**

K4Gec9NBMRaww/utabncsRwWmie4jfd97espa9zSpBeYFpN2TYqLyR+6KWYdm/4Y7s53A4sBaKIHbsUhtJGH+VSc0wwTb6dHTFiLQYTXSq6Elo77K3giAt2murE1CdGxxn2 6myZ+AQDsmRsO3KJs9nujraskZzMOONypYxT0gGwefmeyvzn+n2DijovTjv7UbOy8uFzpbzJjvD3mUub+ZcV8rUrOP2cabyJ22nKnEwV0ME/Nb01U02Wk2eP7sURAd3/XG jGtOP K5BwBvZs40liw8z+V7+g8QnqwepKAX6CW0V07XEBdxU5U7sMxi+BVYWF0YniH14p4RlunBVeg==

**JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2023-05-09 19:35:21 | Firmante**

IgmZyPCr1M5hyUfnsle2KD0gtbnV/4XFbcaka0VLnEjnuUBfvK3JGqV/3OAGblFgiXkr17XM6MiKe/Y1N51anZJCulGsAni1dKHm0Qu9CSuKdpQGJ9o3pHqwy/Pe/FcofZ3vMoc +UBukqCPpO5mkzx4dMo7p/gvX6u6hi3IFVpWfJGfvc4UCYB4UIGjHPC/Kc5V7T4kZb5pY/Qu9JillrZa+xVAj7sFDJgA3waPx7jE7wgSbvGGy0Xy2PiS2qmaR8vuO27bmRBUz sMB/L YNRPdEfc3wQVz/GyWjXlmtAvmAl73Yudq7Xp7jVEV9mBn4DQaO3uKsUXdbTLr+jmyA==

**PATRICIA PADILLA SOSA | Fecha:2023-05-16 17:31:52 | Firmante**

fqlJdJg3FydQ8J5xWL2wD+nsPgegwBYoMX/sKmx3Z1KrtJKnybltsvmdtb8+jxE0h/NUHxRPEGYaKvahovVajg7WDEwsvbuWGkN4R2jZO/Mc1RkBXs1qUUCp3TFC33xmu NFDQewMkYOHrk7iGyLVm5z2FicH1qw8HL+ZDM/0zOrxADEYLy9i9L9O2DuTFNe7OhCk5iQkZuVFGODRMJJ//pdJxBekkEFHyqtgohtl3c8jzQdk35rGcJFsv7TgnZ86s58hRR nAOA E/K2w5VJ0r0vMoNnRj00Tch5sXlccq/jtxN2Fic5gChOefx05mV58nOMR.JritlWkSdJWg==



Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

vNxc3dy9

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/N4WErpqOQLWhQy9BfQMjmiXvYenZw>



## RESUMEN

Se realizó un sistema formador de imágenes espectrales basado en una rejilla de difracción siendo utilizada una fibra óptica para el espectro visible. Primero se llevó a cabo un estudio de la formación de imágenes al utilizar una rejilla de difracción, en la que se obtuvo una expresión que nos permitió conocer el comportamiento que tendría el sistema. Así que se realizó una simulación para visualizar el comportamiento de la rejilla bajo ciertas condiciones de operación.

Más adelante se implementa el sistema formador de imágenes con elementos ópticos y en base a las características de la rejilla de difracción es montado y llevado a cabo diversas pruebas de caracterización para el sistema formador de imágenes espectrales. Primero mediante un objeto transparente (pinhole), después con el uso de LEDs comerciales, en la que permitieron conocer la operación de trabajo, en este caso la resolución del sistema, obteniendo un valor mínimo correspondiente a 0.26 nm.

Se llevó a cabo la implementación de la fibra óptica para el sistema formador de imágenes para determinar bajo qué condiciones es bueno utilizar la fibra óptica. Así que se tomaron pruebas con aceites aislantes (siendo utilizados tres llamados Fase A, B y C), para analizar el comportamiento que existe entre los bits (profundidad de color) que son representados en la imagen espectral y la temperatura en la que son sometidos, para posteriormente graficar y comparar las imágenes de acuerdo con y sin el uso de la fibra óptica. Así que fue obtenido una sensibilidad de 0.0018 bits/°C para un rango de 60°C a 20 °C para el aceite Fase B en 620 nm donde es la variación más pequeña obtenida, pero para un mayor rango de temperatura, se tiene de 75°C a 20°C con una sensibilidad de 0.0039 bits/°C, para el aceite Fase C de 460 nm. Cabe de resaltar que en el estado del arte es escasa la utilización de la fibra óptica para un sistema formador de imágenes espectrales, por lo que eso brinda un aspecto llamativo al sistema propuesto.

## **ABSTRACT**

A spectral imaging system based on a diffraction grating was made using an optical fiber for the visible spectrum. First, a study of the formation of images was carried out using a diffraction grating, in which an expression was obtained that allowed us to know the behavior that the system would have. So a simulation was carried out to visualize the behavior of the grid under certain operating conditions.

Later, the imaging system with optical elements is implemented and based on the characteristics of the diffraction grating, various characterization tests for the spectral imaging system are assembled and carried out. First through a transparent object (pinhole), then with the use of commercial LEDs, in which they allowed to know the work operation, in this case the resolution of the system, obtaining a minimum value corresponding to 0.26 nm.

The implementation of the optical fiber for the imaging system was carried out to determine under which conditions it is good to use the optical fiber. So, tests were carried out with insulating oils (three called Phase A, B and C being used), to analyze the behavior that exists between the bits (color depth) that are represented in the spectral image and the temperature in which they are subjected, to later graph and compare the images according to and without the use of fiber optics. Thus, a sensitivity of 0.0018 bits/°C was obtained for a range from 60°C to 20°C for Phase B oil at 620 nm, where it is the smallest variation obtained, but for a greater temperature range, it is 75°C to 20°C with a sensitivity of 0.0039 bits/°C, for the 460 nm C Phase oil. It should be noted that in the state of the art the use of fiber optics for a spectral imaging system is scarce, so this provides a striking aspect to the proposed system.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a CONACYT por el apoyo económico durante la trayectoria académica en los estudios de doctorado.

También quiero agradecer a mis asesores Dr. Omar Palillero Sandoval por el tiempo, apoyo, conocimientos y observaciones en el desarrollo de mi tesis, por lo cual estaré muy agradecido con él. Asimismo al Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado por brindarme consejos, apoyo y contribuir en la tesis, que gracias a sus observaciones de cada presentación, eso me ayudaba a mejorar cada vez más mi desempeño al exponer mi tesis. De igual modo, agradecer al Dr. José Marbán Salgado que formo parte del comité tutorial y de haber tenido la oportunidad de cursar una asignatura bajo su tutela, la cual me permitió conocer más sobre el desarrollo de mi tesis. También del mismo modo, al Dr. Jesús Escobedo Alatorre que tuve la oportunidad de cursar una asignatura impartida por él en la Maestría, y que me brindó bases importantes en el desarrollo de mi tesis y al Dr. Jonny Zavala de contar con sus observaciones en cada tutorial presentado para tener un buen trabajo de tesis.

Por último agradecer a mis compañeros de clase Wassila, Ulises, Uriel, Alejandra y Reyna que compartimos momentos en diversas clases en las que coincidimos y trabajamos juntos y nos apoyamos para salir adelante en los cursos. También agradecer el tiempo y consejos con los compañeros de laboratorio Pablo, Héctor, Alan, Salvador, Martín y Mireya, que con ella compartimos varios momentos para apoyarnos desde que ingrese a la Maestría y estaré agradecido por los consejos y apoyo en esta etapa académica.

## ÍNDICE

Resumen .....	I
Abstract.....	II
Agradecimientos .....	III
Lista de Tablas.....	VII
Lista de Figuras .....	VIII
CAPÍTULO 1 Introducción .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Hipótesis .....	2
1.4 Objetivos .....	3
1.5 Resultados esperados .....	3
CAPÍTULO 2 Estado del arte .....	4
2.1 Imagen espectral .....	4
2.2 Detección de imágenes espectrales .....	5
2.3 Campo de investigación de los sistemas formadores de imágenes.....	8
CAPÍTULO 3 Marco teórico .....	18
3.1 Óptica .....	18
3.2 Lentes .....	19

3.2.1 Lente convergente .....	21
3.2.2 Lente divergente .....	21
3.2 Fibras ópticas.....	22
3.3.1 Estructura básica de la fibra óptica .....	23
3.2.2 Propagación de la luz en la fibra óptica .....	23
3.3.3 Abertura numérica .....	26
3.3.4 Tipos de fibra óptica.....	27
3.3.5 Fibras multimodo con salto de índice.....	28
3.3.6 Fibras multimodo con índice gradual .....	28
3.3.7 Fibras monomodo .....	29
3.3.8 Fibras ópticas de plástico.....	30
3.4 Difracción .....	32
3.4.1 Difracción de una ranura.....	32
3.4.2 Interferencia y difracción combinadas en una ranura doble .....	34
3.4.3 Rejillas de difracción .....	36
3.4.4 Estudio de una rejilla de Bragg .....	37
CAPÍTULO 4 Desarrollo de la metodología .....	39
4.1 Estudio generalizado de un sistema formador de imágenes .....	39

4.2 Análisis matemático .....	42
4.2.1 Modelo de formación de imágenes .....	43
4.3 Análisis numérico .....	50
4.3.1 Filtro Notch.....	51
4.4 Desarrollo experimental del sistema formador de imágenes.....	53
CAPÍTULO 5 Resultados y discusión .....	57
5.1 Pruebas preliminares .....	57
5.2 Caracterización con objeto transparente .....	58
5.3 Caracterización con objetos opacos (LED verde y LED rojo) .....	62
5.4 Caracterización de aceites.....	65
5.5 Caracterización de aceites con el uso de la fibra óptica .....	71
5.6 Discusión .....	75
CAPÍTULO 6 Conclusiones y recomendaciones.....	77
6.1 Recomendaciones .....	81
Referencias.....	83
Anexo: Artículo de investigación .....	90

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 5.1 Resultados experimentales para la obtención de imágenes espectrales .....	59-60
---	-------

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ejemplificación del estudio de las imágenes espectrales. ....	4
Figura 2.2 Métodos, aplicaciones y estudios generalizados de la detección de imágenes espectrales .....	7
Figura 2.3 Diagrama esquemático de un sistema para el análisis de polarización espectral de imágenes. 1) Objeto, 2) Lente de entrada, 3) Iris stop, 4) Celda acústo-óptica, 5) Convertidor piezoeléctrico, 6) Pantalla, 7) Lente de salida y 8) Arreglo de CCD. ....	8
Figura 2.4 Difracción por un Modulador acústo-óptico y formación de imagen por lente.....	9
Figura 2.5 Configuración experimental de un modulador acústo-óptico.....	9
Figura 2.6 Esquema experimental del láser de fibra de modo-bloqueo para lo cual se incorporó un Modulador Acústo-Óptico (AOM).....	10
Figura 2.7 Esquema de un multiplexor de fibra óptica Acústo-óptico .....	11
Figura 2.8 Configuración experimental para holografía digital .....	12
Figura 2.9 Montaje del sistema holográfico basado en interferómetro Mach-Zehnder .....	13
Figura 2.10 Arreglo experimental del dispositivo AO. ....	14
Figura 2.11 Diagrama esquemático para imágenes hiperespectrales. ....	15
Figura 2.12 Configuración para un microscopio de modulación focal. (BS Divisor de haz, AOM Modulador acústo-óptico, PD Fotodetector, L Lente, PMT Tubo fotomultiplicador, DM Espejos deformables, R1 y R2 Retroreflectores). ....	16

Figura 2.13 Diagramas de flujo que muestran la ruta de procesamiento de la señal. ....	17
Figura 3.1 Clasificación de las lentes.....	19
Figura 3.2 a) Lentes delgadas convergentes. b) Lentes delgadas divergentes. ....	20
Figura 3.3 Rayos paralelos llegan a un foco por medio de una lente delgada convergente. ....	21
Figura 3.4 Lente divergente. ....	22
Figura 3.5 Partes básicas de la fibra óptica. ....	23
Figura 3.6 Reflexión y refracción de una onda incidente. ....	24
Figura 3.7 Ángulo límite de entrada ....	25
Figura 3.8 Cono de aceptación de luz. ....	27
Figura 3.9 Clasificación general de las fibras ópticas. ....	27
Figura 3.10 Modos de propagación de la luz en una fibra multimodo con salto de índice. ....	28
Figura 3.11 Modos de propagación de la luz en una fibra multimodo con índice gradual.. ....	29
Figura 3.12 Modo de propagación de la luz en una fibra monomodo. ....	30
Figura 3.13 Difracción de una ranura.....	33
Figura 3.14 Patrón de difracción de una ranura.....	34
Figura 3.15 Interferencia y difracción de una ranura doble.....	35

Figura 3.16 Espectro de una rejilla de difracción.....	37
Figura 3.17 Rejilla de Bragg. ....	38
Figura 3.18 Modulación de una rejilla de Bragg .....	38
Figura 4.1 Esquema general del sistema formador de imágenes.....	39
Figura 4.2 Distancias del sistema formador óptico de imágenes.....	40
Figura 4.3 Sistema formador óptico de imágenes.....	40
Figura 4.4 a) Representación gráfica de una función coseno. b) Representación en imagen de la función coseno en dos dimensiones.....	42
Figura 4.5 a) Representación gráfica de una función rectangular periódica. b) Representación en imagen de la función rectangular periódica en dos dimensiones.....	43
Figura 4.6 Modelo de un sistema de imágenes. ....	43
Figura 4.7 Función rectangular. ....	46
Figura 4.8 a) Imágenes espectrales. b) Objeto de prueba. c) Función pupila. ....	50
Figura 4.9 a) Transformada de Fourier de la función pupila para 5 órdenes de difracción. b) Gráfica de perfil de intensidad de la función pupila (derecha)..	51
Figura 4.10 Filtro Notch en 3D (izquierda) y 2D (derecha). ....	52
Figura 4.11 Imágenes espectrales individuales de cada orden de difracción obtenido. ....	52
Figura 4.12 Imágenes espectrales individuales centradas de los órdenes de difracción. ....	53

Figura 4.13 Configuración óptica del sistema formador de imágenes, 1. Plano objeto, 2.Sistema óptico, 3. Rejilla de difracción, 4.Primer orden de difracción, 5. Plano imagen espectral. ....	53
Figura 4.14 Patrón de difracción de una red de difracción.....	54
Figura 4.15 Desplazamiento mecánico en la detección óptica. ....	56
Figura 4.16 Montaje experimental real del sistema formador de imágenes..	56
Figura 5.1 Pruebas preliminares del sistema formador de imágenes. a) Orden cero de difracción, b) Primer orden de difracción.....	57
Figura 5.2 Espectro de la fuente de luz. ....	57
Figura 5.3 Imágenes espectrales a un desplazamiento de 5 mm .....	58
Figura 5.4 Espectros del objeto de prueba (abertura del diafragma).....	59
Figura 5.5 Imágenes espectrales a un desplazamiento de 1 mm .....	61
Figura 5.6 Espectros del objeto de prueba (abertura del diafragma) .....	62
Figura 5.7 Imagen del Led Verde y su espectro 560.9782 nm. ....	62
Figura 5.8 Imágenes espectrales del LED verde. ....	63
Figura 5.9 Imagen del Led Rojo y su espectro 632.3578 nm.....	64
Figura 5.10 Imágenes espectrales del objeto (LED rojo). ....	65
Figura 5.11 Aceites aislantes de muestra de un transformador eléctrico.....	66
Figura 5.12 Espectro de cada aceite aislante. ....	66
Figura 5.13 Calentamiento y medición de temperatura del aceite. ....	67

Figura 5.14 Espectro de cada aceite aislante sometido a una determinada temperatura a) Aceite de Fase A. b) Aceite de Fase B. c) Aceite de Fase C. .... 67

Figura 5.15 a) Celda donde es colocada cada muestra de aceite. b) Espectro de la celda a 460 nm, 540 nm y 620 nm respectivamente ..... 68

Figura 5.16 Imágenes espectrales del aceite Fase A con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm ..... 69

Figura 5.17 Imágenes espectrales del aceite Fase B con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm..... 69

Figura 5.18 Imágenes espectrales del aceite Fase C con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm ..... 70

Figura 5.19 Implementación de la fibra óptica de plástico al sistema formador de imágenes. a) La celda (muestra de aceite) se encuentra entre la fuente de luz y la fibra óptica. b) Fibra óptica colocada antes del sistema formador de imágenes y después de la celda. c) El sistema formador de imágenes recibirá información (imagen) de parte de la fibra óptica. d) Visualización del espectro de la celda con el uso de la fibra óptica a 460 nm, 540 nm y 620 nm respectivamente..... 71

Figura 5.20 Imágenes espectrales del aceite Fase A con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm utilizando la fibra óptica..... 72

Figura 5.21 Imágenes espectrales del aceite Fase B con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm utilizando la fibra óptica..... 72

Figura 5.22 Imágenes espectrales del aceite Fase C con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm utilizando la fibra óptica..... 73

Figura 5.23 Gráficas del comportamiento de Temperatura-Bits (profundidad de color) de la Fase A del aceite aislante con la fibra óptica. a) 460 nm. b) 540 nm. c) 620 nm ..... 74

Figura 5.24 Gráficas del comportamiento de Temperatura-Bits (profundidad de color) de la Fase B del aceite aislante con la fibra óptica. a) 460 nm. b) 540 nm. c) 620 nm ..... 74

Figura 5.25 Gráficas del comportamiento de Temperatura-Bits (profundidad de color) de la Fase C del aceite aislante con la fibra óptica. a) 460 nm. b) 540 nm. c) 620 nm ..... 75

## **1. CAPÍTULO 1 Introducción**

En un sistema formador de imágenes con luz incoherente, el análisis de imágenes espectrales es de gran importancia debido al gran contenido de información que se puede obtener. Una imagen espectral de un objeto es aquella que reproduce la imagen de un objeto en función de una longitud de onda perteneciente al espectro visible.

Ha habido un gran interés considerable en la investigación de fenómenos ópticos que tienen lugar en medios cristalinos, debido esto a la formación de imágenes espectrales. En la actualidad, se ha convertido en un tema relacionado con la cristalografía y la espectroscopia.

Un medio utilizado para los diferentes sistemas formadores de imágenes es la rejilla de difracción, un componente óptico que se utiliza para propagar la luz dentro de un espectro. En realidad, la rejilla de difracción es un espejo con miles de líneas paralelas, surcos, o grabados en su superficie. Las líneas deben estar en uno en uno y con los mismos intervalos, llamado esto como período de rejilla. Cuando se presenta incide un frente de onda plana, ésta se refleja desde la rejilla a varios ángulos determinados por el período de rejilla y la longitud de onda incidente. Los ángulos de difracción están determinados por la condición de coincidencia de fase para las reflexiones de surcos adyacentes.

### **1.1 Planteamiento del problema**

El análisis de imágenes espectrales es llevado cabo mediante dispositivos como los microscopios electrónicos, interferómetros, sistemas ultrasónicos o sistemas acusto-ópticos, el cual brindan una alternativa en el campo de procesamiento de imágenes mediante el espectro de objetos en cuestión, pero no se encuentran dispositivos o es muy escaso el estudio de

investigación donde sea utilizado la fibra óptica. Ya que el uso de fibras ópticas permitiría como medio para la recopilación de información en imágenes.

## **1.2 Justificación**

De acuerdo a lo comentado anteriormente, cabe resaltar que el uso de las fibras ópticas, son elementos ópticos que no generan chispas, no se ven afectados por campos magnéticos, no conducen electricidad y no generan calor, por lo cual pueden ser muy bien utilizados en lugares que generan vapores explosivos o corrosivos. En el mercado industrial e investigación científica no se encuentra un sistema formador de imágenes con las características que se desean diseñar; sistema óptico formador de imágenes basado en fibras ópticas.

Se propone un dispositivo que permita la obtención de imágenes hiperespectrales que brindan información a diferentes frecuencias (o longitudes de onda) para determinar la calidad o comportamiento de los aceites aislantes basado con el principio de la formación de imágenes con el uso de una rejilla de difracción, siendo utilizado la fibra óptica como medio, por lo que se tendría la ventaja de trabajar en depósitos abiertos o cerrados.

## **1.3 Hipótesis**

Basado en el funcionamiento de un sistema óptico formador de imágenes debe ser posible para la fibra óptica permitir visualizar el espectro de una muestra.

## **1.4 Objetivos**

El objetivo general del trabajo de investigación es:

- Proponer un sistema formador de imágenes que clasifique el espectro de imágenes del aceite aislante, pertenecientes al ancho de banda del espectro visible, usando fibra óptica para iluminación y detección.

Con lo que respecta a los objetivos específicos corresponden:

- Estudio de la teoría de difracción de la luz usando rejillas aplicadas a la formación de imágenes.
- Caracterizar un sistema formador de imágenes en el espectro visible.
- Desarrollar un sistema de iluminación-detección basado en fibra óptica para la clasificación del espectro del objeto (aceite aislante).

## **1.5 Resultados esperados**

- Modelo matemático y numérico del sistema formador de imágenes utilizando una rejilla de difracción.
- Caracterización del sistema formador de imágenes en el espectro visible.
- Implementación del sistema óptico formador de imágenes con la fibra óptica.

## 2. CAPÍTULO 2 Estado del arte

### 2.1 Imagen espectral

El análisis de imágenes espectrales es de gran importancia debido al gran contenido de información que está puede obtenerse respecto al tipo de captura de imágenes con luz blanca. Una imagen espectral es aquella que reproduce la figura de un objeto en función de la longitud de onda que esté reflejando (o emitiendo) el objeto en cuestión [1]. También la imagen espectral es un tipo especial de imagen en la que cada píxel contiene un muestreo fino del espectro que abarca desde el visible al infrarrojo cercano [2].

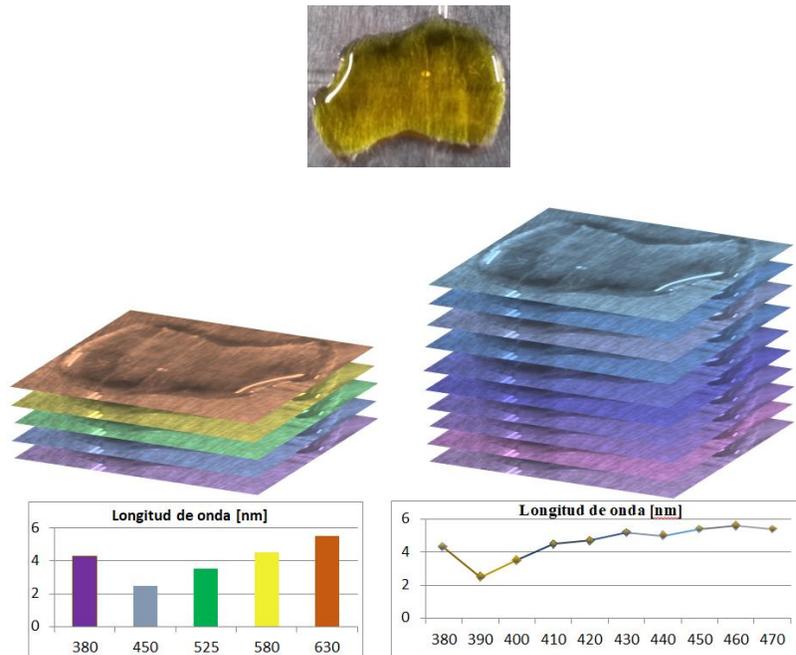


Figura 2.1 Ejemplificación del estudio de las imágenes espectrales.

Para el caso de una imagen hiperespectral, radica que es una imagen que tiene varias bandas espectrales de información a través de todo el espectro electromagnético o dependiendo del ancho que se desea analizar [3]. Además, una imagen hiperespectral puede ser considerada como un cubo de imagen donde la tercera dimensión es representada por cientos de bandas espectrales contiguas, en la Figura 2.1 se puede visualizar un ejemplo de la manera en cómo se trabajan con las imágenes hiperespectrales. Como resultado, un píxel hiperespectral es en realidad un vector columna con dimensiones iguales al número de bandas espectrales. Tal información entre banda es muy útil y es usado para la caracterización espectral [4-8].

## **2.2 Detección de imágenes espectrales**

Se han desarrollado diversos trabajos de investigación, los cuales corresponden a estudios y técnicas en la obtención de imágenes espectrales, análisis numérico, y el procesamiento de imágenes espectrales [9-13], siendo los sistemas acusto-ópticos los más utilizados, ya que ha habido un gran interés considerable en la investigación de fenómenos acusto-ópticos que tienen lugar en medios cristalinos, pues la acusto-óptica se encarga de la difracción de la luz por medio de ondas acústicas en los cristales. [14-19].

Otro componente utilizado en el estudio de obtención de imágenes espectrales es la rejilla de difracción. Una rejilla de difracción es un componente óptico que se utiliza para propagar la luz dentro de un espectro. En realidad, la rejilla de difracción es un espejo con miles de líneas paralelas, surcos, o grabados en su superficie. Las líneas deben estar en uno en uno y con los mismos intervalos, llamado esto como período de rejilla. Cuando se presenta incide un frente de onda plana, ésta se refleja desde la rejilla a varios ángulos determinados por el período de rejilla y la longitud de onda

incidente. Los ángulos de difracción están determinados por la condición de coincidencia de fase para las reflexiones de surcos adyacentes [20]. Las rejillas se utilizan para esparcir la luz por la longitud de onda y medir la dependencia de la longitud de onda de la intensidad de la luz. Por lo tanto, la resolución de longitud de onda es el parámetro de interés. Esto es conocido como una aproximación de campo lejano, conocido como campo de Fraunhofer y la resolución de longitud de onda está determinada por dos factores: la divergencia de longitud de onda, que es debido a la difracción, y la divergencia de difracción, debido al tamaño limitado del frente de onda [21].

Las técnicas mencionadas anteriormente permiten un estudio especializado en diversas aplicaciones en el análisis de imágenes espectrales, tales como el diagnóstico de muestras biológicas, estudios de corrosión, clasificación de alimentos u objetos en base a la colorimetría, segmentación de objetos, estudios de monitoreo de análisis de vegetación y suelos (teledetección), etc. [22-32].

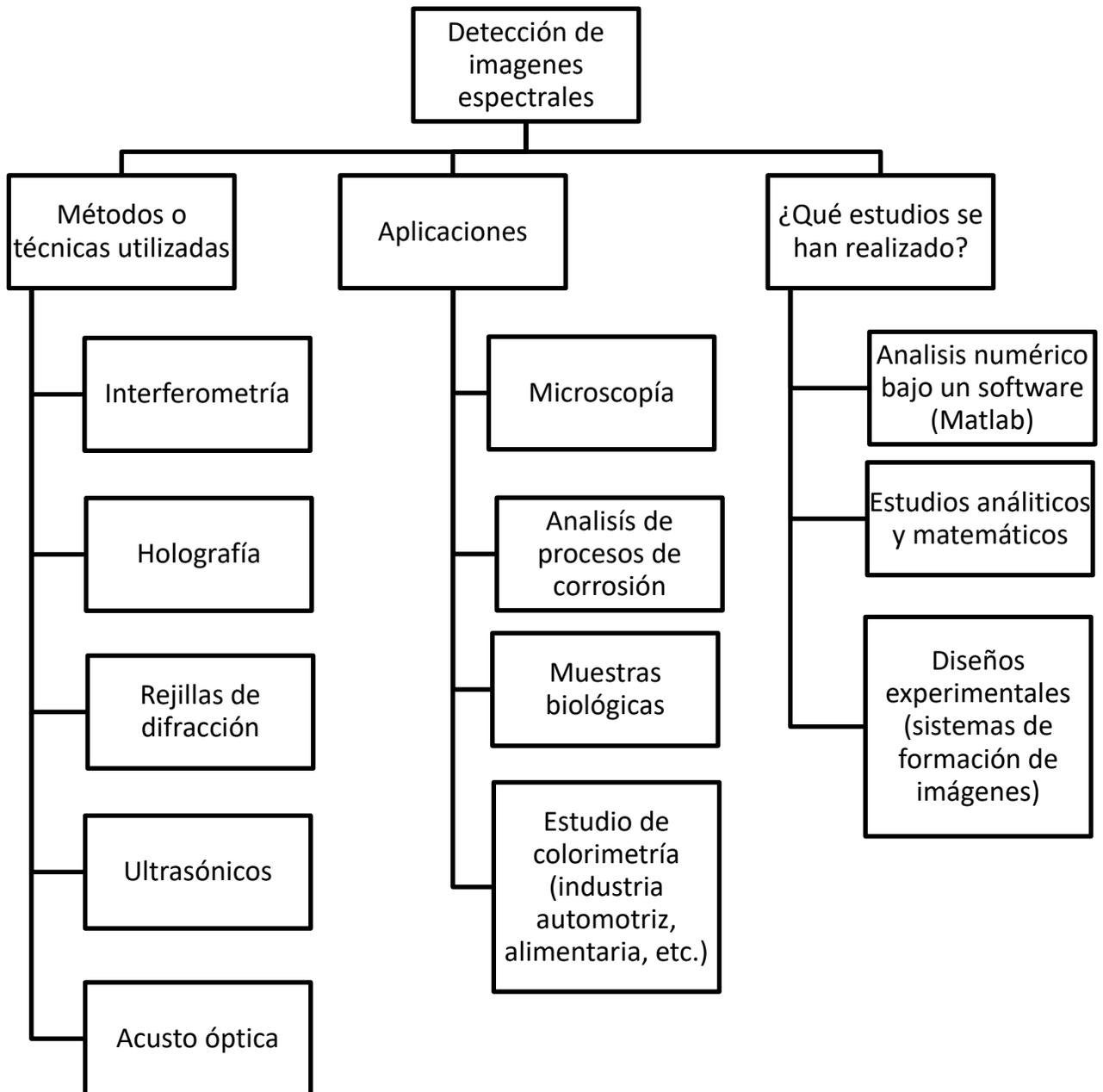


Figura 2.2 Métodos, aplicaciones y estudios generalizados de la detección de imágenes espectrales.

## 2.2 Campo de Investigación de los sistemas formadores de imágenes

En el ámbito de la investigación se presentan diferentes trabajos donde es predominante el uso de sistemas acusto-ópticos para la obtención de imágenes espectrales, a continuación se muestran varios trabajos de esta índole:

El artículo “Acoustooptical method of spectral–polarization image analysis” menciona un sistema de análisis de imagen espectral y de polarización, basado en un filtro acústico-óptico sintonizable. El cual es usado una geometría de difracción de Bragg especial para la cual las componentes polarizadas ortogonalmente del campo de luz se dispersan en los órdenes opuestos de difracción. La grabación simultánea de los órdenes de difracción se usa para comparar las intensidades de los haces con diferentes polarizaciones. Así que un sistema acústico-óptico espectral procesa imágenes en tiempo real y que es capaz de registrar la polarización de la radiación incidente. En el sistema se utilizan un filtro acústico-óptico ajustable y dos cámaras CCD (dispositivos que captan la luz y forman una imagen a partir de ella.), lo que permite registrar simultáneamente haces polarizados ortogonalmente en la salida de la celda acústico-óptica. [33]

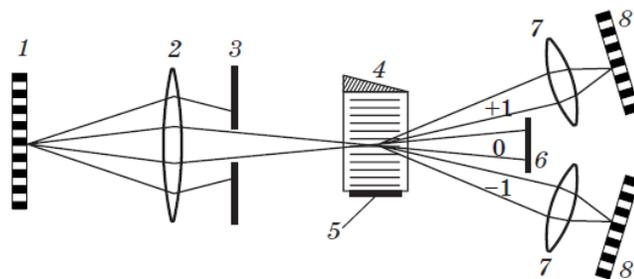


Figura 2.3 Diagrama esquemático de un sistema para el análisis de polarización espectral de imágenes. 1) Objeto, 2) Lente de entrada, 3) Iris stop, 4) Celda acústico-óptica, 5) Convertidor piezoeléctrico, 6) Pantalla, 7) Lente de salida y 8) Arreglo de CCD. [33]

También se presenta un simple sistema de procesamiento de imágenes ópticas para mejorar los bordes, que es titulado como “Image edge enhancement by Bragg diffraction”. El sistema consiste en una sola lente de imagen y un modulador acústico-óptico. La mejora del borde de la imagen se logra mediante la difracción de Bragg. Los resultados experimentales y de simulación son hechos por computadora. [34]

La Figura 2.4 muestra como son formadas las imágenes mediante un modulador acústico-óptico.

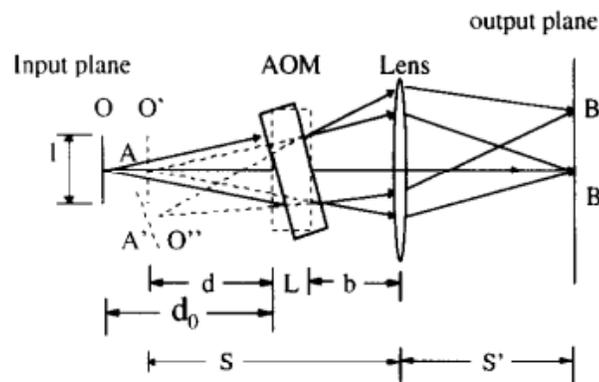


Figura 2.4 Difracción por un Modulador acústico-óptico y formación de imagen por lente. [34]

En la siguiente Figura 2.5, se visualiza el arreglo experimental que permitió desarrollar el sistema de procesamiento de imágenes. [34]

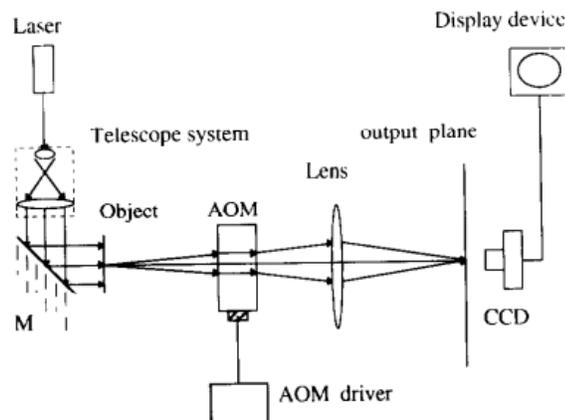


Figura 2.5. Configuración experimental de un modulador Acústico-óptico. [34]

Ahora se presenta un trabajo en donde está involucrado el uso de fibras ópticas, que lleva el título el artículo como “All-fiber acousto-optic modulator based on a cladding-etched optical fiber for active mode-locking”, y muestra experimentalmente un modulador acústico-óptico (AOM) totalmente de fibra, que presenta una estructura compacta y un voltaje bajo de conducción, para el bloqueo de modo activo de un láser de fibra. La propuesta del modulador acústico-óptico se basa en la corta longitud de la fibra grabada al revestimiento, cuyos extremos están fijados sobre un cristal deslizante. Encima de la fibra grabada al revestimiento, se superpuso un transductor piezoeléctrico. [35]

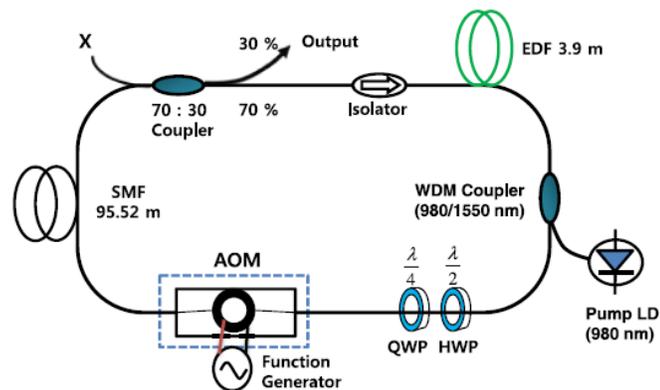


Figura 2.6. Esquema experimental del láser de fibra de modo-bloqueo para lo cual se incorporó un Modulador Acústico-Óptico (AOM). [35]

El dispositivo fabricado exhibió una profundidad de modulación del 73,10% a una frecuencia acústica de 918,9 kHz y un voltaje eléctrico de pico a pico de 10 V, mientras que un rayo láser se acopló a 1560 nm. Es usado el modulador acústico-óptico dentro de una cavidad anular de fibra dopada con erbio, los pulsos modos-bloqueados con un ancho temporal de 2.66 ps se obtuvieron fácilmente a una velocidad de repetición de 1.838 MHz. [35]

El trabajo titulado “Fiber-Optic Switch-Multiplexer based on Acousto-Optic Modulators”, se desarrolla la investigación de un nuevo multiplexor acústico-óptico para sistemas de comunicación de fibra óptica. El dispositivo se basa

en el efecto acusto-óptico, que consiste en la difracción de Bragg de múltiples haces de alta eficacia, que permite la conmutación óptica y multiplexación acústica. En comparación con otros dispositivos similares, el multiplexor de conmutador acústico óptico es capaz de transmitir señales ópticas no solo a cualquiera de los canales de salida, sino también a cualquier grupo de canales simultáneamente.

El principio de funcionamiento de AOSM se muestra en la Figura 2.7. El haz de luz inicial, es emitido por la fibra de entrada y es colimado por la lente en la superficie de entrada del modulador AO. La apertura del haz se denota por  $D$ . Una rejilla ultrasónica difracta el haz inicial por el ángulo, proporcional a la frecuencia ultrasónica, la longitud de onda de la luz y la velocidad del sonido. La lente enfoca los haces difractados en la matriz de las fibras de salida. [36]

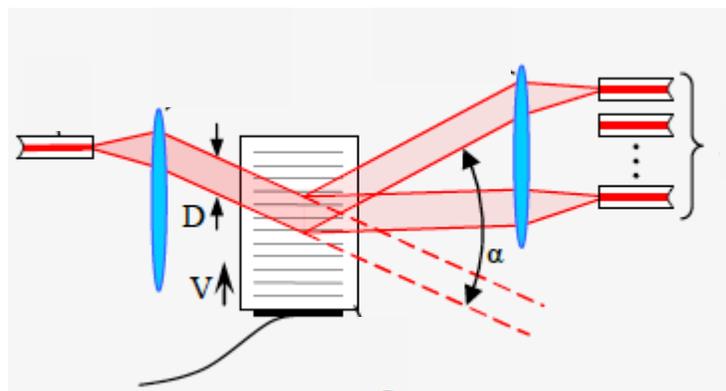


Figura 2.7. Esquema de un multiplexor de fibra óptica Acusto-óptico. [36]

Otro trabajo de estudio es la “Cuantificación de la formación de productos de corrosión sobre una muestra de cobre por microscopía holográfica digital”. La Holografía digital es una técnica que permite almacenar información de frentes de onda y mediante la teoría de difracción realiza la reconstrucción numérica (3D) de dichos frentes de onda. En este trabajo se presenta la implementación de la Microscopía Holográfica Digital para el monitoreo de un proceso electroquímico de corrosión, permitiendo realizar la reconstrucción superficial de la muestra en diferentes etapas del proceso de corrosión.

La configuración experimental que se muestra en la Figura 2.8 se basa en un interferómetro Mach-Zehnder modificado; un haz óptico amplificado y colimado emitido desde un láser de He-Ne de baja potencia se divide en dos haces de igual intensidad (señal de referencia y de objeto). La señal del objeto se enfoca con una lente y un objetivo de microscopio en la muestra metálica, cuya imagen de la superficie reflejada es recapturada por el objetivo y enfocada en el cámara CCD. Por otro lado, la señal de referencia es dirigida por algunos espejos y enfocada también a la cámara; así que un holograma digital es obtenida por la interferencia entre los dos haces. [37]

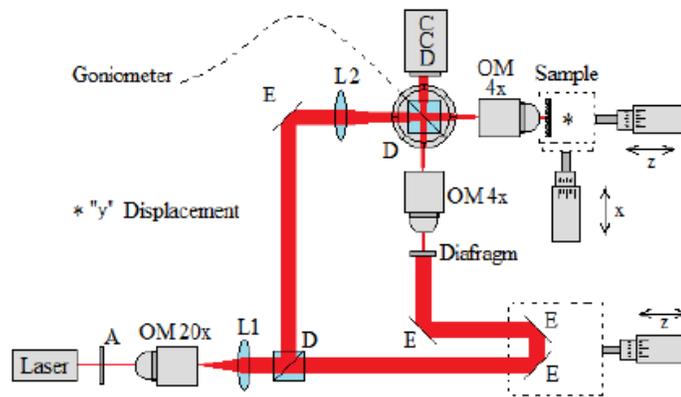


Figura 2.8. Configuración experimental para holografía digital. [37]

El artículo con el título “Aplicación de la microscopía holográfica digital en transmisión para la caracterización del espesor de recubrimientos delgados”. Implementa un sistema óptico experimental de microscopía holográfica digital para medir espesores de capas delgadas. Se alcanzó la reconstrucción tridimensional de la superficie como una imagen de contraste de fase a través de procesamiento computacional de los hologramas digitales. Estas imágenes permiten mediciones cuantitativas de los espesores de los recubrimientos delgados.

La microscopía holográfica digital permite el análisis de objetos microscópicos con resoluciones transversales similares a las obtenidas en

microscopía óptica, pero además, al sacar ventaja de la naturaleza de la holografía, permite análisis axiales mediante el acceso a valores cuantitativos de fase. Los registros de los hologramas se han hecho en un montaje holográfico digital que se basa en una configuración Mach-Zehnder, el cual en uno de sus brazos contiene la muestra a analizar. El montaje experimental se esquematiza en la Figura 2.9. [38]

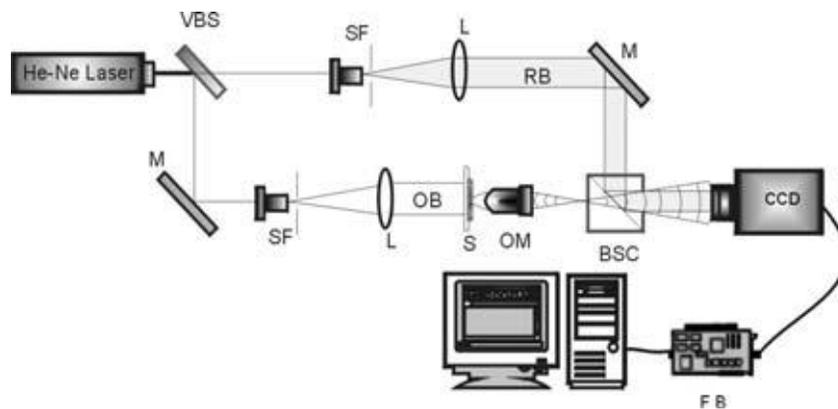


Figura 2.9. Montaje del sistema holográfico basado en interferómetro Mach-Zehnder. [38]

El trabajo titulado “Multispectral phase imaging based on acoustooptic filtration of interfering light beams”, indica la selección espectral acústico-óptica de la luz mediante una técnica para obtener imágenes de interferencia en múltiples longitudes de onda. Se muestra la ubicación del filtro sintonizable acústico-óptico en relación con el interferómetro, por lo que es posible mejorar características importantes de todo el sistema: contraste espectral, insensibilidad a la luz ambiental, estabilidad de rendimiento y precisión de medición. Se analiza teóricamente y experimentalmente un sistema de imágenes de fase cuantitativa basado en un interferómetro Mach-Zehnder con dos filtros acústico-ópticos ubicados en la iluminación y en los canales de salida. Se muestra que la filtración acústico-óptica de haces de luz interferentes en el canal de salida garantiza un mejor contraste del patrón

de interferencia y, proporciona una mejor estabilidad y una mayor precisión de las mediciones de fase. [39]

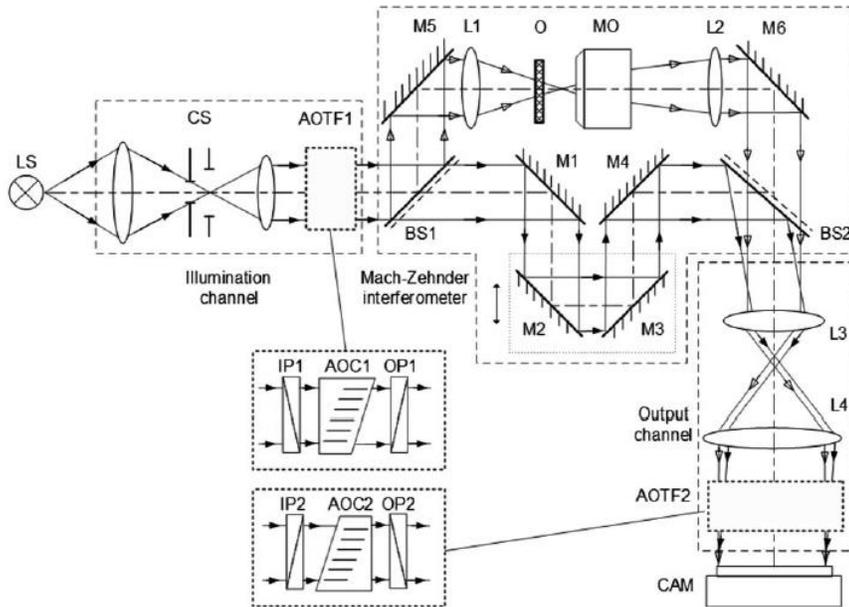


Figura 2.10. Arreglo experimental del dispositivo AO. [39]

Uno de los esquemas ópticos que ilustran el enfoque propuesto se presenta en la Figura 2.10. Un esquema para el registro de las imágenes holográficas espectrales de objetos microscópicos ópticamente transparentes. Consiste en el canal de iluminación, el interferómetro Mach Zehnder y el canal de salida. Para la filtración espectral sintonizable, AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter) se puede colocar en cualquier lugar del canal de iluminación o de salida. La Figura 2.10 muestra la opción cuando se implementa una filtración espectral de AO doble en ambos canales del interferómetro, es decir, el interferómetro se coloca dentro de un AOTF.

Otro de los trabajos está dedicado en el estudio de imágenes hiperespectrales, titulado “Field imaging system for hyperspectral data, 3D structural data and panchromatic image data measurement based on acousto-optic tunable filter”. Los datos hiperespectrales y los datos

estructurales en 3D son muy útiles en la investigación botánica. Pero, los dos tipos de información a menudo se adquieren por separado y son difíciles de combinar. En este trabajo, se propone una nueva configuración de doble vía basada en un filtro sintonizable acústico-óptico (AOTF) para adquirir una imagen, información estructural e hiperspectral dentro de un proceso de adquisición mediante una combinación de triangulación láser. Bajo la configuración, los datos hiperspectrales y la estructura 3D pueden coincidir con el nivel de subpíxel después de la calibración geométrica. [40]

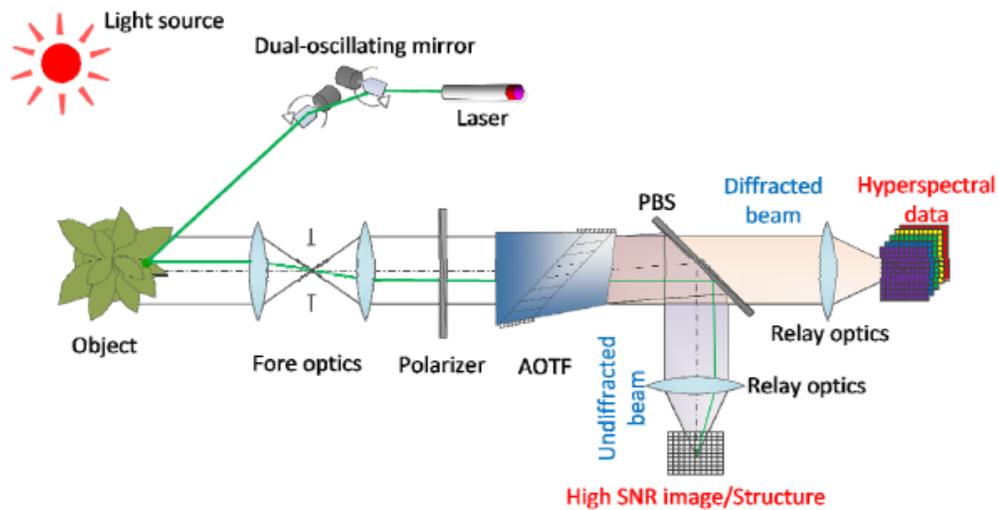


Figura 2.11. Diagrama esquemático para imágenes hiperspectrales. [40]

El espectrómetro AOTF y el rango de triangulación son sistemas de imágenes, así que los espectrómetros AOTF típicos, consideran el haz no refractado como luz parásita y se elimina por un polarizador. Sin embargo, en el sistema de imágenes propuesto como se muestra en la Figura 2.11, el haz sin difractar está separado espacialmente del haz difractado por un divisor de haz de polarización (PBS) debido a la polarización ortogonal, y forma un canal óptico para proporcionar una alta información de imagen SNR de los objetos. El detector de imágenes para el haz no fragmentado se acopla con un láser y un espejo de doble oscilación, con el fin de constituir un sistema de medición 3D. Por lo tanto, el sistema de imágenes es capaz de detectar

imágenes pancromáticas (Es un tipo de película fotográfica en blanco y negro sensible a todas las longitudes de onda del espectro visible, por lo tanto produce una imagen realista de una escena), cubos de datos hiperespectrales y nubes de puntos 3D. [40]

La Microscopía de Modulación Focal (FMM) es una técnica de microscopía de fluorescencia de excitación de un solo fotón que rechaza eficazmente el fondo de fluorescencia desenfocada que surge cuando se obtienen imágenes de tejidos biológicos profundos. El trabajo es llamado “High-speed focal modulation microscopy using acousto-optical modulators” y menciona la implementación de FMM en la que la modulación de la intensidad del láser en el plano focal se logra utilizando moduladores acústico-ópticos (AOM). La velocidad de modulación se mejora considerablemente en el rango de MHz y permite la adquisición de imágenes en tiempo real. [41]

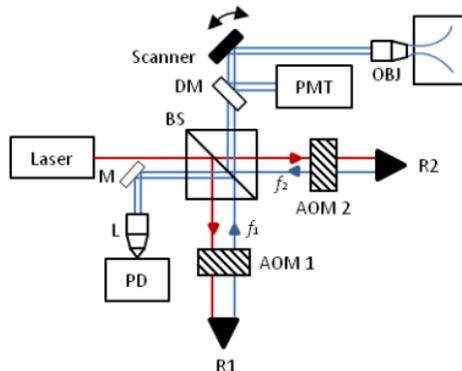


Figura 2.12. Configuración para un microscopio de modulación focal. (BS Divisor de haz, AOM Modulador acústico-óptico, PD Fotodetector, L Lente, PMT Tubo fotomultiplicador, DM Espejos deformables, R1 y R2 Retroreflectores). [41]

La capacidad de la FMM se demuestra mediante la generación de imágenes marcadas con fluorescencia en el cerebro del ratón, así como en el tejido fantasma creado por ellos mismos.

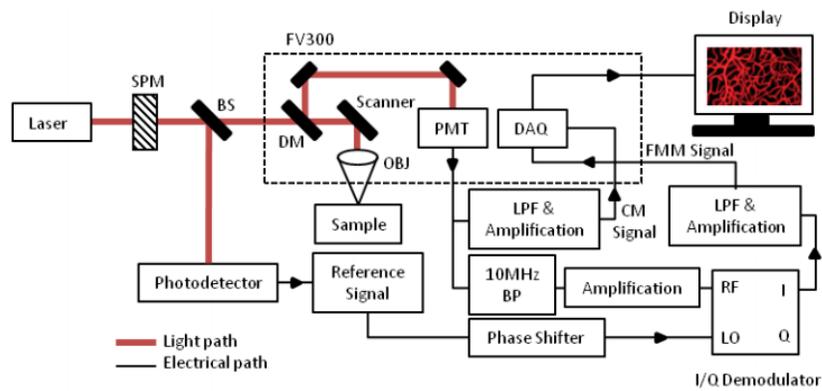


Figura 2.13. Diagramas de flujo que muestran la ruta de procesamiento de la señal. [41]

En principio, una frecuencia de modulación tan alta permite un tiempo de permanencia de píxeles tan corto como 0,1 microsegundos. Este instrumento es una mejora significativa en términos de velocidad de imagen, estabilidad y nivel de ruido. [41]

### 3. CAPÍTULO 3 Marco teórico

En este capítulo se presentan las bases teóricas que permiten comprender las bases de la formación de imágenes, así como el funcionamiento de cada uno de los elementos que intervienen en el arreglo experimental propuesto.

#### 3.1 Óptica

La óptica es la ciencia que estudia los orígenes, la propagación y la detección de la luz. En esta definición se entiende por luz no solo la radiación electromagnética visible, sino también la infrarroja y la ultravioleta. [42]

La óptica puede dividirse en tres partes, cada una de las cuales requiere un tratamiento teórico esencialmente diferente. Estas son:

- a) Óptica geométrica, que estudia por el método de los rayos luminosos.
- b) Óptica física, que trata de la naturaleza de la luz desde punto de vista de la teoría de ondas.
- c) Óptica cuántica, relacionada con las interacciones entre la luz y las partículas atómicas y cuyo estudio preciso requiere el empleo de los métodos de la mecánica cuántica. [43]

La velocidad de la luz en el vacío es aproximadamente igual a 300 000 km/s y se representa por la letra  $c$ . En cualquier otro medio transparente la velocidad es  $v$ , menor que  $c$ , y su valor depende del medio que se considere.

El índice de refracción  $n$  indica la relación entre la velocidad de la onda en un medio de referencia (el vacío para ondas electromagnéticas) y su velocidad en el medio de que se trate. Concretamente, es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un medio material transparente. [44]

$$n = \frac{c}{v}$$

(3.1)

Dado un material, el índice de refracción está en función de la longitud de onda de la luz. En general este índice aumenta al disminuir la longitud de onda.

### 3.2 Lentes

Sin duda el sistema óptico más usado es la lente, un elemento óptico refractor (es decir, una discontinuidad en el medio dominante) que reconfigura a la distribución de la energía emitida. Esto aplica a los rayos UV, a las ondas cortas, a IR, a las microondas, etc. [45]

Una lente es un elemento óptico limitado por dos superficies, en donde al menos una de ella es esférica. Una clasificación de las lentes puede ser:

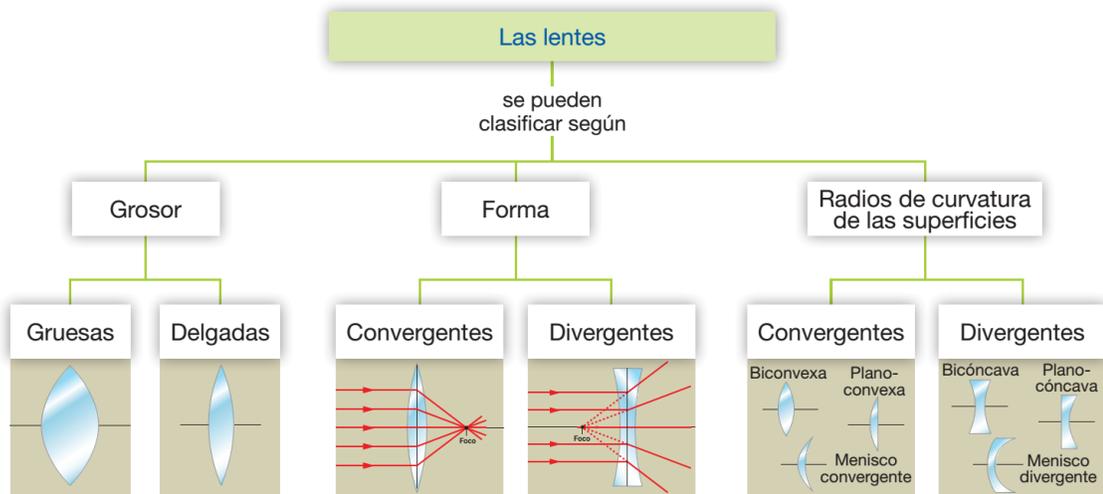


Figura 3.1 Clasificación de las lentes. [46]

Para nuestro estudio se abordará la clasificación de las lentes de grosor delgado y de forma convergente y divergente.

Una lente delgada es un pedazo de vidrio o de plástico, pulido de tal manera que cada una de sus dos superficies refractoras es un segmento ya sea de una esfera o de un plano. Las lentes se utilizan por lo común para formar imágenes por refracción en instrumentos ópticos, como cámaras, telescopios y microscopios, por ejemplo. La ecuación que correlaciona las distancias al objeto y a la imagen en el caso de una lente es prácticamente idéntica a la ecuación del espejo ya deducida, y el método que se utiliza para deducirla también es similar. [46]

Una lente delgada generalmente es circular y sus dos caras son porciones de una esfera (aunque también son posibles superficies cilíndricas). Las dos caras pueden ser cóncavas, convexas o planas. En la Figura 3.2 se presentan varios tipos, en sección transversal.

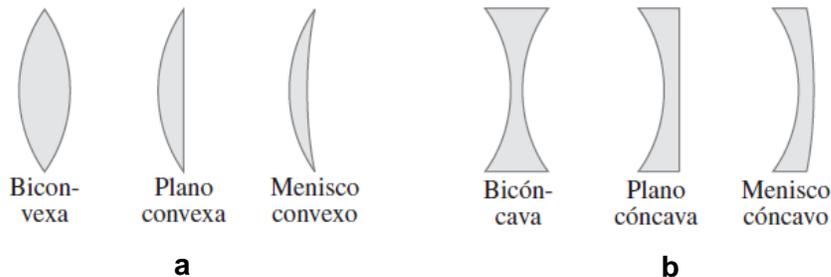


Figura 3.2. a) Lentes delgadas convergentes. b) Lentes delgadas divergentes. [45]

La lente está hecha de un material como vidrio o plástico transparente, con índice de refracción mayor que el del aire exterior. El *eje* de una lente es una línea recta que pasa a través del centro de la lente y es perpendicular a sus dos superficies visto en la Figura 3.3. A partir de la ley de Snell, se puede ver que cada rayo se dobla hacia el eje cuando entra a la lente y de nuevo cuando sale de la lente en la superficie posterior (las líneas punteadas en la Figura 3.3, que indican las normales a cada superficie para el rayo superior).

Si los rayos paralelos al eje inciden sobre una lente delgada, se enfocarán en un punto llamado *punto focal*,  $F$ . Tomando en cuenta si el diámetro de la lente es pequeño en comparación con los radios de curvatura de las dos superficies de la lente. Este criterio lo satisface una *lente delgada*, que es muy delgada en comparación con su diámetro.

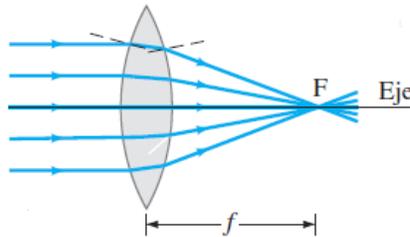


Figura 3.3 Rayos paralelos llegan a un foco por medio de una lente delgada convergente. [46]

La distancia del punto focal desde el centro de la lente se llama *distancia focal* o *longitud focal*,  $f$ . La distancia focal es la misma en ambos lados de la lente, incluso si las curvaturas de las dos superficies de la lente son diferentes. [46]

### 3.2.1 Lente convergente

En una lente en donde es más gruesa en el centro que en los bordes hará que los rayos paralelos converjan en un punto, y se llama lente convergente como se muestra en la Figura 3.3. Además los rayos que llegan paralelos al eje óptico convergen en un punto, denominado foco imagen, o simplemente foco (algo muy similar al espejo cóncavo).

### 3.2.2 Lente divergente

Las lentes que son más delgadas en el centro que en los bordes se llaman lente divergentes porque hacen que la luz paralela diverja, como se muestra en la Figura 3.4. El punto focal de una lente divergente se define como aquel punto desde el cual los rayos refractados, que se originan de los rayos

incidentes paralelos, parecen surgir (prolongaciones de los rayos que se cortan en un punto) como se observa en la Figura 3.4, y la distancia desde F hasta la lente se llama *distancia focal*,  $f$ , similar a un espejo convexo. [46]

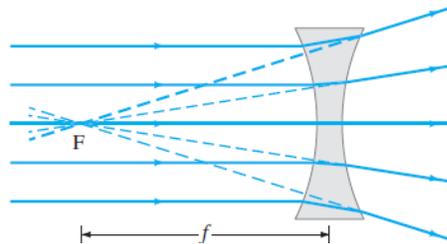


Figura 3.4 Lente divergente. [46]

### 3.3 Fibras ópticas

La fibra óptica se utiliza como medio de transmisión de luz a través de un filamento transparente de vidrio o algún material plástico de geometría cilíndrica con un diámetro común de 125  $\mu\text{m}$ . En telecomunicaciones se utiliza los diodos emisores de luz (LED) o diodos láser (LD) para enviar datos a través de la fibra óptica, presentando muchas ventajas con respecto a los cables de cobre tradicionales principalmente por sus propiedades intrínsecas como: gran ancho de banda (decenas de GHz), la baja atenuación que presentan, no depende de la frecuencia de conmutación, al ser un material dieléctrico es inmune a la interferencia electromagnética, dimensión y peso más reducida que los medios preexistentes, la materia prima utilizada para su construcción es muy abundante en la naturaleza, múltiples canales de información en un solo cable de fibra óptica, gran flexibilidad, la intrusión en una fibra óptica es fácilmente detectable, etc. La mayoría de las aplicaciones de la fibra óptica está destinada al área de comunicaciones sin embargo hoy en día la investigación ha encontrado numerosas aplicaciones de la fibra óptica en diferentes áreas (medicina, arqueología, iluminación, sensores, holografía, etc). Las diferentes aplicaciones actuales de las fibras ópticas se

basan siempre en una o más de sus propiedades físicas, ya sean de carácter óptico, mecánico o químico. [47-48]

### 3.3.1 Estructura básica de la fibra óptica

La estructura básica de la fibra óptica, es vista en la Figura 3.5, consiste de un núcleo de vidrio o plástico por donde se propaga la energía luminosa y de un revestimiento coaxial al núcleo, necesario para que se produzca el mecanismo de múltiples reflexiones internas totales, debido a que este tiene un índice de refracción  $n_2$  menor que el del núcleo  $n_1$ . La fibra óptica también posee un recubrimiento plástico que la protege de agentes externos que la pueden dañar. El diámetro del núcleo depende del tipo de fibra óptica no siendo mayor a  $100 \mu\text{m}$ , por otro lado el diámetro del revestimiento y recubrimiento pueden ser constantes sin importar el tipo de fibra con un valor de  $125$  a  $140 \mu\text{m}$  y  $250$  a  $900 \mu\text{m}$  respectivamente. [49]

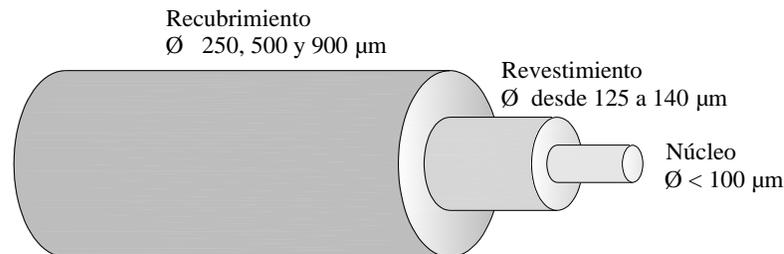


Figura 3.5 Partes básicas de la fibra óptica. [50]

### 3.3.2 Propagación de la luz en la fibra óptica

Los principios básicos de la propagación de la luz a través de la fibra óptica se explican aplicando las leyes de la óptica geométrica. Si se quiere entender rigurosamente el mecanismo de propagación en el interior de la fibra, hay que recurrir a la resolución de las ecuaciones del campo electromagnético; es decir, las ecuaciones de Maxwell. Considerando un rayo luminoso como una onda, que incide sobre una superficie que separa a dos medios (frontera o interfaz) con índices de refracción diferente  $n_1$  y  $n_2$ , la onda se divide en dos, una se refleja con un ángulo igual al ángulo formado

por la onda de incidencia  $\theta_1$  con respecto a la normal de la frontera y la segunda se refracta pasando al segundo medio con un ángulo diferente al ángulo de incidencia respecto a la normal de la frontera tal como se aprecia en la Figura 3.6.

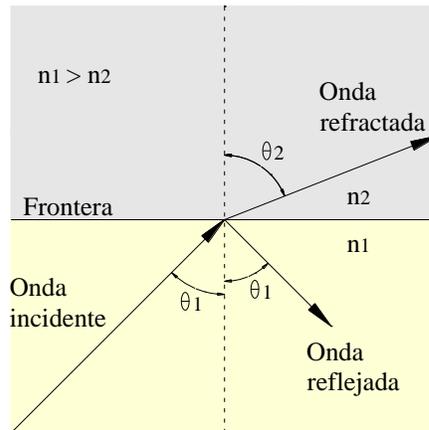


Figura 3.6 Reflexión y refracción de una onda incidente. [50]

El ángulo formado por la onda refractada con la normal de la frontera es  $\theta_2$  y se puede calcular a partir de la *Ley de Snell* (o de refracción), esta ley establece:

*Los índices de refracción están en razón inversa a los senos de los ángulos que forma la normal a la superficie de separación con las respectivas ondas.*

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}. \quad (3.2)$$

Escrita de otra manera:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (3.3)$$

De la ecuación 3.3 podemos deducir que si  $n_1 > n_2$  entonces los ángulos cumplirán la condición  $\theta_2 > \theta_1$ , esto significa que al aumentar gradualmente el ángulo de la onda de incidencia, la onda refractada se acercara a la

frontera. El ángulo del rayo de incidencia ( $\theta_1$ ) en el cual el ángulo de la onda refractada ( $\theta_2$ ) forma un ángulo de  $90^\circ$  con la normal de la frontera se le denomina ángulo límite.

Si un haz luminoso incide sobre dicha superficie con un ángulo mayor a igual al ángulo límite entonces las ondas se reflejarán en su totalidad y no habrá ondas refractadas, a esta característica se le conoce principio de reflexión total y es el que hace posible la propagación de la luz en el núcleo de la fibra óptica.

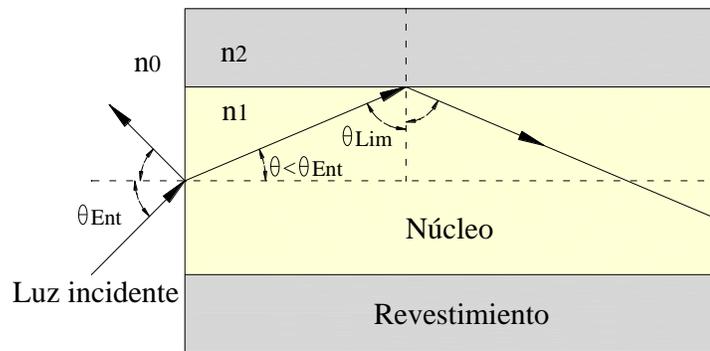


Figura 3.7 Ángulo límite de entrada. [50]

Considerando la estructura de la fibra óptica en la Figura 3.7 se observa que se involucran tres índices de refracción, del aire ( $n_0$ ), del núcleo ( $n_1$ ) y del revestimiento ( $n_2$ ); por lo tanto, si un haz de luz incide en la entrada de la fibra óptica se refractará a través del núcleo con un ángulo menor que el inicial dirigiéndose a la interfaz núcleo-revestimiento, si el ángulo que forma con la normal de esta es mayor o igual al ángulo límite entonces habrá múltiples reflexiones internas totales. Para que esto ocurra es necesario que el ángulo que forma el rayo de entrada con el eje de la fibra óptica cumpla con la condición del ángulo límite de entrada. Para calcular este ángulo límite de entrada ( $\theta_{Ent}$ ) se utiliza nuevamente la ley de Snell.

$$\theta_{Ent} = \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \times \cos \theta_{lim} \right) = \sin^{-1} \left[ \frac{n_1}{n_2} \times \cos \left( \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \right) \right],$$

(3.4)

donde  $\theta_{Lim}$  es el ángulo límite en el interior de la fibra óptica. [50]

### 3.3.3 Abertura numérica (AN)

La apertura numérica es el rango de luz que un sistema óptico puede aceptar. En la fibra óptica, al ingresar la luz en el núcleo con un ángulo menor o igual al ángulo límite de entrada, formara un cono de luz, mientras más grande sea el ángulo que forma con el eje de la fibra óptica mayor cantidad de energía luminosa podrá transmitirse, lo que ocasiona múltiples reflexiones internas totales dentro del núcleo de la fibra óptica. A partir del valor de la apertura numérica de la fibra óptica se puede saber el ángulo sólido del cono de luz y la cantidad de energía que podrá transmitirse.

Aplicando nuevamente la ley de Snell se obtiene la apertura numérica como:

$$AN = n_0 \sin \theta_{Lim} = \sin \theta_{Lim},$$

(3.5)

esta ecuación se puede escribir de la siguiente manera:

$$AN = \sqrt{n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{recubrimiento}}^2}.$$

(3.6)

De la ecuación 3.6, se concluye que la apertura numérica depende exclusivamente de los índices de refracción de la fibra óptica y que el índice de refracción del núcleo debe ser mayor que el índice de refracción del revestimiento. Cuanto mayor sea la diferencia de los índices de refracción

mayor será la cantidad de energía luminosa que se podrá transmitir a través de la fibra óptica. [34]

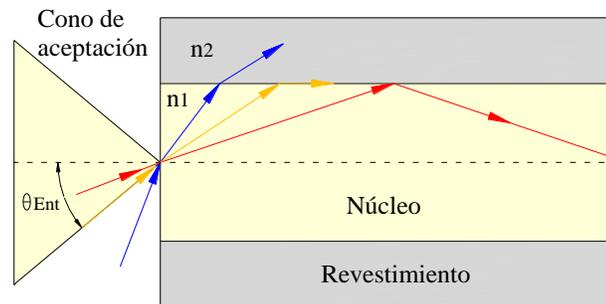


Figura 3.8 Cono de aceptación de luz. [50]

### 3.3.4 Tipos de fibra óptica

La fibra óptica se puede clasificar de diferentes maneras, como puede ser vista en la Figura 3.9, ya sea por la forma de propagación de la luz en el núcleo de la fibra, por los materiales utilizados para su construcción o por el índice de refracción, en base a lo mencionado anteriormente, se presenta a continuación una clasificación general de la fibra óptica.

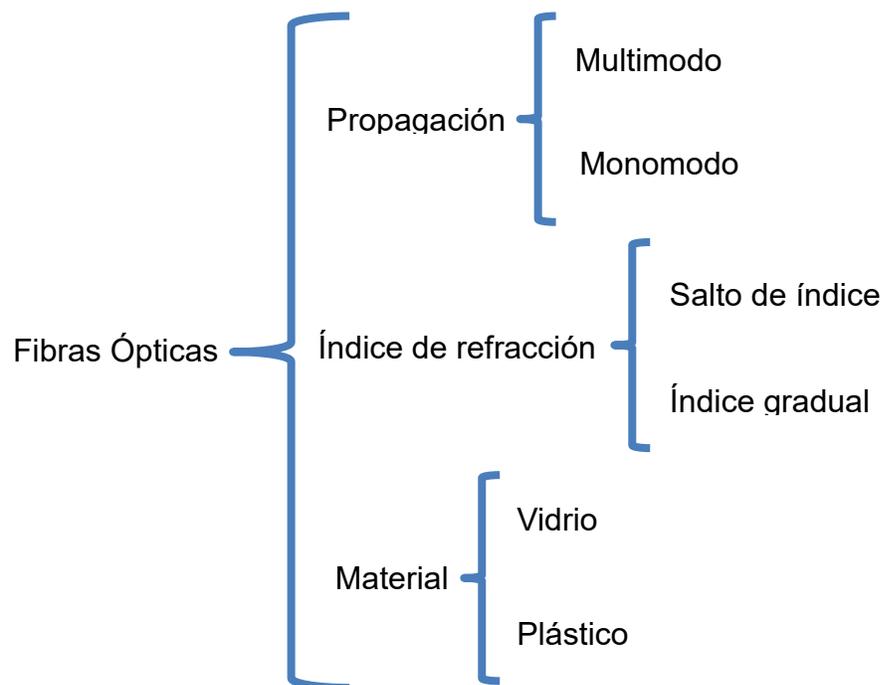


Figura 3.9 Clasificación general de las fibras ópticas.

Se describen más adelante las fibras ópticas comercialmente conocidas de acuerdo a la clasificación expuesta anteriormente.

### 3.3.5 Fibras multimodo con salto de índice

Están construidas con un índice de refracción constante en todo su núcleo al igual que su revestimiento. En este tipo de fibras ópticas se pueden transmitir diferentes modos de propagación aumentando con ello la cantidad de energía emitida. Al conducir por su núcleo diferentes modos de propagación estos se transmiten a velocidades diferentes llegando al extremo receptor desfasados es decir en tiempos diferentes, esto ocasiona un ensanchamiento del pulso original reduciendo el ancho de banda. Esta característica no la hace la más adecuada para usos en comunicaciones, reservando su uso en aplicaciones donde la cantidad de energía transportada por ella es más importante. [35]

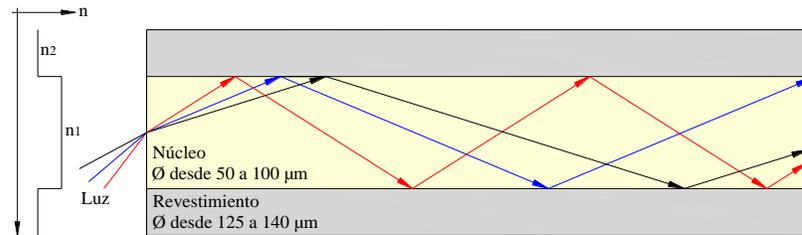


Figura 3.10 Modos de propagación de la luz en una fibra multimodo con salto de índice. [51]

### 3.3.6 Fibras multimodo con índice gradual

El índice de refracción en su núcleo es variable siendo mayor en el centro y disminuyendo gradualmente hacia la frontera; mientras que el índice de refracción en el revestimiento es constante. Al igual que la fibra multimodo con salto de índice, estas también pueden conducir por su núcleo diferentes modos de propagación de las ondas. Debido a que su índice de refracción en el núcleo es variable, la velocidad de las ondas en el centro será menor a las que se propagan por los extremos. Las ondas que se propagan por los

extremos recorren una mayor longitud que las que se propagan por el núcleo, con lo que la mayor longitud que recorren estas se compensa con la mayor velocidad permitiendo así que los diferentes modos de propagación de la luz emitidos en la entrada de la fibra lleguen casi iguales en el extremo receptor de la fibra óptica, resultando en un menor ensanchamiento de la señal original, lo que posibilita el aumento del ancho de banda. [51]

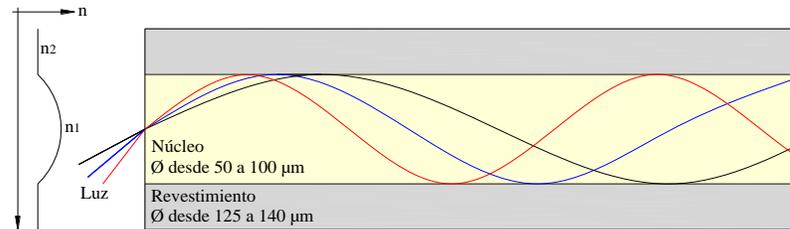


Figura 3.11 Modos de propagación de la luz en una fibra multimodo con índice gradual. [51]

### 3.3.7 Fibras monomodo

Su construcción es similar a las fibras multimodo con salto de índice, diferenciándose únicamente en un menor diámetro del núcleo. Al disminuir el diámetro del núcleo a valores menores o iguales a 8 o 10  $\mu\text{m}$  se consigue que la frecuencia de corte normalizada ( $V$ ) esto es el parámetro  $V$ , que es un número adimensional que determina cuantos modos en una fibra pueda soportar.

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot AN, \quad (3.7)$$

donde:

$a$  = tamaño del núcleo de la fibra.

$\lambda$  = longitud de onda.

$n$  = índice de refracción

Si se trata de una fibra monomodo o multimodo, el total de número de modos es dado por:

$$M = \frac{V^2}{2}, \quad (3.8)$$

así que para  $M \leq 2.405$  será monomodo, mientras  $M > 2.405$  es multimodo.

Consiguiendo que la ecuación de propagación de la onda (resultado de las ecuaciones de Maxwell) tenga solamente una solución lo que significa que la fibra óptica transmitirá únicamente un modo de propagación de la onda. Al transmitir una señal con un solo modo dentro de la fibra óptica esta no presentara un ensanchamiento en el extremo receptor, haciendo de este tipo de fibra la más utilizada para comunicaciones ya que presenta un gran ancho de banda con respecto a las fibras multimodo. [51]

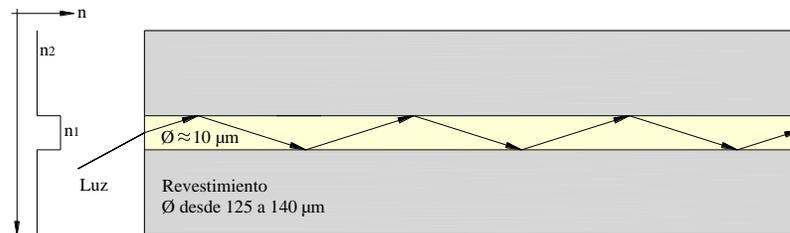


Figura 3.12 Modo de propagación de la luz en una fibra monomodo. [51]

### 3.3.8 Fibras ópticas de plástico

Con el advenimiento de las nuevas aplicaciones, como resultado de los avances tecnológicos, las fibras ópticas de plástico (POFs), actualmente compiten en los enlaces de comunicaciones los alambres de cobre, los cables coaxiales, las fibras ópticas de vidrio y el aire (canales inalámbricos). [52]

Las POF se fabrican usando materiales de plástico como poliestireno (PS), policarbonatos (PC) y polimetilmetacrilato (PMMA), estos materiales presentan ventanas de operación en la zona visible del espectro electromagnético en el rango de 520 a 780 nm de longitud de onda. No obstante las pérdidas que presentan en comparación con las fibras de vidrio constituyen su principal desventaja. Esto último explica del porque las fibras de plástico son de aplicación para distancia cortas, típicamente para longitudes de enlaces menor a unos pocos cientos de metros en comparación con los cientos de kilómetros que se logran con fibras ópticas de vidrio. Sin embargo, las POFs tienen muchas aplicaciones en el control industrial, en sensores de huellas, detección de luz, y en enlaces de datos de distancias pequeñas. Ciertos usuarios han encontrado beneficios en sistemas con POF en comparación con fibras e vidrio o alambre de cobre ofreciendo las siguientes ventajas:

- Componentes sencillos y baratos.
- Peso ligero.
- Operación con luz visible.
- Gran flexibilidad con mayor tolerancia a curvaturas, choques y vibraciones.
- Inmunidad a interferencias electromagnéticas.
- Fácil de manipular y conectar, debido a que sus diámetros son de 1 mm comparados con los 8 o 100  $\mu\text{m}$  para el vidrio.
- Uso de equipos sencillos y baratos.
- Mayor seguridad que las fibras de vidrio por daños a la retina del personal operativo.
- Los trancceptores con POF requieren menos consumo que los de cobre.

Las desventajas son las siguientes:

- Pérdidas elevadas de transmisión.
- Número reducido de proveedores.
- Falta de conocimiento y familiaridad en el diseño e instalación de sistemas con POFs. [53]

### **3.4 Difracción**

La difracción se refiere a la propiedad que tienen todas las ondas de bordear obstáculos, es decir, de desviarse hacia una nueva dirección cuando encuentran un objeto (barrera o abertura) en su camino. Para que se presente la difracción, el tamaño del objeto debe ser del mismo orden de la longitud de onda. Usualmente no se percata uno de la difracción de la luz debido a la pequeñez de la longitud de estas ondas.

Entre la interferencia y la difracción no existe una diferencia física esencial, ya que ambos resultan del mismo fenómeno de redistribución de la energía luminosa debido a la superposición de onda coherentes. Se utiliza el término interferencia para referirse al resultado de la superposición de un número finito (usualmente pequeño) de ondas y el término difracción para la superposición de un número grande de fuentes infinitesimales y casi siempre contiguas.

#### **3.4.1 Difracción de una ranura**

La difracción se puede entender por medio del principio de Huygens, según el cual cada elemento de un frente de onda sirve como fuente de una onda esférica secundaria. Sea una ranura muy estrecha de ancho " $a$ " sobre la cual índice un haz paralelo de luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$  (siendo  $\lambda < a$ ). Considerando el caso en que la pantalla se encuentra tan lejos del

obstáculo que los rayos que llegan al punto de observación son prácticamente paralelos (difracción de Fraunhofer). Las ondas secundarias que salen en la misma dirección del haz incidente ( $\theta = 0$ ) están todas en fase, de modo que en el centro de la pantalla habrá interferencia constructiva. En general, cuando la diferencia de camino entre dos rayos es  $\lambda/2$  interferirán destructivamente. Si se considera un ángulo  $\theta$  tal que el rayo de la parte inferior de la ranura recorre exactamente una longitud de onda más que el rayo del borde superior, entonces el rayo que pasa por el centro recorrerá  $\lambda/2$  más que el rayo de la parte superior. Estos rayos estarán fuera de fase e interferirán en la pantalla de manera destructiva, ver Figura. 3.13.

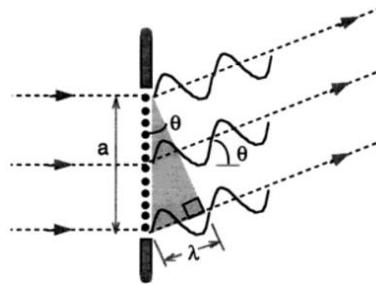


Figura 3.13 Difracción de una ranura.

En forma análoga, para todo punto en la mitad superior de la ranura, hay un punto en la mitad inferior que estará desfasado en  $\lambda/2$ . Por consiguiente todos los rayos interfieren destructivamente en pares. El primer ángulo para interferencia destructiva está dado por la condición  $a \text{ sen } \theta = \lambda$ . Si ahora es dividida la ranura en cuatro regiones, cada una con muchas fuentes, habrá cancelación en pares cada vez que se cumpla  $a \text{ sen } \theta = 2\lambda$ . Si se continúa con este proceso, se encontrara que hay interferencia destructiva (intensidad cero) para los ángulos de observación dados por:

$$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{a} \quad \text{donde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (3.9)$$

En la expresión anterior el valor de  $m = 0$  no está incluido pues corresponde al máximo central. Para hallar la intensidad de cualquier punto en el patrón de difracción de la ranura se utiliza un diagrama de fasores. Se encuentra que la intensidad presenta un máximo pronunciado en  $\theta = 0^\circ$  y cae a cero a ciertos ángulos dados por la expresión anterior. Esto se ilustra en la Figura 3.14.

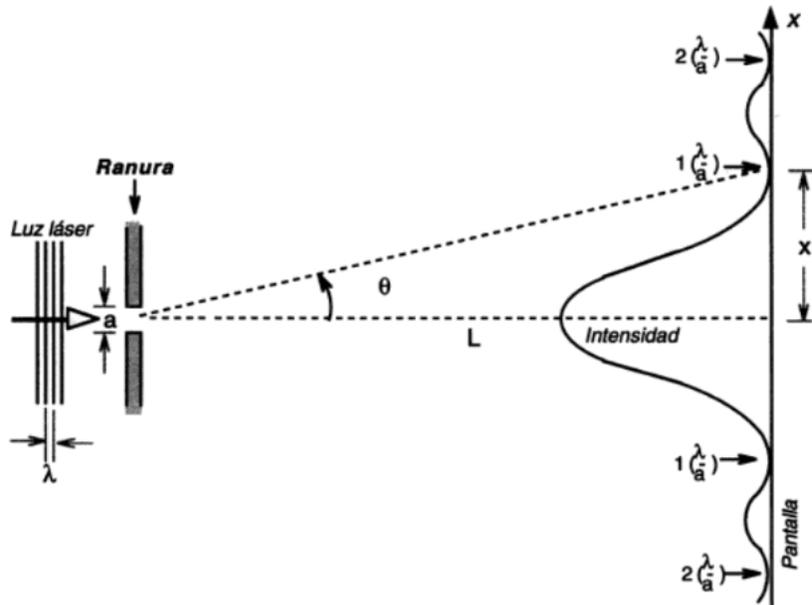


Figura 3.14 Patrón de difracción de una ranura.

Entre los mínimos ocurren máximos brillantes más pequeños que resultan de interferencia constructiva incompleta. El ancho angular del pico central corresponde a los mínimos  $m = \pm 1$  en la relación anterior. Se observa que para una dada  $\lambda$  el pico central se ensancha a medida que la ranura se hace más estrecha.

### 3.4.2 Interferencia y difracción combinadas en una ranura doble.

Ahora se índice luz sobre un par de ranuras de ancho " $a$ " y separación " $d$ ". Si las ranuras fueran infinitamente estrechas, el pico de difracción debido a

cada ranura se difunde sobre toda la pantalla y ésta quedaría iluminada de manera uniforme por cada ranura individual. Se considera la interferencia de la luz coherente que proviene de las dos rejillas individuales, resulta un patrón constituido por una serie de franjas brillantes y oscuras. Las franjas brillantes ocurren a ciertos ángulos  $\theta$ , los cuales vienen dados por la condición:

$$d \operatorname{sen} \theta = n\lambda \quad \text{donde } n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (\text{máximos de interferencia}). \quad (3.10)$$

Si las ranuras tienen un ancho “ $a$ ” apreciable, la difracción reduce la intensidad de las franjas de interferencia dado lado del centro. El patrón resultante se puede describir como una serie de máximos debidos a la interferencia de ondas provenientes de las dos ranuras, modificado por una envolvente resultado de la difracción de cada una de las ranuras. Esto se ilustra en la Figura 3.15.

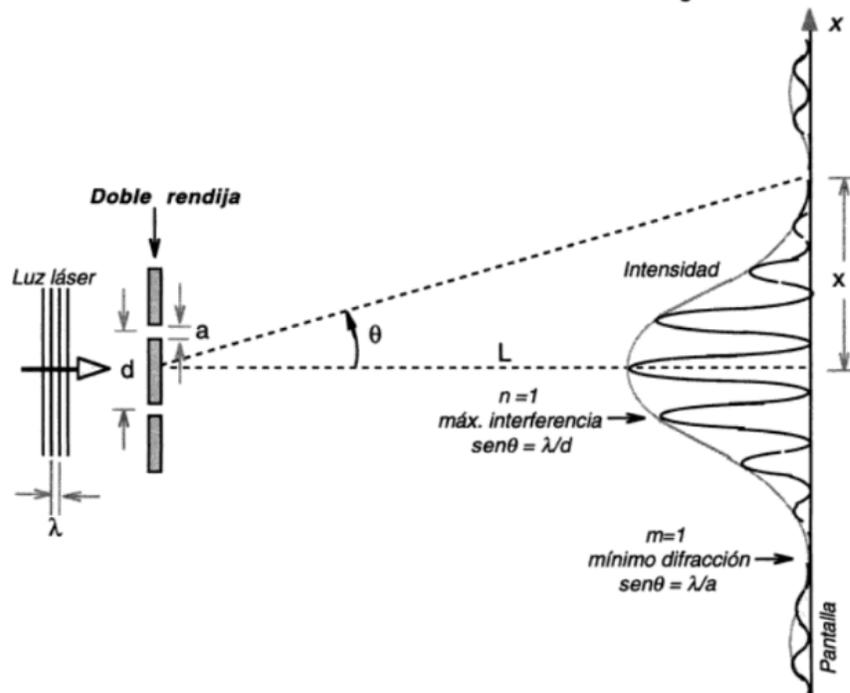


Figura 3.15. Interferencia y difracción de una ranura doble.

Las líneas punteadas indican el factor de difracción por lo que actúa como envolvente que limita los picos de interferencia.

$$a \sin \theta = m\lambda \quad \text{donde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (\text{mínimos de interferencia}). \quad (3.11)$$

Observar que para el caso que se muestra en la figura anterior, el mínimo de difracción coincide con el pico  $n = 4$  en el patrón de interferencia, por lo que este pico queda anulado.

### 3.4.3 Rejillas de difracción

En las rejillas de difracción las ondas son dispersadas por un número muy grande de centros ubicados a distancia regulares. Cualquier estructura periódica regular puede servir como una rejilla de difracción, de modo que las rejillas pueden adoptar muchas formas. Una es rayando regularmente placas opacas, para formar ranuras paralelas, las cuales funcionan como fuentes para la generación de ondas secundarias (rejilla de transmisión). Cuando las rayaduras se hacen en placas de metal trabajan como fuentes de luz reflejada y no transmitida (rejilla de reflexión). El análisis es básicamente el mismo para ambos tipos de rejillas.

Un caso es el de un número muy grande de ranuras separadas por una distancia " $d$ " y son lo suficiente estrechas de modo que la difracción de cada una de ellas difunda luz sobre una pantalla distante. Se producirá interferencia constructiva a ángulos  $\theta$  tales que los rayos de rendijas adyacentes recorran una distancia extra igual a  $m\lambda$ . Por lo tanto, debe cumplirse la condición:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad \text{donde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (\text{picos rejilla de difracción}) \quad (3.12)$$

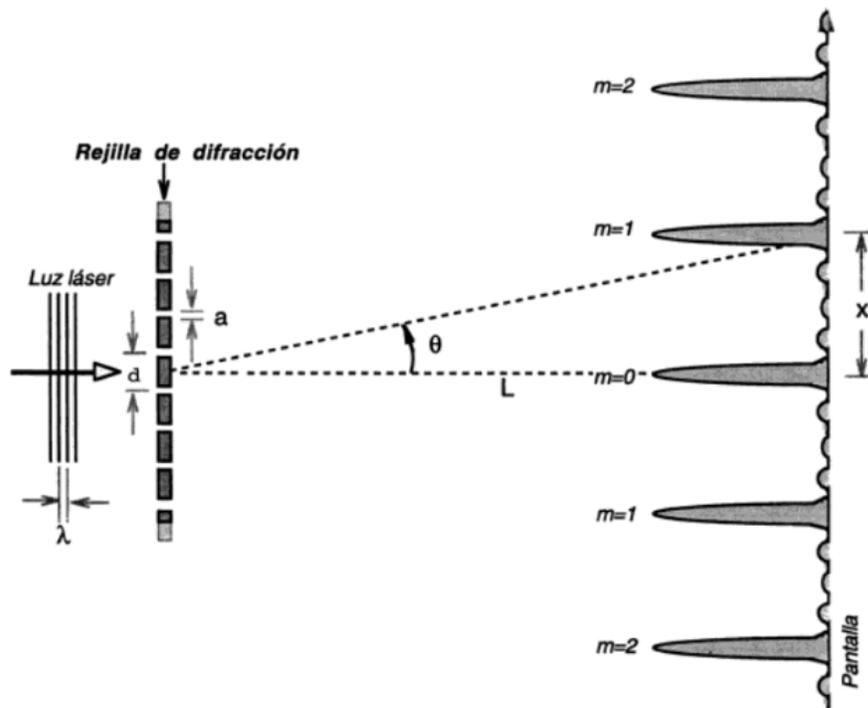


Figura 3.16 Espectro de una rejilla de difracción.

Como muestra la Figura 3.16, en las rejillas de difracción los picos resultan brillantes y nítidos, siendo el ancho del pico inversamente proporcional al número total de líneas en la rejilla [54-57].

### 3.4.4 Estudio de una rejilla de Bragg

Una rejilla de Bragg es un arreglo periódico de "placas" o "películas" de dos índices de refracción diferentes, denominados índice de refracción alto  $n_H$  ( $\sim 1.4563$ ) e índice de refracción bajo  $n_L$  ( $\sim 1.456$ ). Estas rejillas tienen un periodo fundamental  $\Lambda \approx \lambda/2n$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda con máxima reflectividad, llamada longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B \equiv \lambda$ ) y  $n$  es el índice de refracción promedio entre  $n_H$  y  $n_L$  [58]

La forma en que operan las rejillas de Bragg parte de que la luz que incide sobre ellas es transmitida y la otra parte es reflejada. La rejilla de Bragg tiene una alta reflectancia debido a que las placas tienen un espesor óptico de  $\lambda/4$

y por tanto los rayos que se van reflejando en cada superficie se encuentran en fase al salir por la primera interface. [59]

A continuación se visualiza en la Figura 3.17, la forma de una rejilla de Bragg [63].

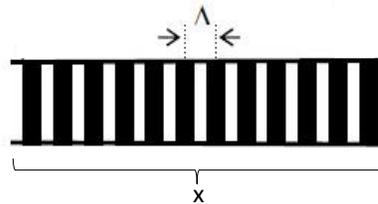


Figura 3.17 Rejilla de Bragg. [59]

La modulación de una rejilla de Bragg uniforme está dada por la siguiente ecuación, además en la Figura 3.18 se presenta la modulación realizada por dicha rejilla.

$$f(x) = A \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right), \quad (3.13)$$

donde:

$A$  = Amplitud de la modulación.

$x$  = Distancia a lo largo del eje longitudinal.

$\Lambda$  = Período de la rejilla.

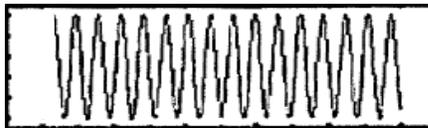


Figura 3.18 Modulación de una rejilla de Bragg. [60]

## 4. CAPÍTULO 4 Desarrollo de la metodología

En este capítulo se mencionara la descripción general de la formación de imágenes. Además de una breve del estudio de la teoría de difracción para la formación de imágenes para una rejilla. También se incluye la muestra de imágenes de prueba correspondientes a un análisis numérico del estudio matemático, y por último un esquema de la metodología experimental del sistema formador de imágenes.

### 4.1 Estudio generalizado de un sistema formador de imágenes

Se parte de utilizar un sistema lineal, donde se usa una caja negra para explicarlo [61],

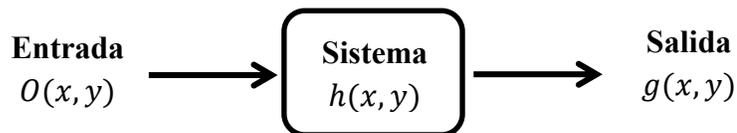


Figura 4.1 Esquema general del sistema formador de imágenes.

donde se relaciona la salida con respecto a su entrada y al sistema y obedece a la siguiente ecuación;

$$g(x, y) = o(x, y) * h(x, y), \tag{4.1}$$

en donde:

$g(x, y)$  corresponde a la Imagen.

$o(x, y)$  corresponde al objeto.

$h(x, y)$  corresponde a la Función pupila.

La Figura 4.2 muestra que  $g(x, y)$  corresponde a la imagen que se encuentra usando la convolución del objeto con el sistema  $h(x, y)$  [62],

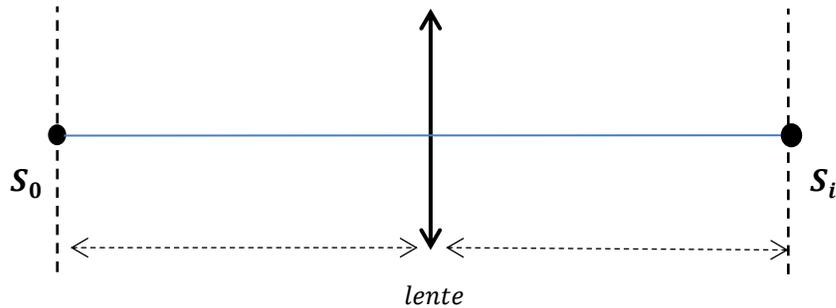


Figura 4.2 Distancias del sistema formador óptico de imágenes.

Notemos que en la figura anterior  $S_0$  y  $S_1$  corresponden a las distancias del objeto al vértice del sistema y la distancia de la imagen al vértice de la lente. Es importante probar el sistema óptico, y es bien conocida su respuesta impulsiva a la fuente puntual obteniendo un patrón de Airy, (ver Figura 4.3).

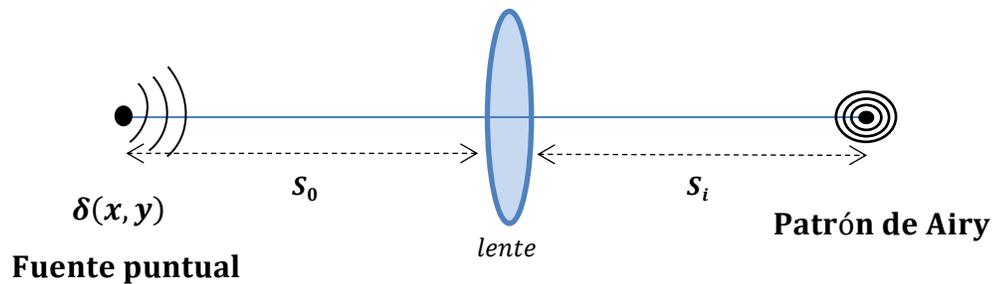


Figura 4.3 Sistema formador óptico de imágenes.

Entonces, para el caso particular de usar una fuente puntual y encontrar la intensidad del sistema encontramos que:

$$\begin{aligned}
 g_a(x, y) &= \delta(x, y) * h(x, y) \\
 g_i(x, y) &= |h(x, y)|^2.
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

donde  $g_i(x, y)$  es conocido como función de punto extendido en intensidad o ipsf por sus siglas en ingles [63]. Con base a esta teoría, al usar un objeto extendido se toma el teorema de superposición y es así como se forma la imagen en el plano de la imagen.

Recordemos que  $h(x, y)$  corresponde a la transformada de Fourier de la simetría de la lente por lo que  $h(x, y)$  queda definido como [64]:

$$h(x, y) = \mathcal{F}\{Circ(u, v)\}, \quad (4.3)$$

al encontrar la intensidad, se debe tomar en cuenta el módulo cuadrado ( $|\cdot|^2$ ) de la función del sistema óptico.

Tomando como base esta teoría y usando un sistema lineal, proponemos colocar en la pupila un objeto de fase que permita difractar la luz que pasa por el sistema y así obtener imágenes espectrales para caracterizar objetos por medio de su espectro [65].

$$h(x, y) = \mathcal{F}\left\{Circ(u, v) \cdot e^{-i2\pi\cos\left(\frac{u}{\Lambda}\right)}\right\}, \quad (4.4)$$

donde  $u$  corresponde a la frecuencia a lo largo del eje frecuencial y  $\Lambda$  al periodo de la función.

Se observa que el objeto de fase corresponderá a una rejilla de difracción, por lo que proporcionará los órdenes de difracción o en este caso, las imágenes espectrales.

## 4.2 Análisis matemático

Ahora partiendo de la ecuación 3.13 que representa la función de una rejilla de Bragg uniforme en el dominio espacial, puede ser ejemplificado como en la Figura 4.4<sup>a</sup> con un periodo de 8 y la amplitud de 1. En la Figura 4.4b se visualiza la función en dos dimensiones o tomada como una rejilla físicamente.

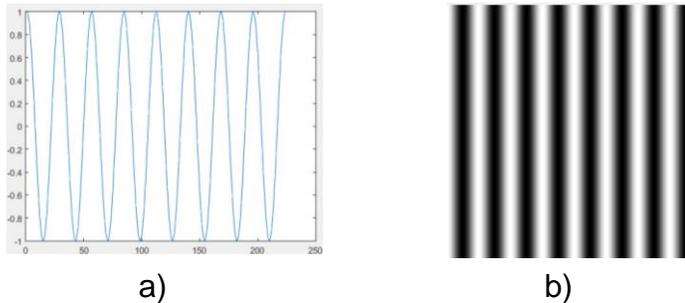


Figura 4.4 a) Representación gráfica de una función coseno. b) Representación en imagen de la función coseno en dos dimensiones.

Como se puede observar en la Figura 4.4a, el comportamiento corresponde a una función coseno, donde se considera en los valores de la cresta corresponderían a 1 (rectángulos blancos en la Figura 4.4b) y en los valles serían de valor a 0 (rectángulos negros en la Figura 4.4b).

Al analizar la Figura 4.4b, se observa que tiende a difuminarse cada rendija que aparecen entre ellas (rectángulos blancos y negros), debido que en esas regiones la caída o y subida de los valores corresponde al comportamiento de la función coseno. Así que se desea que sea considerada como funciones rectangulares, ya que ese cambio de valores se realizará abruptamente, esto quiere decir de un 1 a 0. Por lo que se consideraría físicamente como una rejilla con ranuras rectangulares. Entonces realizamos la siguiente condición:

$$f(x) = x > 0. \quad (4.5)$$

En donde la ecuación 4.5, toma la función de la rejilla y aplica la condición, así que cuando los valores sean superiores a 0 corresponderían en la nueva función al valor de 1, mientras valores inferiores de 0, que en la Figura 4.4a serían valores hasta de -1, tendría el valor de 0. En la Figura 4.5 se muestra la nueva función a la cual será nuestra función de la rejilla.

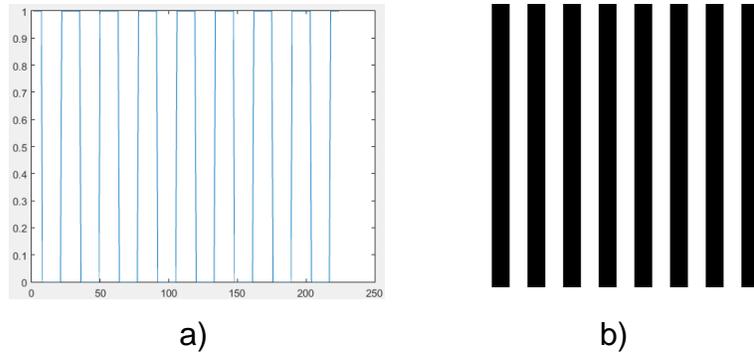


Figura 4.5 a) Representación gráfica de una función rectangular periódica. b) Representación en imagen de la función rectangular periódica en dos dimensiones.

Por consiguiente, la función rectangular periódica corresponderá a nuestra función de pupila que nos permitirá trabajar para la obtención de los diferentes órdenes de difracción o en este caso los espectros del objeto.

#### 4.2.1 Modelo de formación de imágenes

Más adelante debemos analizar cómo es un modelo de un sistema de formación de imágenes, el cual es mostrado en la Figura 4.6.

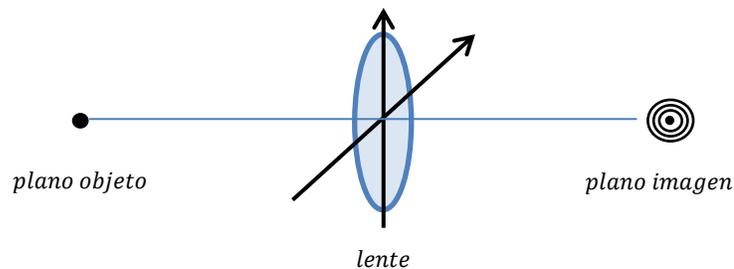


Figura 4.6 Modelo de un sistema de imágenes

El modelo de la Figura 4.6 está constituido por dos planos (plano objeto y plano imagen) y por una lente, en donde dicha lente realizará el proceso de difracción de luz que viene del objeto. En nuestro caso la lente será la función pupila que estaremos proponiendo en nuestro análisis matemático y numérico.

Cabe mencionar que la lente cumple con propósito de una transformada de Fourier, de tal manera se describirá brevemente su definición y su expresión ante la función pupila más adelante.

La expresión que nos permite entender mejor dicho sistema, es mediante un modelo generalizado de un sistema de imágenes, descrito en la ecuación 4.6. [6]

$$g(x, y) = o(x, y) * h(x, y). \tag{4.6}$$

Donde:

$g$  = Imagen.

$o$  = Objeto.

$h$  = Función pupila.

La función pupila es aquella que corresponde a la respuesta al impulso de intensidad y nos permitirá conocer el comportamiento de nuestro sistema de formación de imágenes, también es conocido como psf (point spread function) [57]. Además se debe tomar en cuenta que se le es aplicada la transformada de Fourier ya que corresponde a una lente y realizará dicha función, como indica la ecuación 4.7.

$$h(x, y) = \mathcal{F}\{fp(u, v)\}. \tag{4.7}$$

Por lo tanto, la función pupila ( $fp(u, v)$ ) estará constituida por las funciones rectangular y circular, vista en la ecuación 4.8, donde se retoma la función de

la rejilla rectangular y es añadido una función circular que correspondería a la abertura de una pupila óptica, dicha abertura estará relacionada como la frecuencia de corte de la función circular.

$$fp = \left[ Rect\left(\frac{x}{\Lambda}\right) \right] \left[ Circ\left(\frac{r}{f_0}\right) \right]. \quad (4.8)$$

Donde:

$f_0$  = frecuencia de corte.

$\Lambda$  = período.

Retomando que la función pupila se le aplica una transformada de Fourier, queda la expresión como en la ecuación 4.9.

$$\mathcal{F}\{fp\} = \mathcal{F}\left\{ Rect\left(\frac{x}{\Lambda}\right) * Circ\left(\frac{r}{f_0}\right) \right\}. \quad (4.9)$$

Ahora con la ecuación 4.9, se presenta la operación de convolución de dos funciones, así que es necesario que sea aplicado el Teorema de convolución, el cual establece que la transformada de Fourier de una convolución es el producto punto a punto de las transformadas.

En la transformada de Fourier se presenta el caso de que hay un cambio de dominio, espacial a frecuencial, además cualquier función puede ser representado como la suma de seno y coseno, esto debido a la fórmula de Euler:

$$e^{j2\pi} = \cos(2\pi) - j \sin(2\pi).$$

Por consiguiente, la transformada de Fourier de una función “ $g$ ” de dos variables independientes  $x$  y  $y$  serán representadas por  $\mathcal{F}\{g(x,y)\}$  y es definida:

$$F\{g(x, y)\} = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-j2\pi(xfx+xfy)} dx dy. \quad (4.10)$$

Para el caso contrario, la transformada de Fourier inversa de una función  $G(fx, fy)$  y será representada por  $F^{-1}\{G(fx, fy)\}$  y es definida:

$$F^{-1}\{G(fx, fy)\} = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{j2\pi(xfx+xfy)} dfx dfy \quad (4.11)$$

El filtrado en el dominio de la frecuencia se basa en la Transformada de Fourier, la cual asocia cambios de intensidad en la imagen con frecuencias.

A continuación se realizará la Transformada de Fourier de cada función indicada en la ecuación 4.9.

- Función rectangular

Para definir una función rectangular, debemos establecer bajo qué condiciones se evaluará la función rectangular, descrita a continuación como  $Rec(x)$  y tomando la Figura 4.7 como referencia y así establecer dicha función:

$$Rec(x) = \begin{cases} 1 & |x| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & |x| = \frac{1}{2} \end{cases}$$

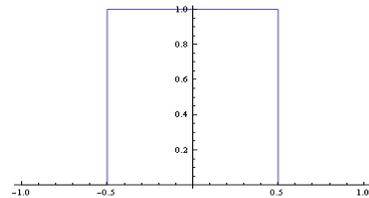


Figura 4.7 Función rectangular.

Quedando la función rectangular siendo aplicada la transformada de Fourier como en la ecuación 9:

$$F\{Rec(x)\} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} e^{-2\pi i(xfx)} dx$$

(4.12)

En la ecuación 4.12, se muestra cómo queda expresada la función rectangular para su transformada de Fourier, esto retomando la definición de la transformada de Fourier indicada en la ecuación 4.10. Por lo tanto, se integrará, evaluará la función, así como la reducción de términos que se puedan encontrar en el desarrollo matemático y visto a continuación.

$$\begin{aligned} \frac{1}{-2\pi i(fx)} [e^{-2\pi i(fx)}] \Big|_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} &= \frac{1}{-2\pi i(fx)} [e^{-\pi i(fx)} - e^{\pi i(fx)}] \\ [-1] \frac{1}{-2\pi i(fx)} [e^{-\pi i(fx)} - e^{\pi i(fx)}] & \\ \frac{1}{2\pi i(fx)} [e^{\pi i(fx)} - e^{-\pi i(fx)}] & \end{aligned}$$

(4.13)

Se obtiene una forma exponencial compleja del seno en la ecuación 4.13, así que recurrimos a una identidad que se muestra en la siguiente expresión:

$$Sen \alpha = \frac{e^{\pi i \alpha} - e^{-\pi i \alpha}}{2i}$$

Utilizando la identidad anterior, sustituyendo y reduciendo términos, obtenemos:

$$F\{Rec(x)\} = \frac{Sen(\pi(fx))}{\pi(fx)} = \mathbf{Sinc}(\pi(fx))$$

(4.14)

Así que la transformada de una función rectangular correspondería a una función Sinc, descrita en la ecuación 4.14.

- Función circular

Para la función circular es necesario realizar un cambio del plano cartesiano al plano polar, debido a que la región de integración de una integral doble corresponde a una circunferencia, el cual es visto en la ecuación 12 dicho cambio.

$$F\{Circ(x, y)\} = F\{Circ(r)\}$$

Para realizar el cambio de dominio espacial  $(x, y)$  a frecuencial  $(fx, fy)$ , se consideran las siguientes expresiones (cartesiano a polar, o viceversa).

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2} & \rightarrow & \quad \rho = \sqrt{fx^2 + fy^2} \\ x &= r\cos(\theta) & \rightarrow & \quad fx = \rho\cos(\varphi) \\ y &= r\sin(\theta) & \rightarrow & \quad fy = \rho\sin(\varphi) \end{aligned}$$

$$F\{Circ(r)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r) e^{-2\pi i(xfx+yfy)} dx dy$$

(12)

Sustituimos cada cambio de variable del dominio espacial a frecuencial para obtener la siguiente expresión que correspondería a la transformada de Fourier de una función circular.

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} r e^{-2\pi i(r\cos(\theta)\rho\cos(\varphi)+r\sin(\theta)\rho\sin(\varphi))} dr d\theta$$

Se agrupan términos:

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} r e^{-2\pi i r \rho (\cos(\theta)\cos(\varphi)+\sin(\theta)\sin(\varphi))} dr d\theta$$

(4.15)

De la ecuación 4.15, podemos utilizar la siguiente identidad trigonométrica para simplificar la expresión. La identidad trigonométrica se muestra a continuación.

$$\cos(\theta - \varphi) = \cos(\theta)\cos(\varphi) + \sin(\theta)\sin(\varphi)$$

Usando la identidad anterior e integrando para se obtiene  $d\theta$  y evaluando en  $2\pi$ :

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} r e^{-2\pi i r \rho (\cos(\theta - \varphi))} dr d\theta = \int_0^1 r J_0(2\pi r \rho) 2\pi dr$$

(4.16)

Se obtiene una función Bessel en la ecuación 4.16, debido a situaciones físicas donde hay simetría cilíndrica.

Se aplica de nuevo un cambio de variable para la ecuación 4.16, para la siguiente integral y se está considerando otro cambio de variable para ello, obteniendo:

$$r' = 2\pi r \rho \quad \rightarrow \quad r = \frac{r'}{2\pi \rho}$$

$$dr' = 2\pi \rho dr \quad \rightarrow \quad r = \frac{dr'}{2\pi \rho}$$

$$\int_0^1 2\pi \frac{r'}{2\pi \rho} J_0(r') \frac{dr'}{2\pi \rho} = \int_0^{2\pi \rho} \frac{r'}{2\pi \rho^2} J_0(r') dr'$$

Y por último, es realizada la integración de la función obtenido la función Bessel de primer orden.

$$\mathbf{F}\{\mathbf{Circ}(r)\} = \frac{\mathbf{1}}{\rho} \mathbf{J}_1(2\pi \rho)$$

(4.17)

Como resultado final en la ecuación 4.175, se obtiene la Transformada de Fourier de una función circular, correspondiente a una función Bessel de primer orden para nuestro caso.

Por último, el resultado de la transformada de Fourier de la función pupila, que corresponde en el producto punto de las transformadas de Fourier de las funciones rectangular y circular es:

$$FP = \text{Sinc}(\pi(xfx)) \frac{1}{\rho} J_0(2\pi\rho) \quad (4.18)$$

Ahora, la expresión obtenida en la ecuación 4.18, representada la función pupila que indica la ecuación 4.6, para conseguir la formación de imágenes, de acuerdo a los parámetros dados a la rejilla y obtener el número de órdenes de difracción que uno desee conocer.

### 4.3 Análisis numérico

Es utilizado el software de Matlab para realizar el análisis numérico, además de utilizar como objeto de prueba la imagen de muestra de aceite y para la rejilla se ajustó el período para que obtengamos en la salida 5 órdenes de difracción (espectros).



Figura 4.8 a) Imágenes espectrales. b) Objeto de prueba. c) Función pupila.

Retomamos la ecuación 3, el cual en la Figura 4.8 es visualizada cada imagen con la función correspondiente con los términos de ecuación 3 ( $g$  = Imagen,  $o$  = Objeto y  $h$  = Función pupila).

Más adelante se muestra la transformada de Fourier de la función pupila, así como su gráfica, visualizadas en la Figura 4.9a y 4.9b:

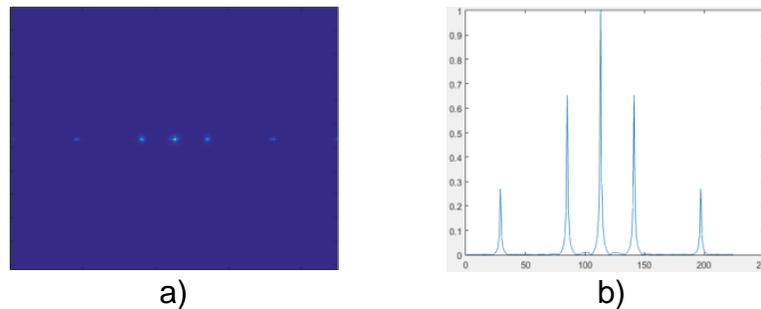


Figura 4.9 a) Transformada de Fourier de la función pupila para 5 órdenes de difracción. b) Gráfica de perfil de intensidad de la función pupila (derecha).

Un aspecto a tomar en cuenta para lograr visualizar individualmente cada orden de difracción es el diseñar un Filtro Notch, que permita el paso de cada una orden de difracción que se muestra en la Figura 4.9a.

### 4.3.1 Filtro Notch

Este tipo de filtro parte en la consideración de crear círculos a determinados radios de circunferencia que permita el paso de ciertas frecuencias. Así que en las siguientes expresiones se muestran las expresiones que permiten como diseñarlo para más adelante realizar la programación correspondiente.

$$circ = \left[ \left( x - \frac{M}{2} \right)^2 + \left( y - \frac{N}{2} - des \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$F. N. = 1 - \frac{1}{1 + \left[ \frac{f.c.}{circ} \right]^{2n}}$$

Donde:

$M, N$  = Dimensiones del filtro (objeto de prueba).

$x, y$  = coordenadas de función círculo.

$f.c.$  = Frecuencia de corte.

$n$  = Orden del filtro.

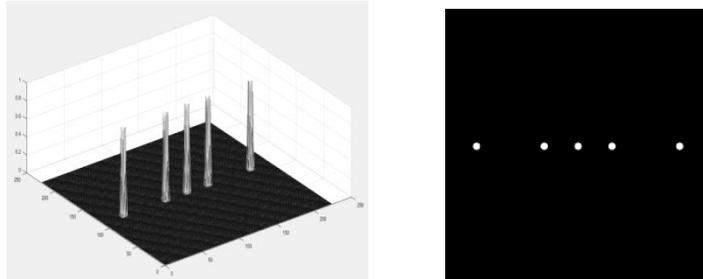


Figura 4.10 Filtro Notch en 3D (izquierda) y 2D (derecha).

Una variable llamada “des” corresponde a un vector que indica cada valor máximo de intensidad (valor máximo de pixel) de los órdenes de difracción y hace una relación de pixeles a una distancia, que nos permite desplazar el filtro a determinada posición, mediante el uso del ciclo for y el número de órdenes de difracción se logra visualizar cada uno. En la Figura 4.10 es mostrado como es el Filtro Notch en 3 dimensiones así como 2 dimensiones.

Por consiguiente es utilizando el filtro Notch para permitir el paso de cada orden de difracción y en la Figura 4.11 es visualizado.

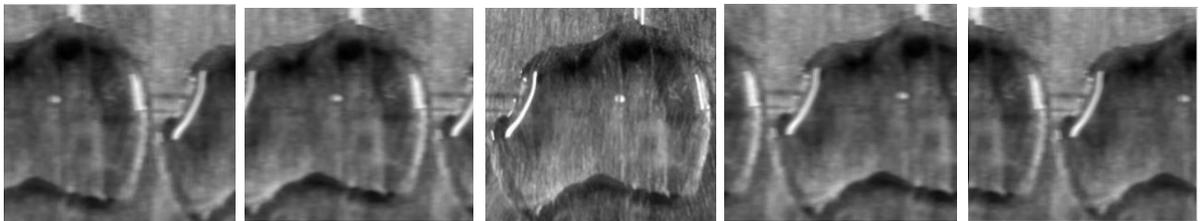


Figura 4.11 Imágenes espectrales individuales de los órdenes de difracción.

Ahora en la Figura 4.11, se muestra cada uno de los órdenes de difracción en imágenes con diferentes intensidades, esto siendo comparado a la gráfica de la Figura 4.9b.

Por último, como se puede observar en las imágenes de la Figura 4.11, se presenta un desplazamiento y cortado en cada figura del aceite, por lo que se ajustó el programa numérico para que cada orden de difracción sea colocado en el centro de la transformada de Fourier, obteniendo lo siguiente:

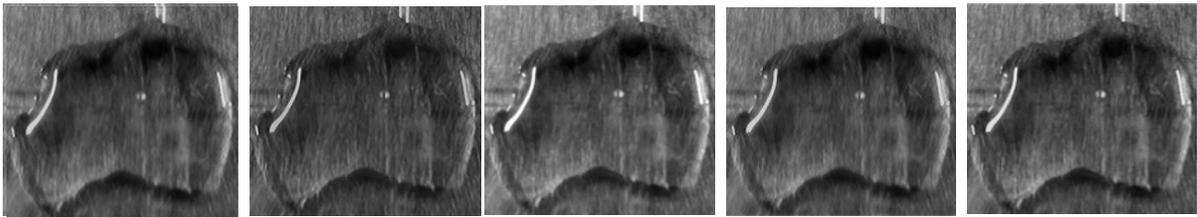


Figura 4.12 Imágenes espectrales individuales centradas de los órdenes de difracción.

#### 4.4 Desarrollo experimental del sistema formador de imágenes

La propuesta del sistema óptico formador de imágenes es mostrada en el siguiente esquema correspondiente en la Figura

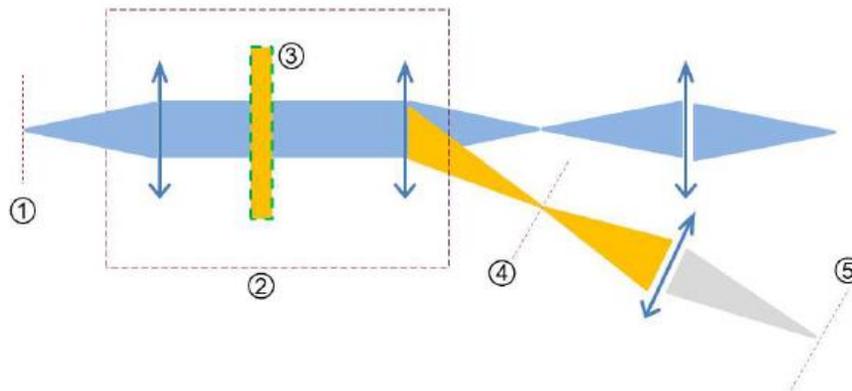


Figura 4.13 Configuración óptica del sistema formador de imágenes, 1. Plano objeto, 2.Sistema óptico, 3. Rejilla de difracción, 4.Primer orden de difracción, 5. Plano imagen espectral.

El montaje del sistema constituye con el uso de dos lentes de 50 mm en el bloque de la Figura 4.13.2, una lente de 100 mm que forma la imagen en el plano espectral visto en la Figura 4.13.5. Una rejilla de difracción colocada entre las lentes del bloque de la Figura 4.12.2. Cuando la luz pasa a través del sistema óptico, el frente de onda cambia y cuando sale del sistema, son obtenidos tres órdenes de difracción, en donde la Figura 4.13.4 es donde se examinara el comportamiento de las imágenes espectrales.

Un aspecto en el punto anterior, es ángulo de desviación del primer orden de difracción, pues en ella se puede determinar de acuerdo con la teoría redes de difracción, y en base al período de la rejilla así como la distancia que hay entre la rejilla y la pantalla, donde se originan los órdenes de difracción, se puede establecer la distancia que habría en cada orden, como se ve en la Figura 4.13.

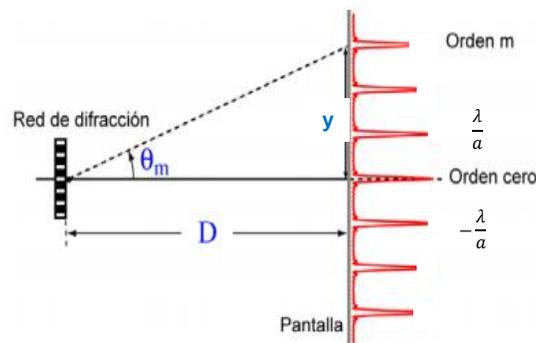


Figura 4.14 Patrón de difracción de una red de difracción. [66]

Además de considerar la siguiente ecuación que permite conocer ciertas características que involucran una red de difracción así como los órdenes de difracción.

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{a} \quad (4.19)$$

Donde:

$a$  = Distancia de cada ranura de la rejilla.

$m$  = número de orden.

$\lambda$  = Longitud de onda.

Ahora, si consideramos  $\theta$  que es muy pequeña, entonces  $\sin \theta \approx \frac{y}{D}$ , donde  $y$  es la distancia entre orden de difracción a analizar ( $m$ ) y el orden 0, y  $D$  es la distancia entre la rejilla de difracción y la pantalla, se aplica una relación entre dichas expresiones para conocer el valor de  $\theta$ , obteniendo la ecuación 4.19.

$$\sin \theta \approx \frac{y}{D} = \frac{m\lambda}{a}$$
$$\sin \theta \approx y = \frac{m\lambda D}{a}$$

(4.20)

Teniendo la ecuación 20 y conocidas las características de la rejilla de difracción, se realiza el cálculo correspondiente para conocer el ángulo de desviación que tendrá el primer orden de difracción.

$$a = 1000 \text{ líneas/mm} = 1\mu\text{m}.$$

$$m = 1$$

$$\lambda = 650 \text{ nm}$$

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$\theta = 40.5416^\circ$$

Para llevar a cabo el escaneo se considera el siguiente esquema de la Figura 4.15 donde el desplazamiento corresponde al eje x.

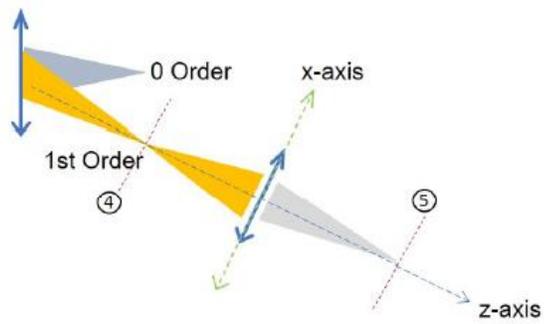


Figura 4.15 Desplazamiento mecánico en la detección óptica.

El escaneo de cada imagen espectral se realiza de manera lineal. La detección de las imágenes son llevadas a cabo con una Cámara Canon Reflex Rebel T9 con un sensor de tamaño 22.3 x 14.9 mm y 5196 x 3464 pixeles.

Este sistema es sintonizable y capaz de obtener una imagen espectral o un conjunto de imágenes espectrales de un objeto en el plano del objeto. La configuración del sistema propuesto en el laboratorio es mostrada en la Figura 4.16.

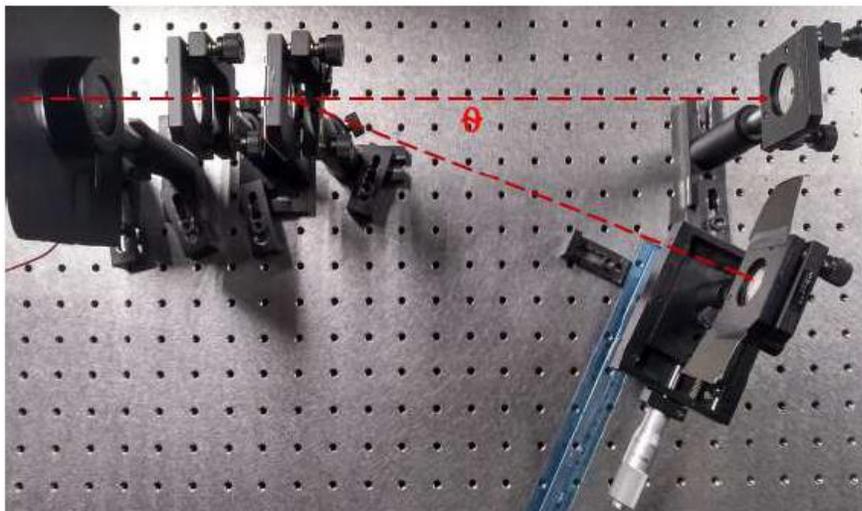


Figura 4.16 Montaje experimental real del sistema formador de imágenes.

## 5. CAPÍTULO 5 Resultados y discusión

En este capítulo se reportan las imágenes espectrales obtenidas con el sistema formador de imágenes con el fin de caracterizar el sistema, de acuerdo a determinados desplazamientos, así como los objetos de prueba utilizados para verificar el funcionamiento del sistema propuesto.

### 5.1 Pruebas preliminares

Se tiene como primera prueba preliminar las imágenes del orden cero del sistema, así como la del primer orden de difracción.



Figura 5.1 Pruebas preliminares del sistema formador de imágenes. a) Orden cero de difracción, b) Primer orden de difracción.

También se incluye en la Figura 5.2 el comportamiento del espectro del orden cero de difracción del sistema formador de imágenes con la fuente de luz blanca.

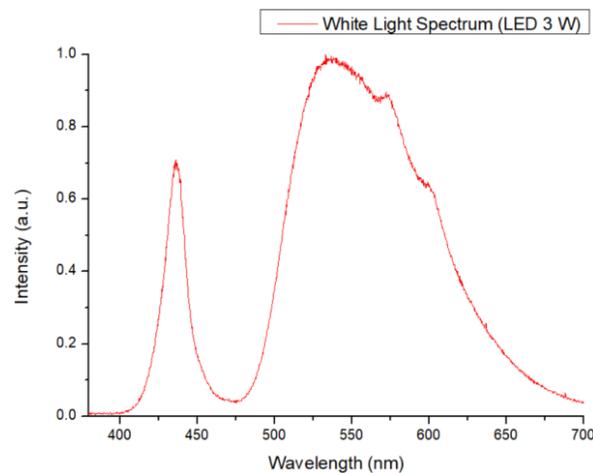


Figura 5.2 Espectro de la fuente de luz.

## 5.2 Caracterización con objeto transparente

Se realizaron experimentos con diferentes longitudes de onda que validan el sistema formador de imágenes espectrales, tal como se observa en la Figura 4.15, el espectro electromagnético va de los 425.4 nm a 658.6 nm.

El primer experimento se realizó usando un barrido de 8.7 nm obteniendo 24 imágenes espectrales y comparando con el espectrofotómetro OceanOptics USB400. La Figura 5.3 muestra el conjunto de imágenes espectrales correspondientes a un desplazamiento de 5 mm, que si se apilan una a una se vuelve un cubo de imágenes espectrales o hiperespectrales. Estas imágenes fueron desplazadas en el plano de imagen espectral que corresponde a la Figura 4.16.

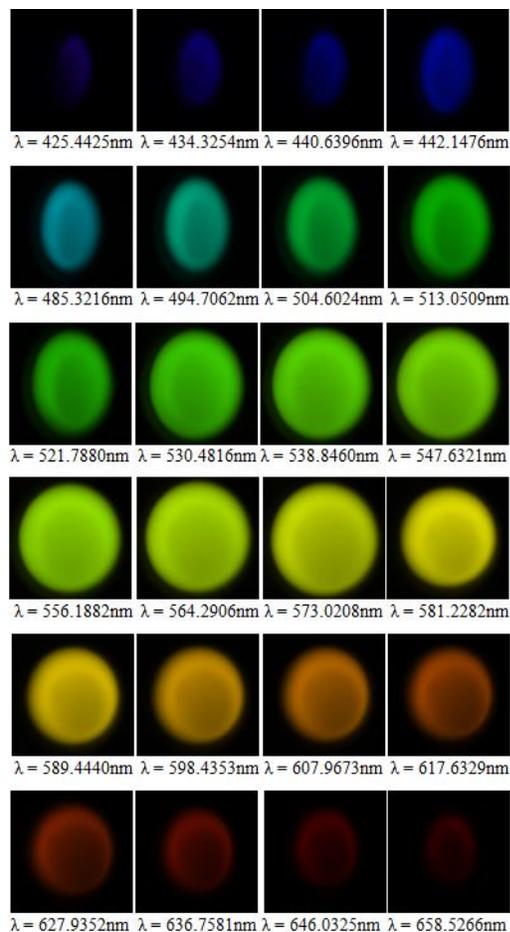


Figura 5.3. Imágenes espectrales a un desplazamiento de 5 mm.

También es presentado en una gráfica los espectros de las imágenes espectrales presentadas de la Figura 5.4.

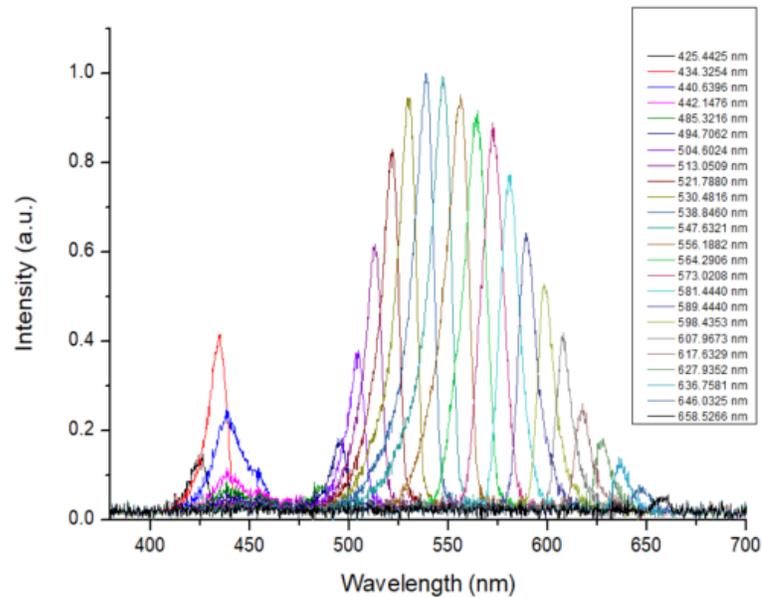


Figura 5.4. Espectros del objeto de prueba (abertura del diafragma).

En la Tabla 1, se muestran a detalle la posición, longitud de onda y el desplazamiento entre cada espectro que se fue obtenido.

	<b>Posición [mm]</b>	<b>Longitud de onda [nm]</b>	<b>Desplazamiento entre cada espectro [nm]</b>
<b>1</b>	0	425.4425	
<b>2</b>	0.508	434.3254	8.8829
<b>3</b>	1.016	440.6396	6.3142
<b>4</b>	1.524	442.1476	1.508
<b>5</b>	2.032	485.3216	43.174
<b>6</b>	2.54	494.7062	9.3846
<b>7</b>	3.048	504.6024	9.8962
<b>8</b>	3.556	513.0509	8.4485
<b>9</b>	4.064	521.7880	8.7371
<b>10</b>	4.572	530.4816	8.6936

<b>11</b>	5.08	538.8460	8.3644
<b>12</b>	5.558	547.6321	8.7861
<b>13</b>	6.096	556.1882	8.5561
<b>14</b>	6.604	564.2906	8.1024
<b>15</b>	7.112	573.0208	8.7302
<b>16</b>	7.62	581.2282	8.2074
<b>17</b>	8.128	589.4440	8.2158
<b>18</b>	8.636	598.4353	8.9913
<b>19</b>	9.144	607.9673	9.532
<b>20</b>	9.652	617.6329	9.6656
<b>21</b>	10.16	627.9352	10.3023
<b>22</b>	10.668	636.7581	8.8229
<b>23</b>	11.176	646.0325	9.2744
<b>24</b>	11.684	658.5266	12.4941

Tabla 5.1 Resultados experimentales para la obtención de imágenes espectrales.

Ahora, se presenta otro experimento que muestra la capacidad del sistema óptico para obtener más imágenes espectrales, tomando en cuenta un desplazamiento de 1 mm, donde se muestra en la Figura 4.15 el desplazamiento.

En la Figura 5.5 se presentan las imágenes espectrales donde son llevados desplazamientos de 1 mm entre cada imagen y el barrido entre las imágenes corresponde a un valor aproximado de 1.6 nm.

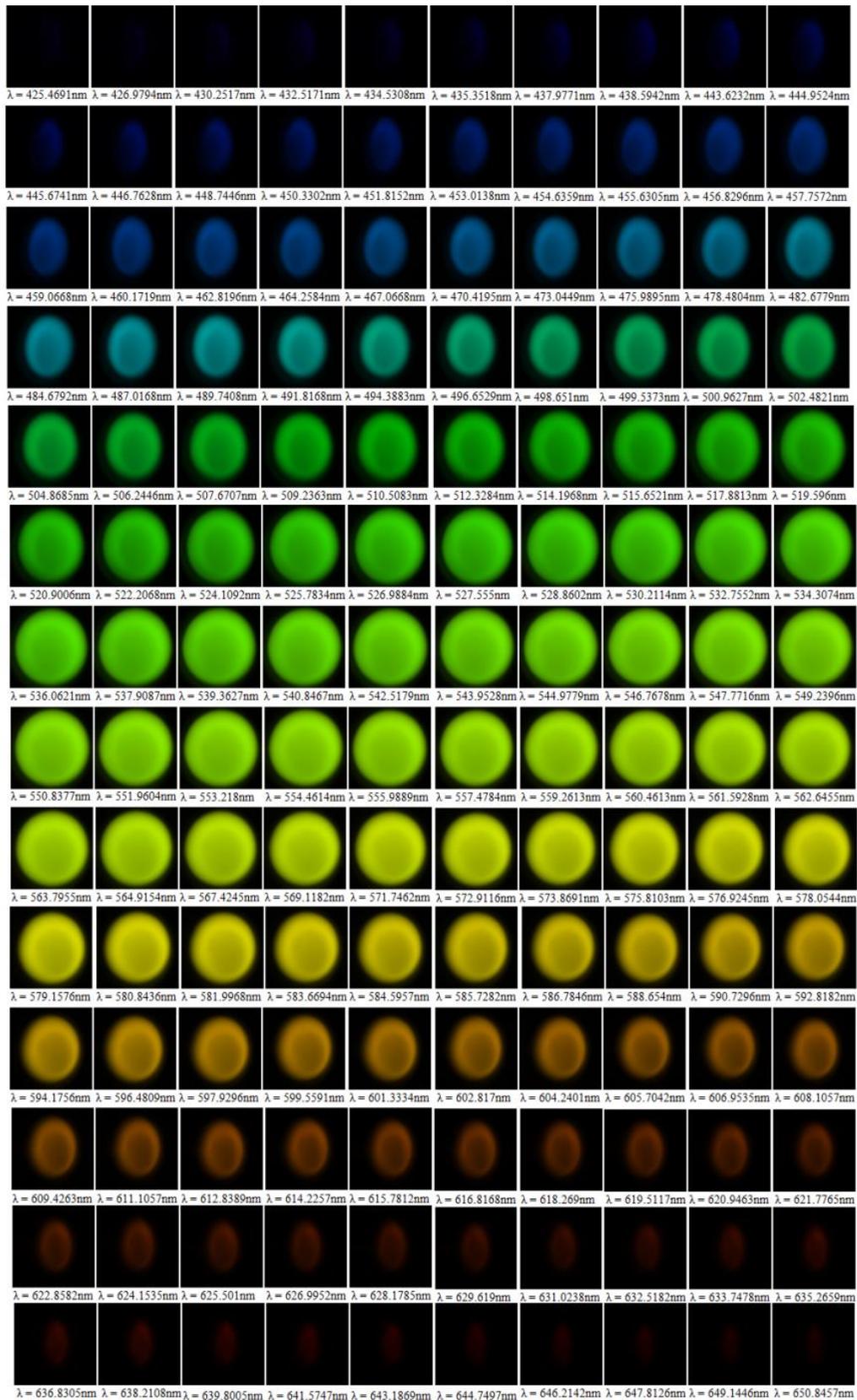


Figura 5.5. Imágenes espectrales a un desplazamiento de 1 mm.

Las diez primeras imágenes corresponden a longitud de onda de  $\lambda = 425.4$  nm a 444 nm; la bajo intensidad se debe a la iluminación LED de la Figura 4. El mismo fenómeno ocurre en la últimas veinte imágenes del espectro de LED.

Es presentado en una gráfica los espectros de las imágenes espectrales presentadas de la Figura 5.6.

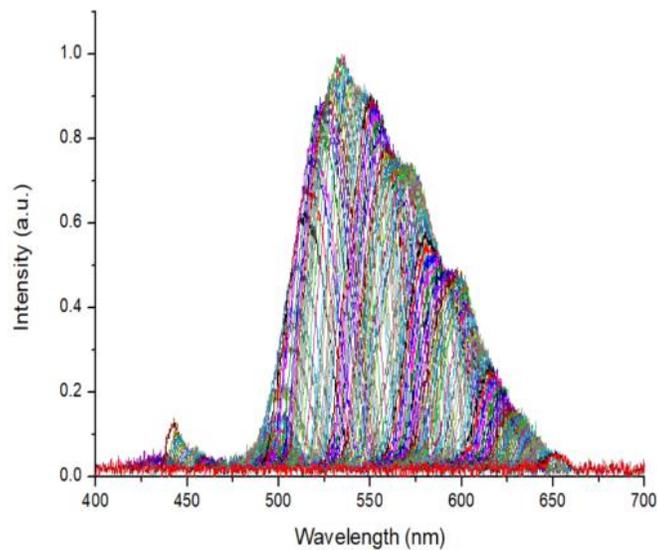


Figura 5.6. Espectros del objeto de prueba (abertura del diafragma).

### 5.3 Caracterización con objetos opacos (LED verde y LED rojo)

En la Figura 5.7 se presenta la imagen del LED verde y su espectro.

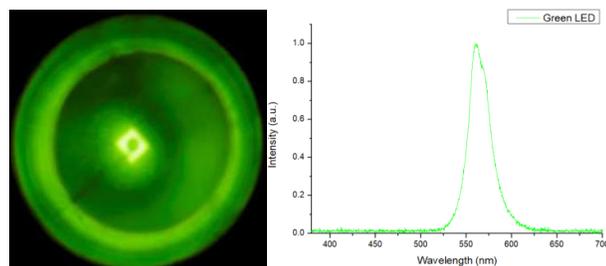


Figura 5.7. Imagen del Led Verde y su espectro 560.9782 nm.

Ahora, las imágenes espectrales del sistema óptico corresponden con imágenes hiperespectrales. El escaneo se realizó mediante 100 imágenes espectrales en el rango de  $\lambda = 551 - 577$  nm, obteniendo 26 nm de ancho espectral como la región de medición. La Figura 5.8 presenta los resultados de las pruebas realizadas en el LED verde.

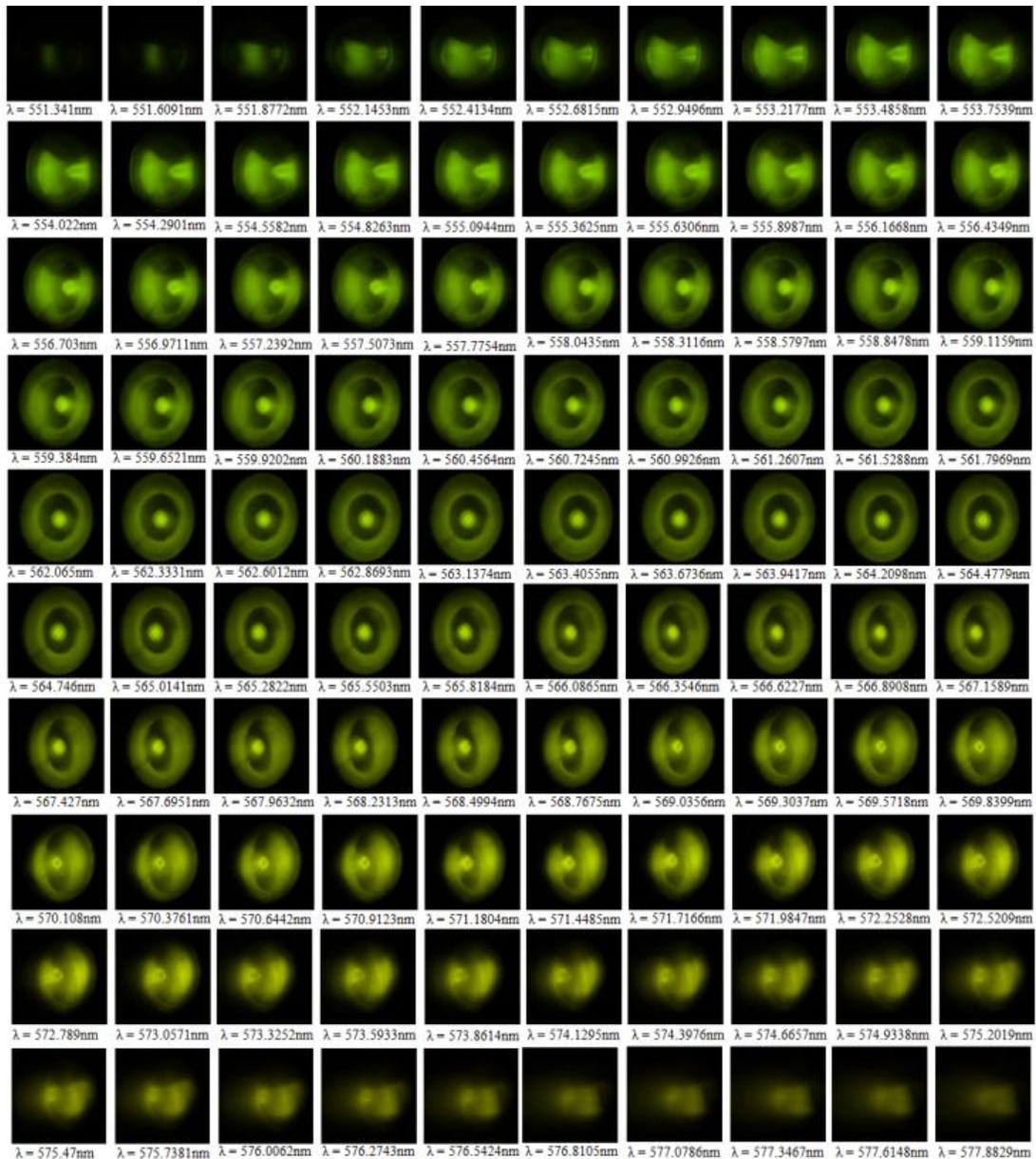


Figura 5.8. Imágenes espectrales del LED verde.

Es importante para ver que las primeras 25 imágenes espectrales mostraban la formación sobre el filamento del LED, los próximos 40 imágenes espectrales mostradas sobre la iluminación y Las imágenes espectrales mostradas sobre la iluminación y las últimas 35 imágenes espectrales presentan la información del filamento.

Ahora, es usado un LED rojo como segundo objeto de prueba. En la Figura 5.9 se presenta la imagen del LED rojo y su espectro.

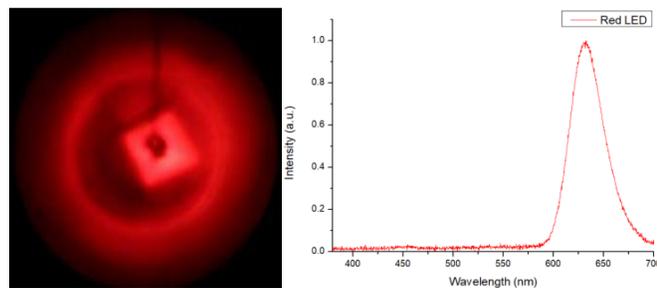


Figura 5.9. Imagen del Led Rojo y su espectro 632.3578 nm.

El ancho espectral para el LED rojo corresponde a valores de 613 - 654 nm, obteniendo 41 nm de ancho como la región de medición. La Figura 5.10 muestra los filamentos del LED rojo en la primeras imágenes espectrales con una longitud de onda de  $\lambda = 613$  nm a  $\lambda = 621$  nm. Es claro que obtenemos más información espectral sobre el objeto. Cabe mencionar que para ambos LED, los resultados se validaron mediante un Espectrómetro Ocean Optics.

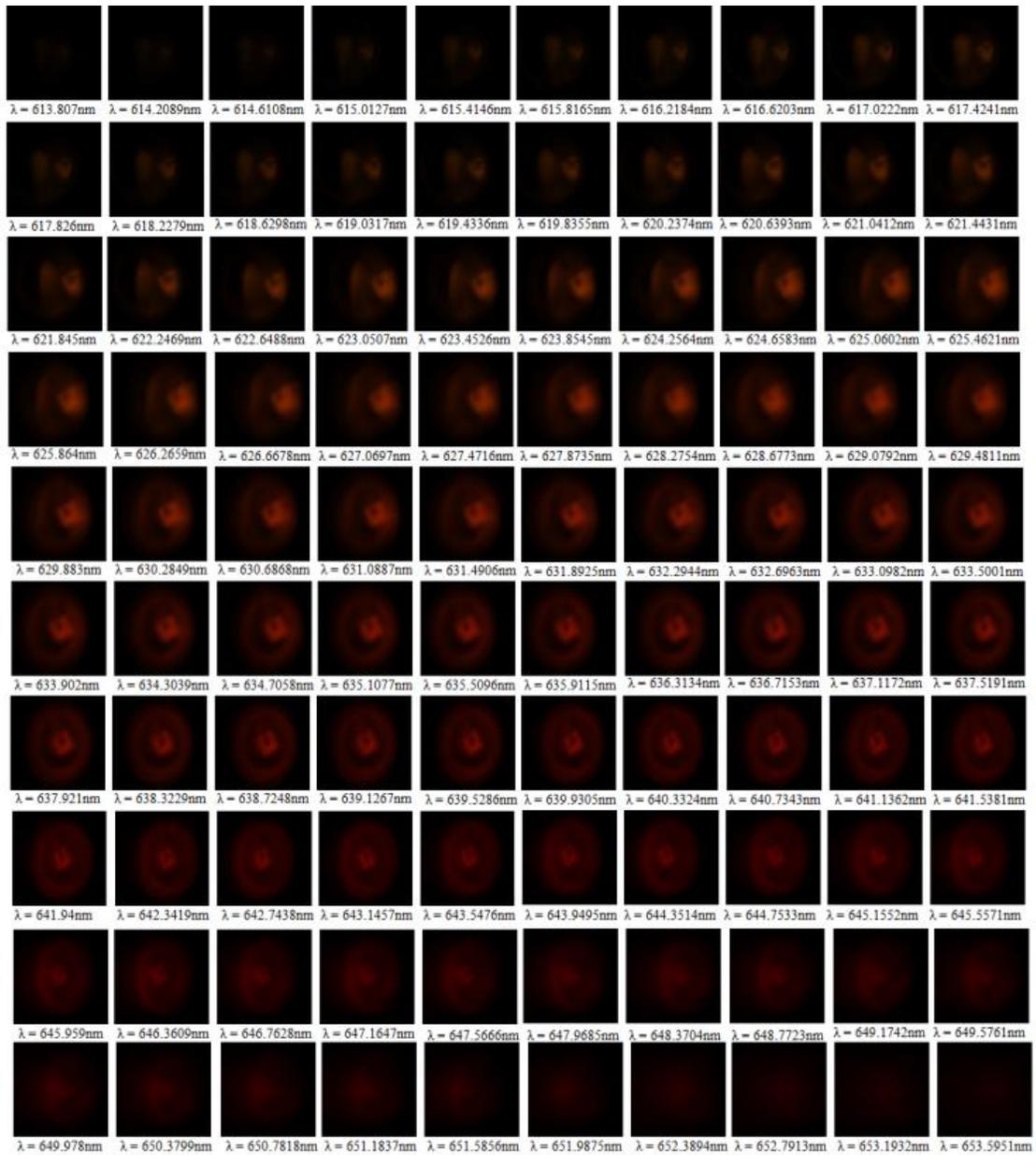


Figura 5.10. Imágenes espectrales del objeto (LED rojo).

#### 5.4 Caracterización de aceites

Es realizado mediciones espectrales de los aceites para posterior observar las imágenes espectrales obtenidas mediante el sistema formador de imágenes. En donde en la Figura 5.11, se observan tres aceites aislantes correspondientes a las fases de un transformador eléctrico.



Figura 5.11 Aceites aislantes de muestra de un transformador eléctrico.

Más adelante se analiza el espectro de cada muestra de aceite, con el fin de conocer hacia que región del espectro electromagnético es más perceptible visualizar.

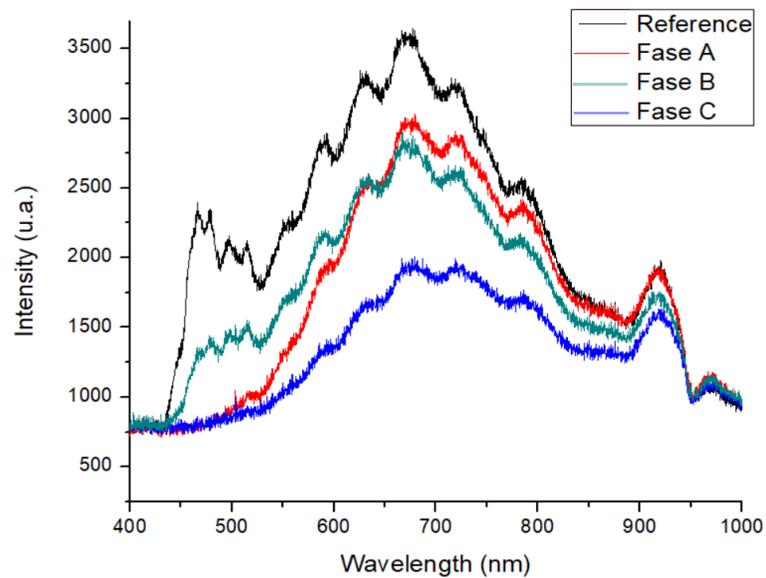


Figura 5.12 Espectro de cada aceite aislante.

Se puede observar en la gráfico de la Figura 5.12 que el pico más alto de cada espectro del aceite, tiende a encontrarse a 680 nm, el cual esta clase de aceites nos indican que en la región del color rojo o infrarrojo cercano, pueden ser captados por el espectrofotómetro.

Un parámetro que es de considerar en el funcionamiento de los transformadores, es la temperatura en la que se ven expuestos, por lo que

en estas pruebas fueron llevadas a cabo bajo ciertas condiciones controladas.



Figura 5.13. Calentamiento y medición de temperatura del aceite.

En las siguientes imágenes de la Figura 5.14 se muestran los espectros de cada Fase de los aceites a distintas temperaturas.

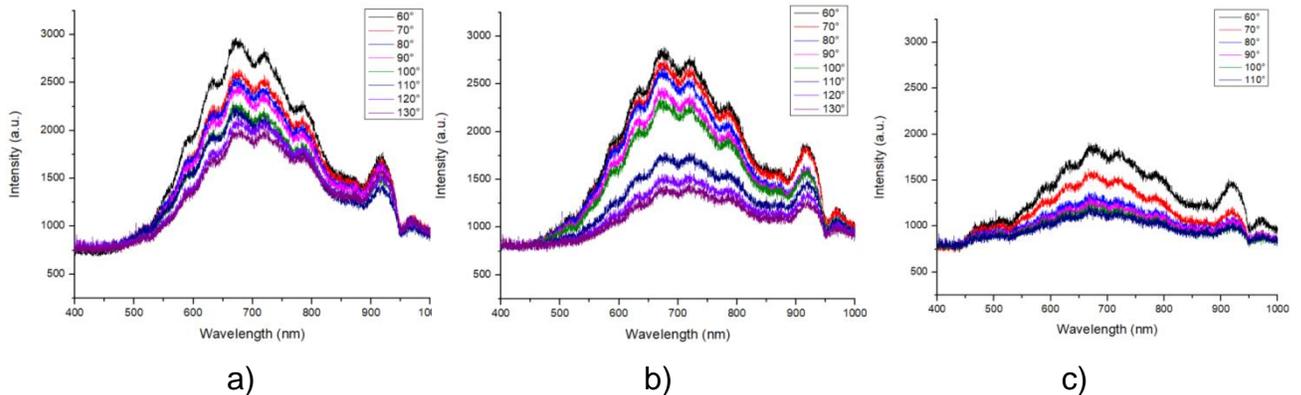
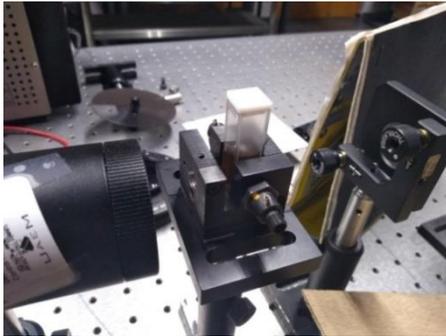


Figura 5.14. Espectro de cada aceite aislante sometido a una determinada temperatura a) Aceite de Fase A. b) Aceite de Fase B. c) Aceite de Fase C.

Se puede visualizar que en los espectros de los aceites de la Figura 5.14, al aumentar la temperatura, empieza a disminuir la intensidad de cada aceite visto espectralmente, pues fueron realizadas las pruebas en un rango de 60 °C a 130 °C, esto en los aceites de Fase A y B, ya que en el caso de la Fase C, se llevó el incremento hasta 110 °C, debido a que en algún momento empezaba a presentarse un burbujeo en cada muestra y esto ocasionaba

que el líquido empezara a moverse dentro de la celda y las mediciones no fueran las adecuadas para temperaturas más altas a las registradas.

Conocido el comportamiento de cada aceite de manera espectral al ser sometidas a una temperatura, fue llevado a cabo la captura de las imágenes espectrales mediante el sistema óptico formador de imágenes. En donde el ajuste al sistema formador de imágenes propuesto que se ha efectuado es en el cambio donde es colocado el objeto a medir, en este caso como es visto en la Figura 5.15a, la colocación de la celda con el aceite de alguna Fase para ser medido con el sistema. Además para estas pruebas fue considerado trabajar en tres regiones particulares, que en nuestro caso práctico son en las regiones de longitud de onda de 460 nm, 540 nm y 620 nm respectivamente.



a)



b)

Figura 5.15. a) Celda donde es colocada cada muestra de aceite. b) Espectro de la celda a 460 nm, 540 nm y 620 nm respectivamente.

Así que en la Figura 5.15b, se muestran las regiones en donde se estarán reportando las mediciones obtenidas que en este caso son las imágenes espectrales de la celda, con el fin de tener una referencia en las mediciones.

Más adelante, se tomaran capturas de las imágenes espectrales de cada Fase del aceite a ciertas temperaturas, en este caso 20°, 60°, 80° y 100°. De tal manera se visualizaran en las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18.

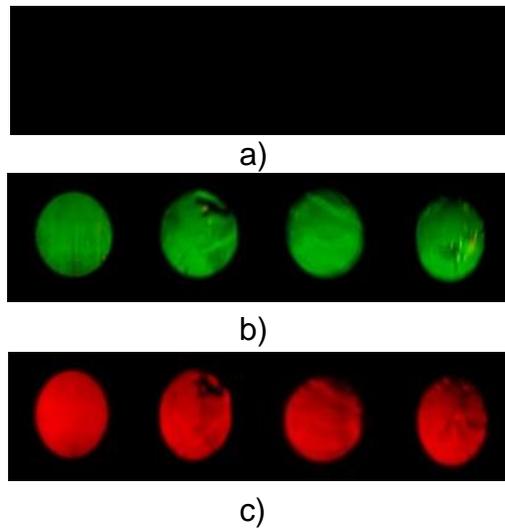


Figura 5.16. Imágenes espectrales del aceite Fase A con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm.

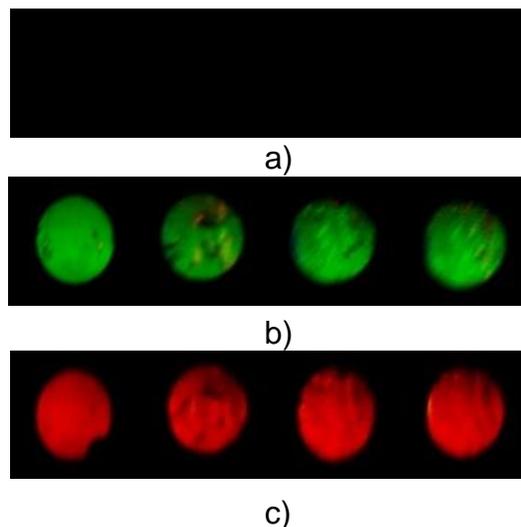


Figura 5.17. Imágenes espectrales del aceite Fase B con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm.

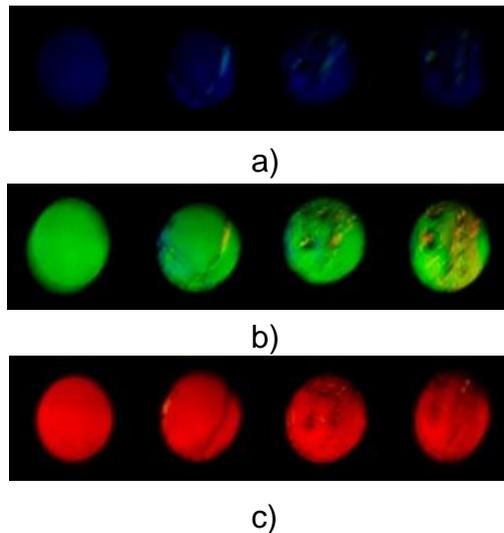
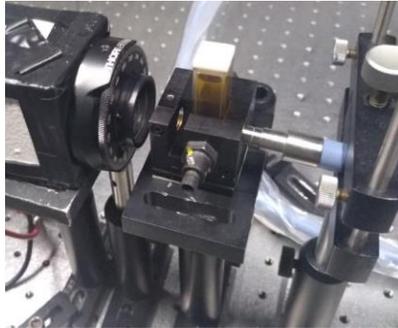


Figura 5.18. Imágenes espectrales del aceite Fase C con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm.

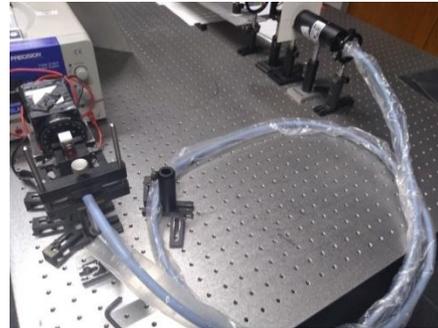
De acuerdo con las imágenes espectrales presentadas en la Figura 5.16a y 5.17a, no son visibles y por consiguiente el incremento de temperatura no se ve afectado de ello, debido a que en esa región dichos aceites no se ven expuestos a esa longitud de onda, pero en la Figura 5.18a es visualizada ligeramente las imágenes espectrales, por lo que son analizados los bits de esas imágenes y se puede conocer que al incrementar la temperatura, los bits que representan dichas imágenes van perdiendo cierta claridad. Para los otros casos de las imágenes espectrales, se puede observar que la calidad de la imagen presentada ciertas condiciones que aparecen zonas oscuras, como en las Figuras 5.16b, 5.16c, 5.17b, 5.17c, 5.18b y 5.18c, debido a que el aceite empieza a presentar burbujas con el incremento de la temperatura y en un determinado momento del tiempo, éstas fueron captadas con la cámara, siendo capturadas y mostrando que la calidad de bits de la imagen sea disminuido.

#### 5.4 Caracterización de aceites con el uso de la Fibra óptica

Presentado los resultados previos de las muestras del aceite, se continúa con la parte experimental del uso de una Fibra óptica de plástico de tipo multimodo. A continuación se muestra el uso de la fibra óptica con el sistema formador de imágenes.



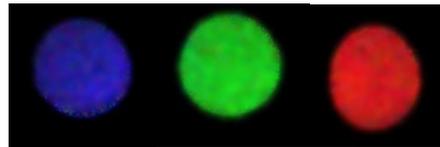
a)



b)



c)



d)

Figura 5.19. Implementación de la fibra óptica de plástico al sistema formador de imágenes. a) La celda (muestra de aceite) se encuentra entre la fuente de luz y la fibra óptica. b) Fibra óptica colocada antes del sistema formador de imágenes y después de la celda. c) El sistema formador de imágenes recibirá información (imagen) de parte de la fibra óptica. d) Visualización del espectro de la celda con el uso de la fibra óptica a 460 nm, 540 nm y 620 nm respectivamente.

Se muestran a continuación las imágenes espectrales de los aceites utilizando la fibra óptica.

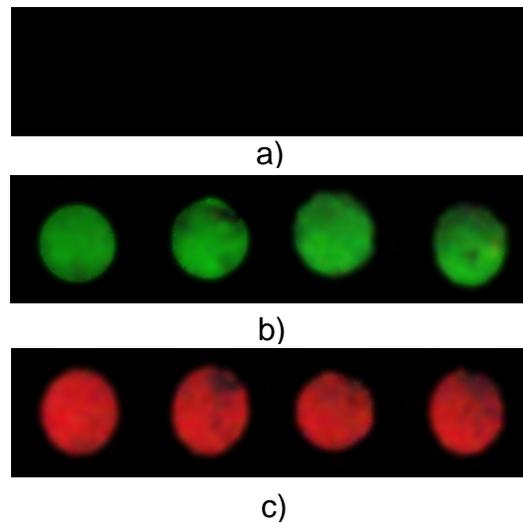


Figura 5.20. Imágenes espectrales del aceite Fase A con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm utilizando la fibra óptica.

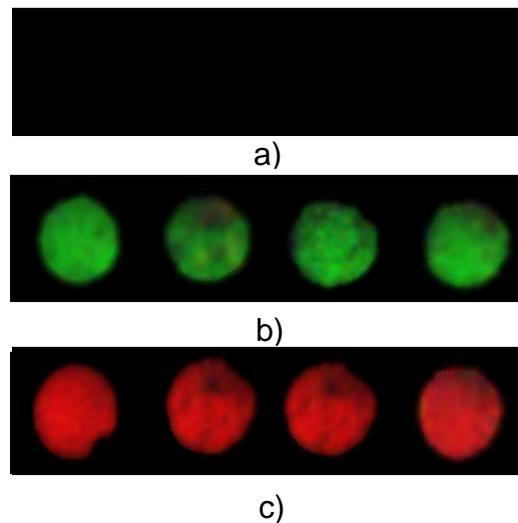


Figura 5.21. Imágenes espectrales del aceite Fase B con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm utilizando la fibra óptica.

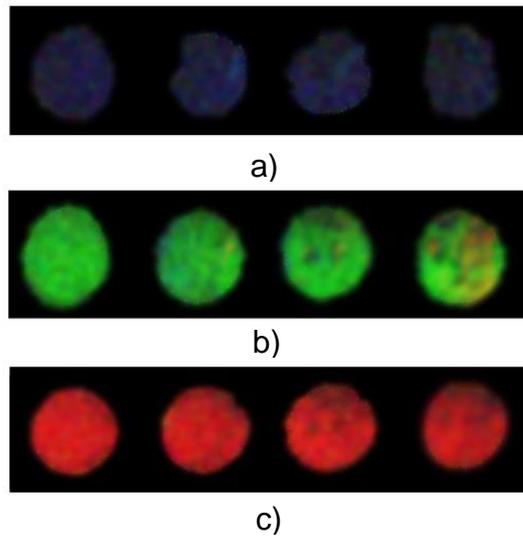


Figura 5.22. Imágenes espectrales del aceite Fase C con temperaturas de 20 °C, 60 °C, 80 °C y 100 °C respectivamente, en una determinada longitud de onda a) 460 nm. b) 540nm. c) 620 nm utilizando la fibra óptica.

En cada una de las imágenes espectrales de las Figuras 5.20, 5.21 y 5.22, se visualiza una cierta disminución de intensidad y el contenido del aceite disminuye, además de presentar algunas zonas de ausencia de la longitud de onda en cuestión.

Un aspecto que se considerará en el análisis de las imágenes espectrales de cada fase del aceite, es la profundidad de color, ya que es el número de bits que definen cada pixel, el cual determina el máximo número de colores que se pueden tener, dicho en otras palabras, determina la cantidad de colores que van a poder mostrar nuestra imagen. Así que a más profundidad, más colores podrán ser representados. Tomando en cuenta el parámetro de profundidad de color, se incluye la temperatura que serán sometidos los aceites. Por lo que se considerará una relación de Temperatura-Bits y para ser representados son llevados a cabo gráficas que van a permitir conocer el

comportamiento de cada muestra. Estas gráficas son vistas en las Figuras 5.23, 5.24 y 5.25.

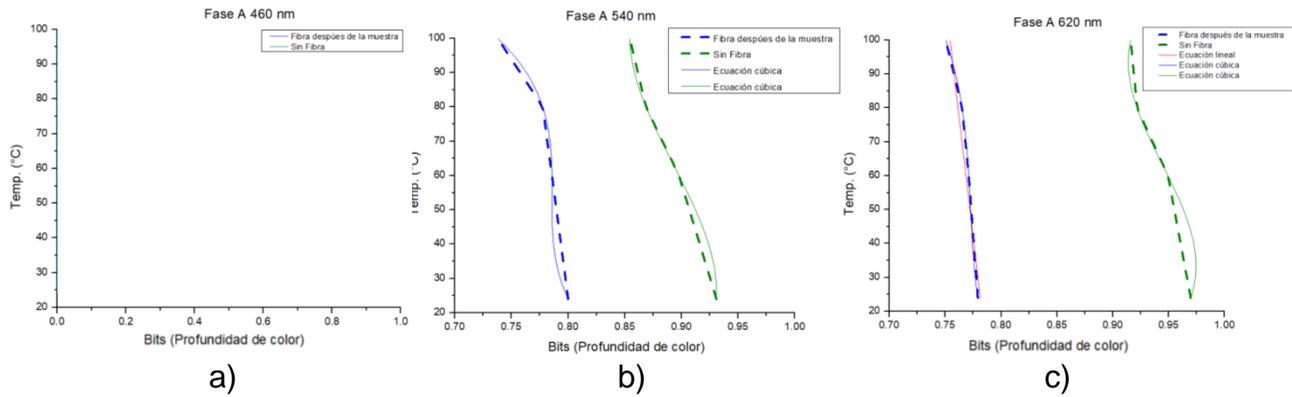


Figura 5.23. Gráficas del comportamiento de Temperatura-Bits (profundidad de color) de la Fase A del aceite aislante con la fibra óptica. a) 460 nm. b) 540 nm. c) 620 nm.

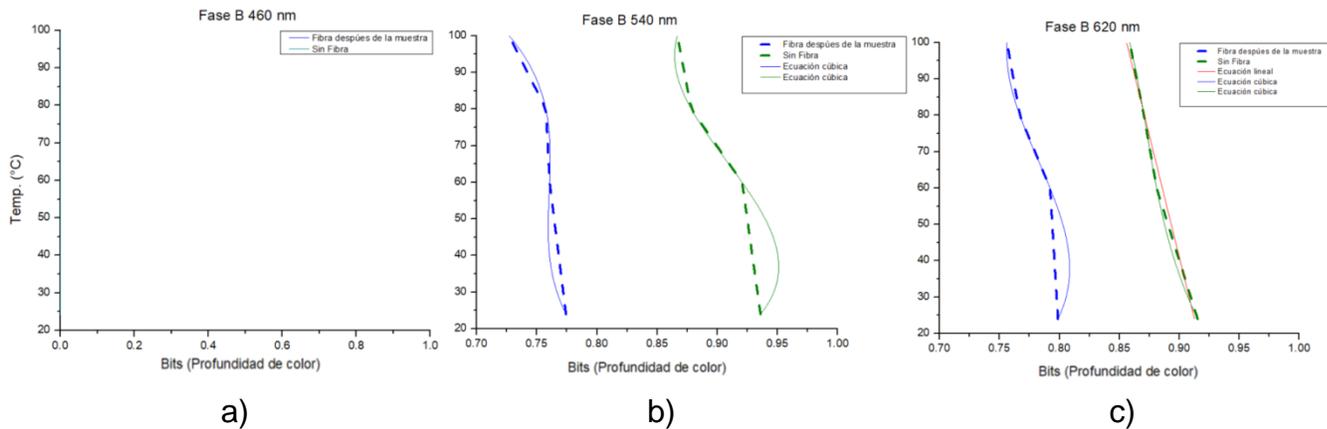


Figura 5.24. Gráficas del comportamiento de Temperatura-Bits (profundidad de color) de la Fase B del aceite aislante con la fibra óptica. a) 460 nm. b) 540 nm. c) 620 nm.

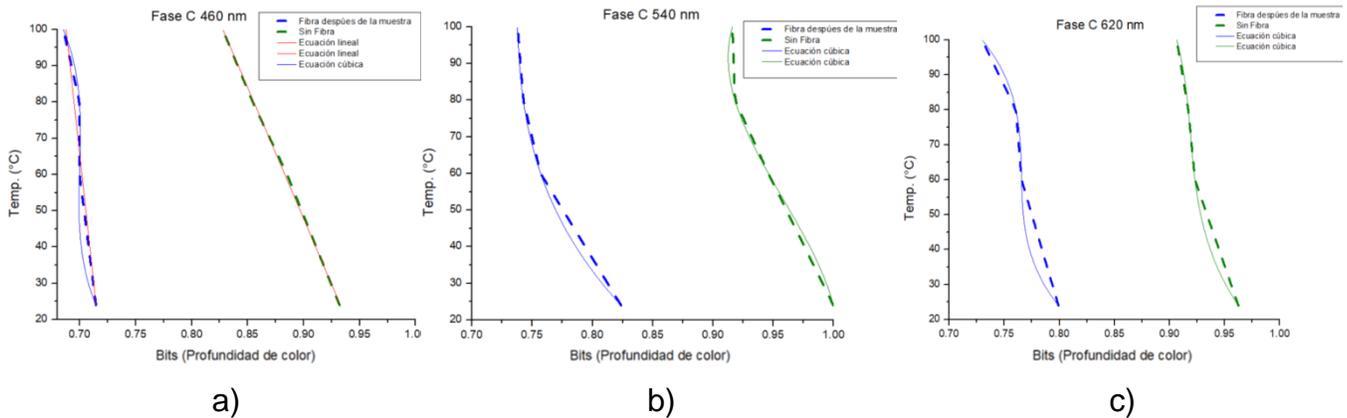


Figura 5.25. Gráficas del comportamiento de Temperatura-Bits (profundidad de color) de la Fase C del aceite aislante con la fibra óptica. a) 460 nm. b) 540 nm. c) 620 nm.

En cada gráfica se presentan dos líneas de comportamiento, la primera (línea punteada azul) corresponde al comportamiento de las imágenes espectrales utilizando la fibra óptica, mientras la segunda (línea punteada verde) es el comportamiento de las imágenes sin usar la fibra. Además en cada gráfico se dispuso mediante una herramienta utilizada en el software Origin, que permitiera obtener algunas ecuaciones ya sea lineal o cúbica, para comparar los resultados obtenidos para conocer si se logra tener una relación o similitud entre las curvas mostradas y así obtener una expresión que pueda caracterizar el comportamiento de algún aceite.

## 5.6 Discusión

El control en el sistema de detección en el plano espectral puede generar un conjunto de imágenes espectrales o de imágenes hiperespectrales, se mostraron 24 imágenes espectrales con una resolución de 8.7 nm, 140 imágenes con una resolución de 1.6 nm. También se realizó la captura de imágenes para objetos, en este caso LEDs comerciales, obteniendo 100

imágenes espectrales para cada caso, con una resolución de 0.26 nm en el LED verde y 0.41 nm para el LED rojo. Pero en cada caso existe un ancho espectral donde se puede ajustar la cantidad de imágenes de acuerdo al barrido que uno requiera analizar, por lo que este sistema formador de imágenes tiene la capacidad de ajustar su barrido hasta mediciones de 25.4 mm y con esto se puede ampliar la cantidad de imágenes espectrales que uno desea analizar.

El uso de las longitudes de onda usadas para analizar los aceites ya sea sin y con la fibra óptica, fue considerado al formato RGB debido a que corresponden a una síntesis aditiva, pues es un modelo que permite explicar la obtención de un color a partir de la suma de los componentes del espectro visible, ya que varios dispositivos electrónicos requieren de este modo para obtener un mejor desempeño en las imágenes digitales.

Analizando las gráficas correspondientes a la relación Temperatura-Bits, Figuras 5.23, 5.24 y 5.25, se puede destacar que en la gráfica de Figura 5.25a que corresponde en la longitud de onda de 460 nm, se podría considerar el uso para ambos casos (uso de la fibra y sin el uso) para realizar pruebas más precisas en la medición de aceites, ya que permite operar en un rango de temperatura más amplio (100 a 20 °C) y la posibilidad de trabajar con una ecuación (generada por el software Origin) que pueda caracterizar de mejor manera las mediciones en esa región. Aunque para el comportamiento de la curva de operación con el uso de la fibra, se esperaría obtener una diferencia muy pequeña entre cada imagen espectral.

## **CAPÍTULO 6 Conclusiones y recomendaciones**

De acuerdo a los resultados obtenidos con las pruebas realizadas al sistema formador de imágenes, se obtuvo una resolución de 1.6 nm cuando se capturaron 140 imágenes espectrales dentro de un rango en longitud de onda de 425.4691 nm hasta 650.8457 nm. Para las pruebas de los LEDs se obtuvo una resolución de 0.26 nm (LED rojo) y 0.41 nm (LED verde). En cuanto el uso de la fibra óptica al ser aplicado a los aceites, siendo clasificados como Fases A, B y C, estos siendo sometidos a cambios de temperatura donde se obtuvo una sensibilidad de 0.0018 bits/°C en un rango de 60°C a 20 °C para el aceite Fase B de 620 nm donde es la variación más pequeña obtenida, pero para un mayor rango de temperatura, 75°C a 20°C se tiene una sensibilidad de 0.0039 bits/°C, este valor para el aceite Fase C de 460 nm. Ahora si no es utilizada la fibra óptica para el estudio de los aceites en el sistema, se obtiene que el de mayor rango de temperatura, 100 °C a 20°C presenta una sensibilidad de 0.0145 bits/°C, este en el aceite Fase C de 460 nm y para el caso de menor sensibilidad es el aceite Fase de 540 nm con un valor de 0.0057 bits/°C en un rango de temperatura de 60 °C a 30 °C.

En base a los objetivos particulares presentados para este trabajo se puede comentar que:

### Objetivo particular 1

- Estudio de la teoría de difracción de la luz usando rejillas aplicadas a la formación de imágenes

Se presenta un análisis matemático de la formación de imágenes en base al uso de las rejillas de difracción, así que la siguiente expresión fue obtenida mediante el uso de las funciones circular y rectangular que son tomadas en cuenta al llevar a cabo la consideración de la implementación de un pinhole

y forma de la rejilla de difracción, en el cual es aplicado el producto punto de las transformadas de Fourier de las funciones rectangular y circular;

$$FP = Sinc(\pi(xfx)) \frac{1}{\rho} J_0(2\pi\rho).$$

Se ajustó previamente la expresión anterior debido a que la transformada de Fourier de la función rectangular correspondía a  $Sen(\pi(fx))/\pi(fx)$ , por lo que es utilizada una identidad trigonométrica donde la función *Sinc* ayuda a reducir términos al ser implementada. Además en la transformada de la función circular se realizan cambios de variables de dominio y al estar trabajando en un plano cartesiano, se ajusta a un plano polar y mientras se realizan las operaciones pertinentes se llega a una expresión  $e^{-2\pi i r \rho (\cos(\theta - \varphi))} d\theta$ , donde se puede sustituir con la función Bessel, obteniendo  $J_0(2\pi r \rho) 2\pi dr$ , esto debido a que se presenta una situación física donde hay simetría cilíndrica y es parte de la aplicación de la función Bessel, así que se van reduciendo términos, volver a realizar cambios de variable y al final la integración para obtener a la ecuación mostrada previamente, denominada como función pupila (*FP*). En el cual con esta expresión nos permitió realizar un estudio numérico para simular su comportamiento y comprender la manera en cómo se visualizan las imágenes espectrales.

#### Objetivo particular 2

- Caracterizar un sistema formador de imágenes en el espectro visible.

El control en el sistema de detección en el plano espectral puede generar un conjunto de imágenes espectrales, en la que le primera prueba se mostraron 24 imágenes espectrales con una resolución de 8.7 nm. Una segunda prueba de 140 imágenes con una resolución de 1.6 nm. También se realizó la captura de imágenes para LEDs comerciales, obteniendo 100 imágenes espectrales para cada caso, con una resolución de 0.26 nm en el led verde

(rango de  $\lambda = 551 - 577$  nm) y 0.41 nm para el led rojo (rango de 613 - 654 nm). Pero en cada caso existe un ancho espectral donde se puede ajustar la cantidad de imágenes de acuerdo al barrido que uno requiera analizar, por lo que este sistema formador de imágenes tiene la capacidad de ajustar su barrido hasta mediciones de 25.4 mm y con esto se puede ampliar la cantidad de imágenes espectrales que uno desea analizar.

### Objetivo particular 3

- Desarrollar un sistema de iluminación-detección basado en fibra óptica para la clasificación del espectro del objeto (aceite aislante).

Mediante el uso de la fibra óptica para el sistema formador de imágenes, se realizaron diversas mediciones de acuerdo a las fases A, B y C del aceite aislante utilizado. Así que se consideró la relación temperatura y profundidad de color para conocer la sensibilidad que tiene el sistema formador óptico de acuerdo a las imágenes espectrales, así que a continuación es presentado los valores correspondientes de cada fase del aceite al utilizar la fibra óptica, además de los valores sin la fibra óptica.

#### ➤ Uso de la Fibra óptica

Fase A en la longitud de onda 540 nm en un rango de temperatura de 70 a 30 °C con una sensibilidad de 0.0038 bits/°C

Fase A en la longitud de onda 620 nm en un rango de temperatura de 60 a 40 °C con una sensibilidad de 0.0023 bits/°C

Fase B en la longitud de onda 540 nm en un rango de temperatura de 65 a 20 °C con una sensibilidad de 0.0037 bits/°C

Fase B en la longitud de onda 620 nm en un rango de temperatura de 55 a 20 °C con una sensibilidad de 0.0018 bits/°C

Fase C en la longitud de onda 460 nm en un rango de temperatura de 75 a 20 °C con una sensibilidad de 0.0039 bits/°C.

Fase C en la longitud de onda 540 nm en un rango de temperatura de 55 a 20 °C con una sensibilidad de 0.0186 bits/°C.

Fase C en la longitud de onda 620 nm en un rango de temperatura de 60 a 20 °C con una sensibilidad de 0.0092 bits/°C.

➤ Sin la Fibra óptica

Fase A en la longitud de onda 540 nm en un rango de temperatura de 60 a 20 °C con un sensibilidad de 0.0093 bits/°C.

Fase A en la longitud de onda 620 nm en un rango de temperatura de 60 a 20 °C con un sensibilidad de 0.0058 bits/°C.

Fase B en la longitud de onda 540 nm en un rango de temperatura de 60 a 20 C°C con un sensibilidad de 0.0057 bits/°C.

Fase B en la longitud de onda 620 nm en un rango de temperatura de 60 a 20 °C con un sensibilidad de 0.0096 bits/°C.

Fase C en la longitud de onda 460 nm en un rango de temperatura de 100 a 20 °C con un sensibilidad de 0.0145 bits/°C.

Fase C en la longitud de onda 540 nm en un rango de temperatura de 80 a 20 °C con un sensibilidad de 0.0147 bits/°C.

Fase C en la longitud de onda 620 nm en un rango de temperatura de 60 a 20 °C con un sensibilidad de 0.0114 bits/°C.

Cabe recordar que en la longitud de onda de 460 nm para la Fase A y B, no fue posible obtener una imagen espectral con el uso de la fibra óptica, debido a la baja intensidad que proporciona, así que se omito realizar la comparación sin el uso de la fibra óptica.

El sistema formador de imágenes espectrales es una herramienta capaz de proporcionar información de acuerdo al uso que se plantee y las condiciones en la que se encuentra, ya que si es utilizada una fuente de luz con diferente operación de longitud de onda, podría operar el sistema, es cuestión de

analizar previamente el rango de longitud de onda y tener el sensor CCD apropiado para captar el rango de longitud de onda requerida.

En cuanto al uso de la fibra óptica para el sistema formador de imágenes espectrales, es cuestión de considerar la aplicación o necesidad que se requiera, ya que la fibra óptica utilizada ocasiona que se pierda cierta información de la muestra por ende si es muy importante visualizar el contenido de la muestra, es necesario utilizar el sistema sin la fibra óptica, pero si solamente es analizar muestras de acuerdo a su morfología y sin examinar muchos detalles, es posible utilizar la fibra óptica, ya que habrá cierta pérdida en la calidad de la imagen espectral, pero recordemos que el uso de la fibra óptica es bastante útil cuando se encuentren realizando mediciones donde se generan vapores explosivos o corrosivos, además es un elemento que no genera chispas y no se ve afectado por campos magnéticos, no se conduce electricidad y evitan generar calor al realizar la detección o iluminación de la muestra.

## **6.1 Recomendaciones**

Este sistema formador de imágenes puede modificarse en la captura de imágenes espectrales si se automatiza el desplazamiento del sistema utilizando algún sistema mecánico de motores para tener un control en la velocidad del desplazamiento al capturar imágenes con la cámara de manera automática.

Un aspecto a considerar en las pruebas son las vibraciones que se pueden presentar en el sistema formador de imágenes al realizar el desplazamiento, ya que en las mediciones realizadas no se consideró aquel estado. Por lo que si se desean capturar al instante imágenes espectrales, ante esto podría afectar en la visualización de la imagen si se da bastante importancia al

tomar en cuenta el contenido preciso de la muestra. Así que para el sistema diseñado es recomendable trabajar en un ambiente sin que se presente vibraciones al momento de analizar las imágenes espectrales.

## Referencias

1. Graña M., Maldonado O., Vicente D. *Morphological independence and hyperspectral image indexing*, SPIE Math. Meth. in Pat. and Image Analysis., 5916, 1–10, 2005.
2. M. Moore. *Hyperspectral Remote sensing*. Grupo Alava Ingenieros, 2014.
3. Avid Roman-Gonzalez, Natalia Indira Vargas-Cuentas. *Hyperspectral images analysis*. Researchgate.net, 2015.
4. Chein I-Chang. *Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification*. Springer Science, 2003.
5. Pramod K. Varshney, Manoj K. Arora. *Advanced Image Processing Techniques for Remotely Sensed Hyperspectral Data*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 978-3-662-05605-9, 2004.
6. Chein-I Chang. *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis*. Wiley, Imaging Systems & Technology. 978-0-471-69056-6, 2013.
7. Ali Madooei, Ramy Mohammed Abdlaty, Lilian Doerwald-Munoz, Joseph Hayward, et al. *Hyperspectral image processing for detection and grading of skin erythema*. Proc. SPIE Medical Imaging, Image Processing, 2017.
8. A. A. Gowen, C. P. O'Donnell, P. J. Cullen et al. *Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control*. Trends in Food Science & Technology, 18(12), 590-598, 2007.
9. H. D. Cheng, X. H. Jiang, Y. Sun, et al. *Color image segmentation: advances and prospects*. Pattern recognition, 34(12), 2259-2281, 2011.
10. Omar Palillero-Sandoval, Pedro Antonio Márquez-Aguilar Luis Raul Berriel-Valdos. *Engineering of apodizer filters in the optical imaging using a set of phase plates*. Optical Engineering. 55(10), 105103, 2016.
11. M. J. Ordóñez-Padilla, A. Olivares-Pérez, O. Palillero-Sandoval. *Holographic recording mechanism in albumin films with iron ions*.

- Practical Holography XXXI: Materials and Applications. SPIE Vol. 10127 2017.
12. César Isaza, Julio M. Mosquera, Gustavo A. Gómez-Méndez, Jonny P. Zavala-De Paz, Ely Karina Anaya, José A. Rizzo-Sierra, Omar Palillero-Sandoval. *Development of an acousto-optic system for hyperspectral image segmentation. Metrology and Measurement Systems*. Polska Akademia Nauk, 2019.
  13. Omar Palillero-Sandoval, J. Félix Aguilar, and L. R. Berriel-Valdos. *Phase mask coded with the superposition of four Zernike polynomials for extending the depth of field in an imaging system*. Optical Society of America, Applied Optics, 2014.
  14. Tatiana M. Babkina, Vitaly B. Voloshinov. *A new method of acousto-optic image processing and edge enhancement*. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 3 S54, 2001.
  15. Adrianus Korpel. *Acousto-Optics - A review of fundamentals*. Proceedings of the IEEE, Vol. 69. No. 1, 1981.
  16. Partha P. Banerjee, Dongqing Cao, and Ting-Chung Poon. *Basic image-processing operations by use of acousto-optics*. Optical Society of America, Applied Optics, Vol. 36, No. 14, 1997.
  17. Partha P. Banerjee, Dongqing Cao, and Ting-Chung Poon. *Notch spatial filtering with an acousto-optic modulator*. Optical Society of America, Applied Optics. Vol. 37, No. 32, 1998.
  18. V. B. Voloshinov, V. Ya. Molchanov, J. C. Mosquera. *Spectral and polarization analysis of optical images by means of acousto-optics*. Optics & Laser Technology, Elsevier Science, Vol. 28, No. 2, pp. 119-127, 1996.
  19. Adán Omar Arellanes Bernabe. *Acousto-optical interaction and its advanced applications*. Tesis de Maestría. INAOE, 2013.
  20. Flores Llamas Ignacio. *Síntesis de las rejillas de periodo largo en fibra óptica por medio de un algoritmo genético*. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2007.

21. Acuña Herrera Rodrigo. *Redes de Bragg: Fabricación, caracterización y aplicaciones*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, 2004.
22. Vladimir I. Balakshy and Dmitry E. Kostyuk. *Acousto-optic image processing*. Applied Optics, Vol. 48, No.7, 2009.
23. M. Lesaffre, F. Jean, A. Funke, P. Santos, et al. *Acousto-Optic Imaging Techniques for Optical Diagnosis*, 2006.
24. Julio César Mosquera M., Alberto Sepúlveda G., César Augusto Isaza B. *Procesamiento de imágenes ópticas de frutos café en cereza por medio de filtros acusto-ópticos*. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 21: 93-102, 2007.
25. J. A. Marbán Salgado, D. Mayorga Cruz, J. Uruchurtu Chavarín et al. *Quantification of corrosion products formation onto a copper sample by digital holographic microscopy*. Óptica Pura y Aplicada. Sociedad Española de óptica. Opt. Pura Apl. 46 (1) 49-54, 2013.
26. Alexander Machikhin, Ludmila Burmak, Olga Polschikova, et al. *Multispectral phase imaging based on acoustooptic filtration of interfering light beams*. Applied optics OSA, 2018.
27. Huijie Zhao, Ziyue Wang, Guorui Jia, et al. *Field imaging system for hyperspectral data, 3D structural data and panchromatic image data measurement based on acousto-optic tunable filter*. Optical Society of America, 2018.
28. D. Lorente, N. Aleixos, J. Gómez-Sanchis, S. Cubero, O. L. García-Navarrete. *Advances and Applications of Hyperspectral Imaging for Fruit and Vegetable Quality Assessment*. Food Bioprocess Technol. Food and Bioprocess Technology, 5(4), 1121-1142, 2012.
29. Julio Cesar Mosquera, Cesar Augusto Isaza, Gustavo Adolfo Gomez. *Technical Analog-Digital For Segmentation Of Spectral Images Acquired With An Acousto-Optic System*. XV Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial – STSIV, 2012.

30. Masahiro Ishikawa, Chisato Okamoto, Kazuma Shinoda, Hideki Komagata, Chika Iwamoto, et al. *Detection of pancreatic tumor cell nuclei via a hyperspectral analysis of pathological slides based on stain spectra*. Biomedical Optics Express, 2019.
31. Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Nagata, M., Tallada, J. G. *Quality Evaluation of Strawberry. Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation*. Elsevier, 2016.
32. Juan Carlos Valdiviezo Navarro. *Segmentación de Imágenes Hiperespectrales usando Memorias Asociativas Morfológicas*. Tesis de Maestría. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2017.
33. V. S. Anchutkin and A. B. Bel'ski, et al. *Acousto-optical method of spectral-polarization image analysis*. Physics Faculty, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow. Opticheski Zhurnal 76, 29–35. August 2009.
34. Jiangang Xia, Derrek B. Dunn, Ting-Chung Poon, et al. *Image edge enhancement by Bragg diffraction*. Optics Communications 128, 1996.
35. Jihwan Kim, Joonhoi Koo, And Ju Han Lee. *All-fiber acousto-optic modulator based on a cladding-etched optical fiber for active mode-locking*. School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul, South Korea. July 2017.
36. A.V. Vainer, S.N. Antonov, V.V. Proklov. *Fiber-Optic Switch-Multiplexer based on Acousto-Optic Modulators*. Optical Society of America, 2017.
37. J. A. Marbán Salgado, D. Mayorga Cruz, J. Uruchurtu Chavarín et al. *Quantification of corrosion products formation onto a copper sample by digital holographic microscopy*. Óptica Pura y Aplicada. Sociedad Española de óptica. Opt. Pura Apl. 46 (1) 49-54, 2013.
38. Jorge Herrera, Emigdio Mendoza, Claudia García, et al. *Aplicación de la microscopía holográfica digital en transmisión para la caracterización del espesor de recubrimientos delgados*. Scientia et Technica Año XIII, No 36. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

39. Alexander Machikhin, Ludmila Burmak, Olga Polschikova, et al. *Multispectral phase imaging based on acoustooptic filtration of interfering light beams*. Applied optics OSA, 2018.
40. Huijie Zhao, Ziyue Wang, Guorui Jia, et al. *Field imaging system for hyperspectral data, 3D structural data and panchromatic image data measurement based on acousto-optic tunable filter*. Optical Society of America, 2018.
41. Shau Poh Chong, Chee Howe Wong, Kit Fei Wong, et al. *High-speed focal modulation microscopy using acousto-optical modulators*. Optical Society of America, 2010.
42. Malacara Daniel. *Óptica básica*. 3ª ed. Ediciones Científicas Universitarias, México, 2015.
43. Jenkins Francis A., White Harvey E. *Fundamentos de óptica*. 3a ed. Ediciones Aguilar, España, 2004.
44. Varnia.es *Conceptos Básicos sobre Ondas*. Consulta (12 Diciembre 2017) <http://varinia.es/blog/2010/12/07/conceptos-basicos-sobre-ondas/>
45. Douglas Giancoli. *Física 2 Principios con aplicaciones*. 6a ed. Editorial Pearson Educación. México, 2009.
46. Paul E. Tippens. *Física, conceptos y aplicaciones*. 7a ed. Editorial McGraw Hill. México, 2011.
47. Hecht Eugene, *Óptica*. 3ra. ed. Addison Wesley Iberoamericana. Madrid, 2000.
48. Serway Raymond A. Faughn Jerry S. *Física*. 5ta edición. Pearson Educación, México, p.p. 770, 2001.
49. Douglas Giancoli. *Física para Ciencias e Ingeniería con Física moderna Vol. 2*. 4a ed. Editorial Pearson Educación, México, 2009.
50. Ferrera Bello Carlos Andrés. *Implementación de un láser de fibra óptica sintonizable en función de la curvatura de una rejilla de periodo largo*. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. Abril 2012.

51. David Halliday, Robert Resnick, Kenneth S. Krane, Física Vol. 2, p.p. 297-310, 2000.
52. Baltasar Rubio Martínez. *Introducción a la ingeniería de la fibra óptica*. RA-MA Editorial y publicaciones, p.p. 33-56, 1994.
53. Mohammad Azadeh. *Fiber Optics Engineering*. Springer Science & Business Media, 2009.
54. E. Hecht, A. Zajac. *Óptica*. Fondo Educativo Interamericano, S.A, 1977.
55. D. Halliday, R. Resnick, K. Krane, *Física*, vol. 2. Ed. Continental, 1995.
56. R. A. Serway, *Física*, tomo 2, 3ra ed. Mc Graw-Hill, 1992.
57. P. A. Tipler, *Física*, tomo 2, 2da ed. Editorial Reverté, 1995.
58. Flores Llamas Ignacio. *Aplicaciones y diseño de las rejillas en fibra óptica en la Ingeniería en Telecomunicaciones*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Septiembre 2015.
59. Salas Alcántara Karla María. *Interferómetro Mach Zehnder en fibra óptica utilizando rejillas de periodo largo*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Óptica. León, Guanajuato, México, 2010.
60. Acuña Herrera Rodrigo. *Redes de Bragg: Fabricación, caracterización y aplicaciones*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Marzo 2004.
61. Oppenheim Alan V., Willsky Alan S. *Señales y sistemas*. 2da Ed. Prentice Hall Hispanoamérica, 1998.
62. Goodman W. Joseph. *Introduction to Fourier Optics*. Ed. McGraw-Hill, 1996.
63. Gaskill Jack D. *Linear Systems, Fourier Transforms and Optics*. John Waley Series. United States of America, New York, 1978.
64. D.A. Krohn. *Fiber Optic Sensors. I Fundamentals and Applications*. ISA, USA. Cap. 7, 1994.
65. H.A. Macleod. *Thin-Film Optical Filters*. Second Edition. McGraw Hill, New York, 1989.

66. Avalos Hernández Jonathan. *Estudio de difracción no lineal de generación de segundo armónico en rejillas grabadas en pigmentos orgánicos*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Óptica. León, Guanajuato, México, 2017.

RESEARCH ARTICLE

# Experimental Analysis of Tunable Optical Spectral Imaging System Using a Grating in the Pupil Function

F. JAVIER GARCÍA-DÍAZ<sup>1</sup>, OMAR PALILLERO-SANDOVAL<sup>1</sup>, J JESÚS ESCOBEDO-ALATORRE<sup>1</sup>, MIGUEL A. BASURTO-PENSADO<sup>1</sup>, PEDRO A. MÁRQUEZ-AGUILAR<sup>1</sup>, ALVARO ZAMUDIO-LARA<sup>1</sup>, JONNY PAUL ZAVALA-DE PAZ<sup>2</sup>, AND JOSÉ ANTONIO MARBÁN-SALGADO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Research in Engineering and Applied Science (CIECAP), Institute for Research in Pure and Applied Science (ICBA), UAEM, Cuernavaca 62209, Mexico

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Querétaro, Ingeniería en Redes y Telecomunicaciones, Querétaro 76240, México

Corresponding author: Omar Palillero-Sandoval (omar.palillero@uaem.mx)

**ABSTRACT** Hyperspectral imaging (HSI) systems have been demonstrated as a powerful imaging technique due to their high spectral resolution. HSI can obtain the spectrum for each pixel in the image of a scene, a feature that can be exploited to design optical systems with the purpose of analyzing and characterizing objects and identifying processes within the visible electromagnetic spectrum (bandwidth). In this paper, we present an HSI system comprising a diffraction grating placed in the exit pupil of our optical configuration. The spectrum for each pixel associated with the object appears in the first order of diffraction. We used this system to characterize and tune the required spectral band of the image of the captured object obtaining more information than with an optical imaging system. Accordingly, the proposed optical system is suitable to obtain spectral and hyperspectral imaging at low cost compared to an acousto-optic system or other HSI. The scanning system captures hundreds of spectral images associated with the object, obtaining a maximum spectral resolution of 0.26nm or 260 pm for one of our configurations.

**INDEX TERMS** Hyperspectral imaging, spectral images, diffraction grating.

## 1. INTRODUCTION

In 1985, Goetz first developed imaging spectroscopy and then the Hyperspectral Imaging System (HSI) for earth observation and remote sensing at NASA's Jet Propulsion Laboratory [1], [2]. HSI has become a topic of intensive research in the fields of agriculture and food science. The development of an HSI consisted of integrating spectroscopic and imaging techniques allowing the direct identification of different components, as well as the spatial distribution of the analyzed sample. An HSI produces a two-dimensional spatial array of vectors which represents the spectrum at each pixel location, resulting in a three-dimensional dataset containing the two spatial dimensions and one spectral dimension known as the data cube or hypercube [3]. In recent

years, hyperspectral images have provided rich compositional and chemical information of the object across a wide range of the electromagnetic spectrum which cannot be obtained from traditional imaging techniques, such as color or intensity imaging based on the transmission, reflection, or emission of light [4], [5]. In addition, hyperspectral imaging is a valuable technique in several fields due to its capability of collecting spectrally-resolved intensity images over a two-dimensional scene [6].

The hyperspectral technique is used in various fields of study to determine size, shape, composition, morphology, etc. This technology is not only capable of making a direct evaluation of the material under study, but it can also indicate the spatial distribution of the selected parameters. The HSI opens a panorama of information of a certain object based on the energy of an analyzed sample (wavelength); determining the spectrum electromagnetic, an analysis of the spectral

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Qingli Li.

images of the object can be implemented in a number of fields of study. HSI is useful, for example, in the study of tissues where medicine has found support in the detection, diagnosis and development of harmful samples in tissues, since the process of how a tissue is evolving can be determined with hyperspectral images [7]. In the field of food, HSI has become a very useful tool to carry out analyses of both texture and composition of foods through non-destructive tests [8]. Encompassing other fields of study, archaeological digs, conservation of art, the care of vegetation, as well as the control of water resources have found HSI useful [9]–[12]. Furthermore, industrial automotive studies, food and agricultural monitoring, other medical studies [8], [13]–[16], have incorporated process using tools of image processing, as well as the use of equipment dedicated to the study and analysis of spectroscopy [17] since the capture of information in spatial and spectral, based on hyperspectral images.

Additionally, other studies involving hyperspectral images for remote sensing in the field of mineral exploration, precision agriculture, forest research, earth science research, and environmental monitoring, where it offers the advantage of achieving a spectral resolution at the nanoscale, and thereby obtaining a volume of very narrow and contiguous images for further analysis of comparison [18]–[22].

Various research projects have developed studies and techniques for obtaining spectral imaging, numerical analysis, and spectral image processing. [23]–[27]. Techniques to obtain spectral images may be based on different physical principles, such as acousto-optic systems and diffraction gratings. The use of acousto-optic systems has grown notably, especially in biomedical research because they can obtain images in crystalline media, which is why they are widely used with tissues. However, these systems are complex and costly due to using an acoustic arrangement associated with a multichannel acquisition system [28]–[32]. A diffraction grating, or grid period, is a common phase element with thousands of parallel lines, grooves, or etchings evenly spaced on its surface; when a plane wavefront is involved, it is reflected from the grating at various angles determined by the grating period and the incident wavelength. Angle diffractions are determined by the condition of the phase coincidence for reflections from adjacent grooves [33]; these techniques allow a specialized study of various applications in spectral image analysis, such as the diagnosis of biological samples, the classification of food or objects based on colorimetry, object segmentation, the monitoring of vegetation, and analysis of soil [34]–[42].

Herein, we present an HSI system with the capability of acquiring the spectral images of an object over the desired spectral band by finely tuning the wavelength of acquisition. The proposed optical system offers the versatility to obtain spectral and hyperspectral imaging at a low cost compared to acousto-optic systems [43], [44], where equipment like monochromators, wavelength filters, liquid crystal technology [45], [46] and acousto-optic filters or

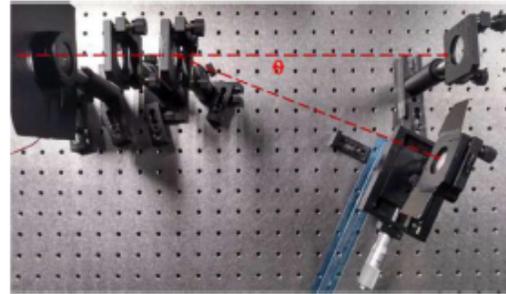


FIGURE 1. Proposed optical imaging system.

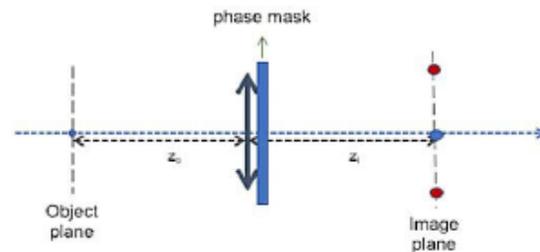


FIGURE 2. Configuration of the optical imaging system.

modulators are used [47]. Our system avoids the use of these costly instruments. Instead, we used a low-cost grating diffraction element that satisfies the same functionality than acousto-optic systems. Also, the number of spectral images can be adjusted. In the future, a mechanical system is planned allowing more images to be captured according to a configuration established in the displacement of the mechanism, and reducing the spectral resolution of 0.26nm of actual system.

## II. OPTICAL IMAGING SYSTEM

Fig. 1 shows the optical imaging system; the principle of operation and the elements that make up the optical imaging system will be described later to understand its correct operation. Fig. 2 presents the experimental setup of the pupil modification in our optical system, where  $z_0$  is the object plane and  $z_1$  is the image plane. The proposed optical imaging system depicts their modification in the pupil function, a configuration that has been a widely used to encode the wavefront on the incident radiation. Phase objects are commonly used to extend the field, together with shadow objects, which are also commonly used for apodization and increased resolution of the resulting images [16], [37], [38]. In this work, we employ the above-mentioned method to separate the spectral images of a test object.

The object placed in the pupil function corresponds to a diffraction grating denoted by the function  $f_p(\rho, \phi)$ , as shown in (1):

$$f_p(\rho, \phi) \mathcal{D} \exp\left(i2\pi \cos\left(\frac{u}{\Lambda}\right)\right) \text{circ}\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right), \quad (1)$$

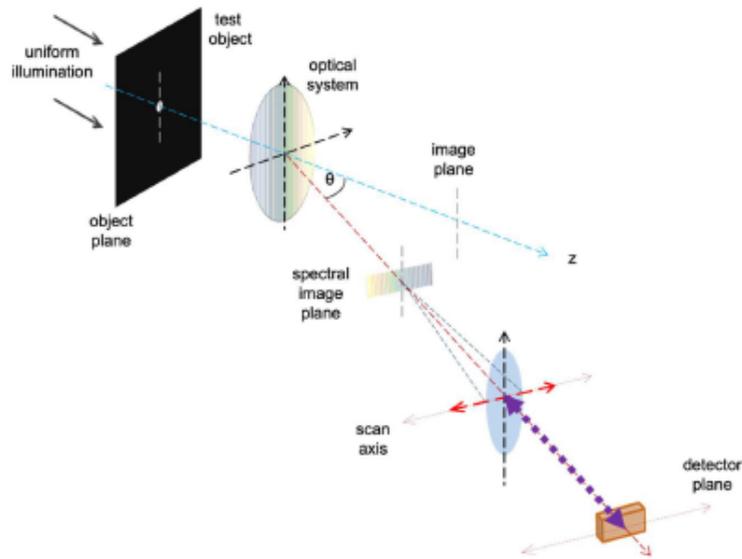


FIGURE 3. Visualization of spectral image plane corresponding to an angle about the image plane.

where  $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $\text{circ}(\rho/\rho_c)$  is the circle function,  $\rho_c$  is the cut-frequency of the system,  $u$  and  $v$  correspond to the frequency along the frequency axis, and  $\Lambda$  to the period of the function. When the object is placed in the optical system and illuminated, three diffraction orders are generated: order 0, +1 and -1 respectively. Refer to the schematic in Fig. 2 to observe an angle deviation  $\theta$ , where the fundamental equation of a diffraction grating is used, as shown in (2),

$$a \sin \theta = m \lambda. \quad (2)$$

where  $a$  is the distance of each slot (1000 lines/mm) of the grid,  $m$  is the order number and  $\lambda$  is the wavelength. To calculate the value of  $\theta$  from (2) we use the expression for the separation of diffraction orders, as presented in (3),

$$\sin \theta \approx \frac{y}{D} = \frac{m\lambda}{a}, \quad (3)$$

where  $y$  is the distance between the diffraction order to be analyzed and order 0, and  $D$  corresponds to the distance between the diffraction grating and the screen. Solving both equations, we obtain  $\theta = 40.5415^\circ$  using  $a = 1 \mu\text{m}$ ,  $m = 1$ ,  $\lambda = 650 \text{ nm}$  and  $D = 5 \text{ cm}$ . The object placed in the exit pupil of the optical setup, generating a coded image of the object in three diffraction orders; the first orders contain the spectral images, and the zero order corresponds to the image of an object, like a traditional optical system.

From the method of modifying the pupil function, the configuration of Fig. 2 is proposed. Our configuration, shown in Fig. 3, can be explained as follows: the test object (a pinhole) is placed in the object plane; the optical system was configured with two 50 mm SPX106 Newport lenses and the diffraction grating placed in the exit pupil; the image plane

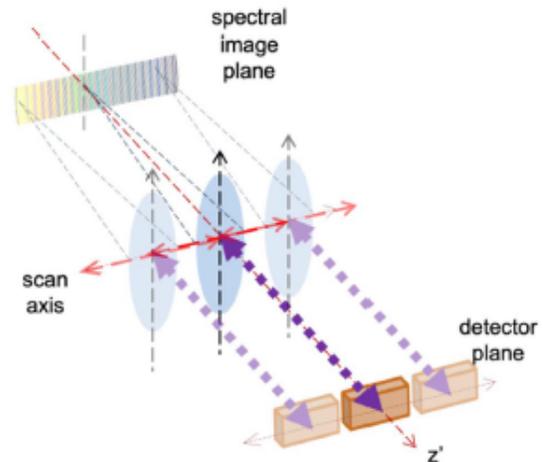
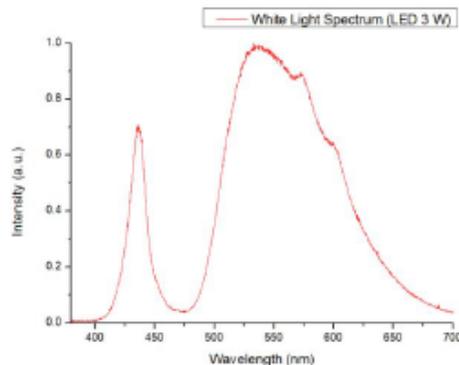


FIGURE 4. The plane image is located a mechanical displacement for the optical detection with a sensor CCD.

(zero-order); one of the first diffraction order corresponds to the spectral image plane (scanning plane) and detection plane (the optical system for detection using a mechanical movement).

Special attention is paid to one of the first orders of diffraction that appears at the angle  $\theta$ , (refer (2) and Fig. 3), a 100 mm SPX107 Newport lens was used to capture the spectral image in the detection plane. In this plane, the scan is carried out using a displacement in the x-axis, as shown in Fig. 4.



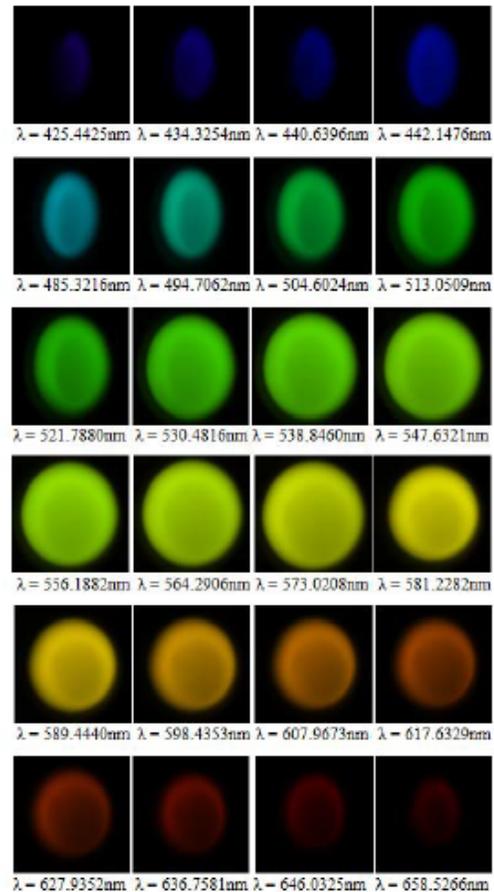
**FIGURE 5.** Optical spectrum of the white LED used as a source in the optical setup.

The scanning is linear in the  $x$ -axis; the finer the displacement, the greater the number of images captured, and therefore, the spectral resolution. It is convenient to mention that the spectral resolution is given by the ratio of the total spectral width between the mechanical movement. The detection of the images was performed using a Rebel T9 Canon Reflex Camera equipped with a  $22.3 \times 14.9$  mm and  $5196 \times 3464$  pixel sensor CCD, as specified by the manufacturer.

### III. RESULTS

In order to characterize our optical system, a pinhole ( $\sim 2$  mm diameter) was used as the test object, placed in the object plane, refer Fig. 4. As the source for illumination, a white light-emitting diode (LED) was used (280 mA, 3 W). Fig. 5 shows the spectrum emitted by the white LED measured using a spectrophotometer (USB4000, Ocean Optics) in the visible wavelength range (425.4 to 656.8 nm).

First, the pinhole (the test object) was scanned over the wavelength range of the illumination source. The optical system was configured to acquire images by tuning the wavelength range (i.e., 425.4 to 656.8 nm) in intervals of 9.7 nm. The resulting sequences of the 24 captured spectral images of the object are shown in Fig. 6. From these images, it can be observed that the circular symmetry in the image of the object is irregular for the images collected in the wavelength ranges of 425 – 521 nm and 589 – 658 nm, respectively. We hypothesize that these irregularities are derived from the instrumental limitations in the lens used in our experimental setup. That is, the coating of the lens (commercially available) could interfere with the wavelength range of detection of our system causing a distortion in the image of the object (i.e., circular asymmetry) in the wavelength ranges mentioned above. However, the images collected within the wavelength range of 530 – 581 nm features the radial symmetry of the object. Nevertheless, it is demonstrated that even in the presence of the artifact introduced by the limitations of the lens, we can collect the spectral images of the object under study, which can be



**FIGURE 6.** The images of the objects. In the spectral image plane is located a mechanical displacement for the optical detection using a CCD sensor.

suppressed the distortion in the images of object by selecting lens with coatings displaying a wider wavelength range of operation.

From these images, the presence of aberration – caused by the spherical wavefront originated in the lens placed between the first-order focal point of the diffraction grating and the spectral image plane - can be seen (Fig. 6). This phenomenon is evident in the sequence of spectral images collected in the wavelength ranges of 425 – 521 nm and 589 – 658 nm, respectively. Aberration phenomenon interferes with the radial symmetry of the image of the object in the order zero. In order to suppress this artifact from appearing in the collected images, the use of a radial displacement platform is required as compared to the linear stage used in our optical system.

In Fig. 6, it can be seen that the spectral images from  $\lambda = 425.44$  nm to  $\lambda = 504.6$  nm it do not present a radial symmetry like the test object; likewise, this happens in the frequency  $\lambda = 627.93$  nm onwards. With our optical

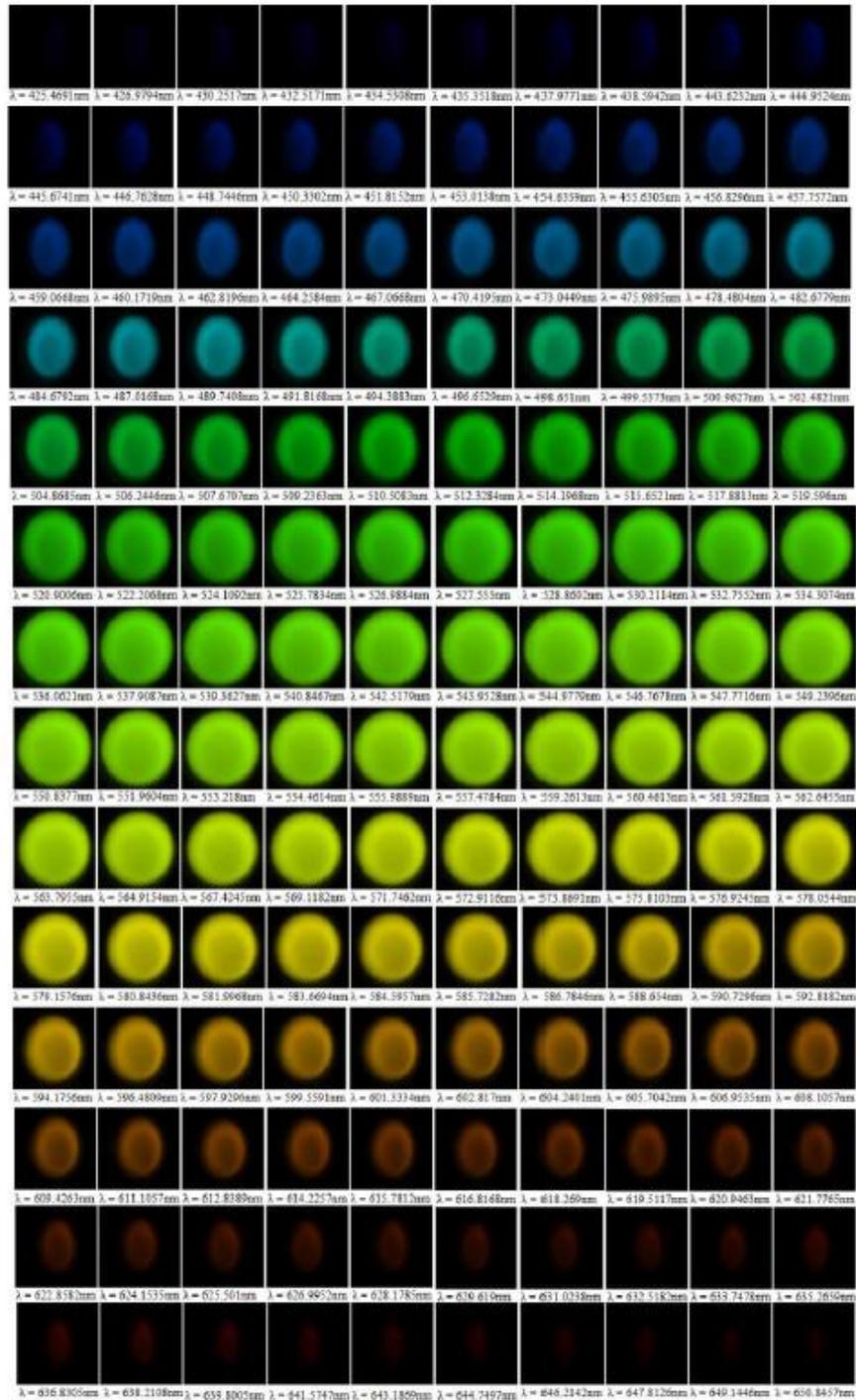
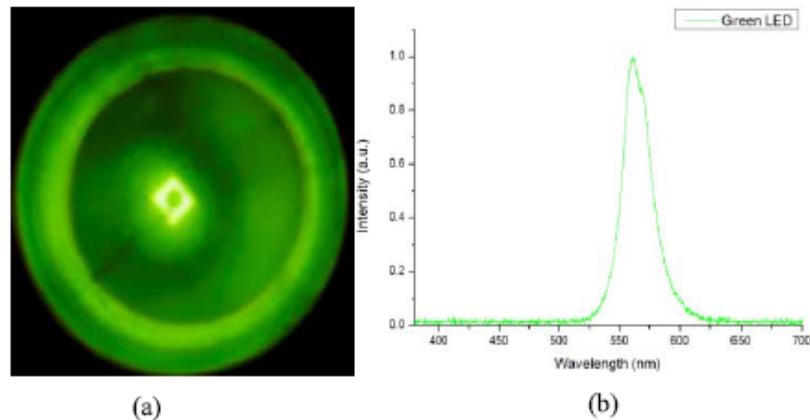


FIGURE 7. A sequence of the spectral images captured over the wavelength of the illumination source at scanning intervals of 1.6 nm.



**FIGURE 8.** (a) Image of the Green LED used to test object; the filament is visualized, and (b) its maximum spectrum corresponding to 560.9782 nm.

system well characterized, we proceeded to perform a second experiment. We finely tuned the wavelength intervals for the acquisition of the spectral images using the same test object (circular aperture). A mechanical displacement of 1 mm in the linear stage was performed, which led to a spectral resolution of 1.6 nm (as compared to the 9.7 nm obtained in the first experiment). Fig. 7 presents the sequence of the images obtained using this spectral resolution. With the increased resolution, the number of images increased from 24 in the first experiment to 140 in the second. The latter denotes the amount of information (and details) that could be obtained from an object if an HSI technique is used. Nonetheless, the phenomenon of aberration (as explained above) is present in the sequence of images in the wavelength range of 425.4 – 467 nm and from 615.7 nm onwards.

In Fig. 7, we also show the results of the second experiment, the pinhole (the test object) was scanned over the wavelength range of the illumination source again, but the optical system was configured to acquire images by tuning the wavelength range of 425.4 to 656.8 nm in intervals of 1.6 nm. From these images, the same pattern as the first experiment can be observed (Fig. 6); that is, the irregularities occur in 425 to 521 nm and 589 to 658 nm, symmetrical to the test object. A sequence of 140 spectral images of the test object are shown in Fig. 7. To determine the resolution, we measured each spectral image with the spectrophotometer to obtain a wavelength value. In this sense, a relation was made between a specific wavelength range and the number of images, in order to know the spectral resolution and the spectral of each image.

Fig. 7 shows a sequence of spectral images at scanning intervals of 1.6 nm, this sequence corresponds to hyperspectral imaging due to the number of captured images. Finer scanning of the motion in the mechanism, shown in Fig. 3, allowed us to obtain several spectral images classified as

hyperspectral images with a wide spectral imaging resolution. In this sense, the optical system proposed was validated using two test objects (two conventional LEDs), one green and one red.

Fig. 8(a) shows the green LED, where the filament is visualized and encapsulated. The spectral width of the green LED corresponds to values from 551 nm to 577 nm, as shown in Fig. 8(b), and as we have reviewed in the previous paragraphs, this experiment corresponds to the spectral range of images where the images are observed with high resolution.

Fig. 9 shows a sequence of hyperspectral images with a spectral resolution of 0.26 nm; here, that value of resolution was obtained in dependence on finer movement (Fig. 4). The sequence of Fig. 9 shows information about the green LED; there is frequency information that can be appreciated by simple visual inspection and important information about the filament, and its shape of the LED can be obtained as the scan is carried out. The hyperspectral imaging system proposal is suitable to obtain additional information about the test object.

Similarly, the experiment is performed using the red LED, visualized in Fig. 10. The spectral width of the red LED corresponds to values from 613 nm to 653 nm, as shown in Fig. 10(b).

Fig. 11 shows a sequence of 100 spectral images obtaining a spectral resolution of 0.41 nm, it is important to mention that the spectral resolution can be increased. However, in the case of the red LED, the spectrum to which it belongs (613 nm to 654 nm) corresponds to the spectral width that the system does not capture, due to the limitations of the lenses and the filter that our detector has integrated (CCD). Nevertheless, the system can capture spectral images. Similarly, there is frequency information that can be appreciated by simple visual inspection and important information about the filament, with attenuation but with image processing, we can obtain specific wavelength information about the image of

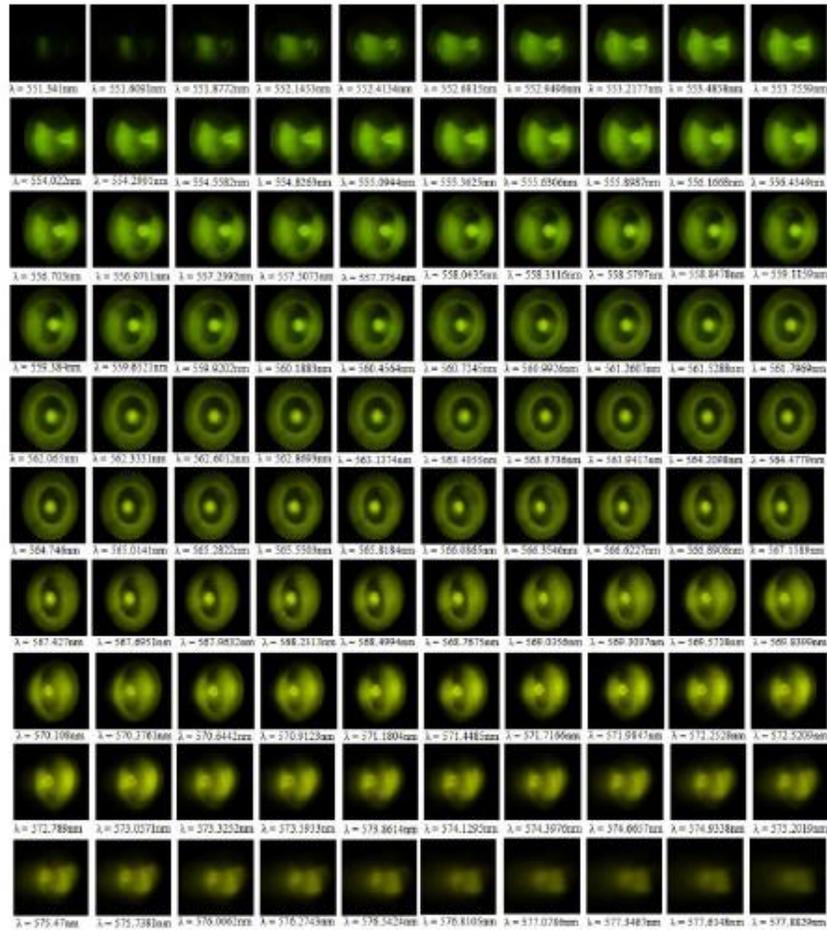


FIGURE 9. Spectral images of the green-LED test object, where the filament is visualized corresponding to the range 551 ~ 577 nm.

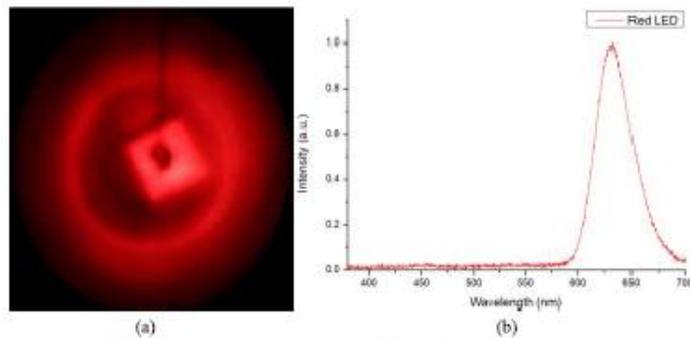
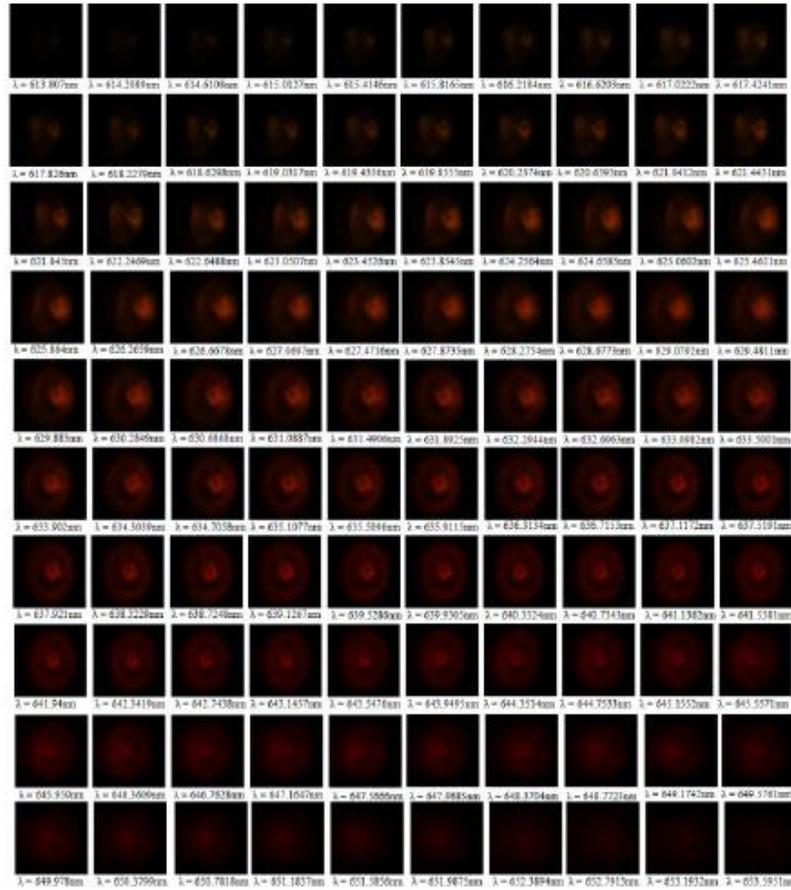


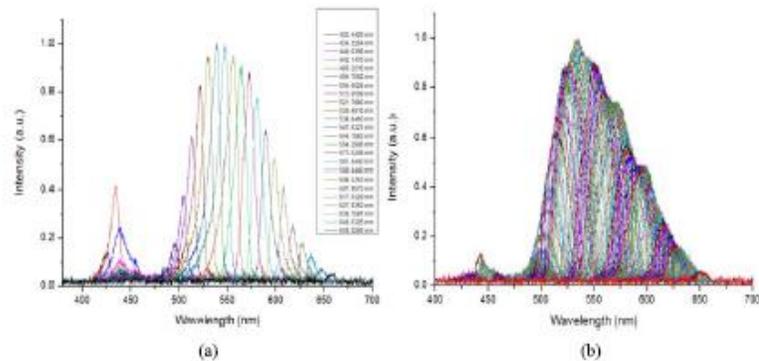
FIGURE 10. (a) Image of the Red LED used to test the object and the visualization of the filament and (b) its maximum spectrum corresponding to 560.9782 nm.

the object. In this case of this experiment, we confirm our hypothesis that these irregularities are derived from the

instrumental limitations in the lens and the CCD used in our experimental setup.



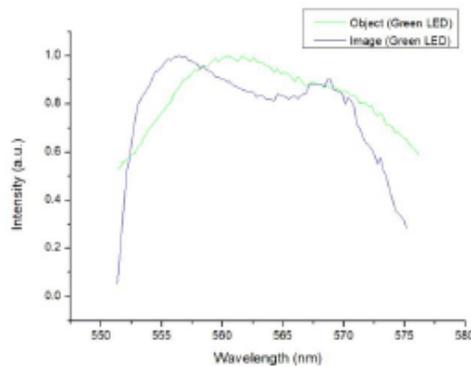
**FIGURE 11.** Spectral images of the red-LED test object, where the filament is visualized corresponding to the range 613 ~ 653 nm.



**FIGURE 12.** The optical spectrum of the white LED used as a source in the optical setup (a) obtaining 24 spectral images (b) obtaining 140 spectral images.

Fig. 12 reveals the spectrum of the spectral image; the capture of each spectral image, the white LED was measured by spectrophotometer (USB4000, Ocean Optics).

Fig. 12(a) and Fig. 12(b) indicate the capture of each spectral image measured by the white LED obtained using the spectrometer.



**FIGURE 13.** Optical spectrum of the green LED used as a source in the optical setup in a range corresponding to values from 551 to 577 nm, intensity of green LED in the object plane and intensity of spectral image of green LED in the image plane.

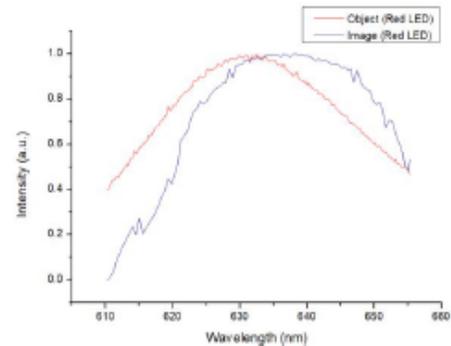
Fig. 12(a) corresponds to the spectra of the images of Fig. 6 and shows 24 samples. Fig. 12(b) corresponds to the spectra of the image of Fig. 7 and shows 140 samples. Every graphic represents the measured specific wavelength in each spectral image obtained with the setup of Fig. 3. The waveforms of Fig. 12(a) and Fig. 12(b) are similar to the spectrum of the source of white LED light shown in Fig. 5. We have demonstrated with these graphics of Fig. 12 that our experiment is suitable to tune the desired frequency and to get it in an image of the set of hyperspectral images.

Herein is compared the object tests (LEDs), in a range corresponding to values from 551 nm to 577 nm in green LED and to values from 613 nm to 653 nm in the case of red LED, with the images of the objects obtained in Fig. 9 and Fig. 11 respectively, to visualize, compare and demonstrate the intensity object-image spectrum corresponding to the spectral images.

According to the spectral images obtained in Fig. 9 and Fig. 11, the spectra of each LED (green and red) were compared, the range of the spectra of Fig. 8(b) and Fig. 10(b), correspond to spectral images in this range.

In the first case, we analyzed each spectrum of the green LED; in Fig. 13 the behavior of intensity between objects and images is visualized. It can be seen that the maximum intensity in the green LED corresponds to around 557 nm, and the intensity in the spectral images corresponds to 562 nm. A drop in intensity can be seen between these two graphics; however, the information obtained on the spectral images is similar to the spectrum of the green LED.

Visualizing the red LED spectrum, Fig. 14 corresponds to a range from 613 – 655 nm, with maximum intensity in the wavelength of 631 nm and the case of a spectral image in 636 nm approximately. In analysis, the intensity drop can be seen in both cases but without high-intensity peaks that affect the visualizing and analyzing of the spectrum, as in the previous case. It is possible to say that the image spectrum is shifted 5 nm and the intensity drop is more pronounced than the red LED spectrum. Nevertheless, the information



**FIGURE 14.** Optical spectrum of the red LED used as a source in the optical setup in a range corresponding to values from 613 to 655 nm, intensity of red LED in the object plane and intensity of spectral image of red LED in the image plane.

obtained on the spectral images is similar to the spectrum of the red LED.

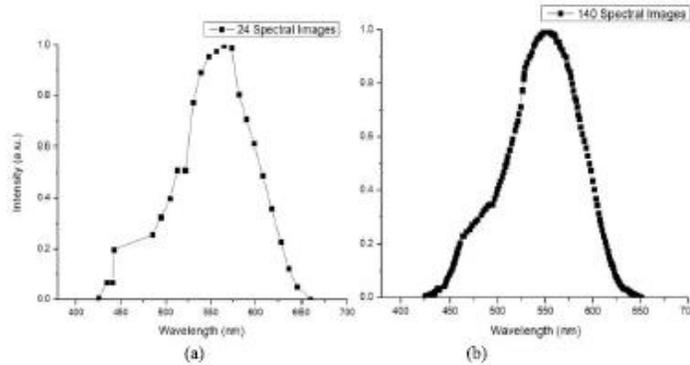
Finally, the white light source is analyzed in relation to the spectral content of the measurements made at the beginning of the tests, where 24 and 140 spectral images were obtained, corresponding to Fig. 6 and Fig. 7 respectively. Then, the spectrum of white light from Fig. 5 can be examined with the first spectral images, comparing each spectrum.

The graphics in Fig. 15(a) and Fig. 15(b) show the spectral profile considering an average intensity between each spectral image and comparing it with the spectrum of the light source, shown in Fig. 5. The spectrum of the light source is visualized like those graphs in Fig. 15(a) and Fig. 15(b), although the intensity drop is not visible in them; this is presented in the spectra of the white light source between the wavelength of 425 – 521 nm, seen in Fig. 5. It must be considered that discrete samples are being taken, causing the images not be continuous and not to capture all the content of the spectrum. Nevertheless, the resemblance among the spectra of Fig. 5 and Fig. 15(a) and Fig. 15(b) is clearly observable.

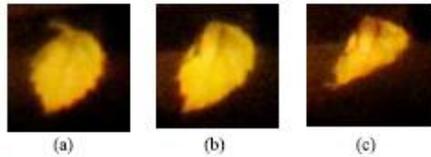
In order to increase the universality of the proposed system, realia were experimented with, in this case, the behaviour of a green leaf. Considered an opaque object, several spectral images were taken of the green leaf over a period of 3 days, exposing the capture each day within the proposed imaging system.

Fig. 16(a) shows the first day in which the leaf was exposed to the optical system; Fig. 17 reveals a series of 24 spectral images of that leaf.

The leaf can be seen in the wavelength corresponding to the blue colour, in this case 524.4425 nm to 442.1476 nm; it is not so visible in Fig. 17, nor in the last images that correspond to the wavelength of the colour red, 636.7581 nm to 658.5266 nm. This same behaviour occurs in the following Figures where Fig. 16(b) and its spectral images Fig. 18 are presented on the second day, and Fig. 16(c) and the spectral images of the leaf on the third day, Fig. 19.



**FIGURE 15.** Optical spectrum of the set of spectral images compared with the white light source. (a) Intensity of spectral images with displacement of 9.7 nm obtaining 24 images, and (b) intensity of spectral images with displacement of 1.6 nm obtaining 140 images.

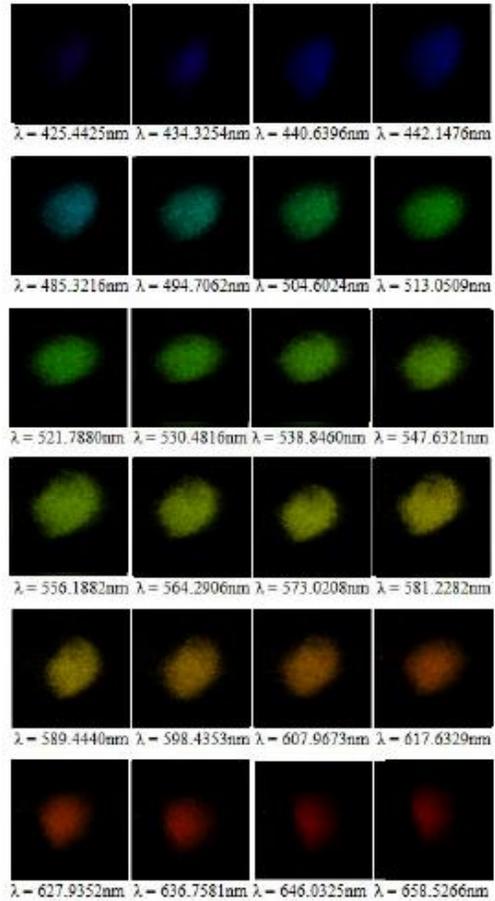


**FIGURE 16.** Test with opaque object, green leaf. (a) First day of the experiment with the leaf. (b) Second day of the experiment with the leaf. (c) Third day of the experiment with the leaf.

The images obtained allow us to know the deterioration or the ageing process that this kind of natural object undergoes after several days have elapsed, so that, being visualized through the spectral images, the behaviour in which the leaf changes shape is observed; that is, its size changes, it becomes smaller, curling up due to the lack of water and to light exposure. Thus, it is possible to capture a rendition of the execution speed of the proposed system since the light source is emitting heat towards the object and the behaviour of the leaf is affected in the change of shape.

**IV. DISCUSSION**

The characterization of the optical system was performed by using a test object (circular aperture) as shown in Fig 4. The spectral resolution is configured depending on the number of samples to be obtained, that is, the number of spectral images to be captured. In Fig 7 and Fig 8, a problem is observed in the spectral images captured, as we mentioned previously, the circular symmetry in the image of the object is irregular for the images captured in the wavelength ranges from 425 – 521 nm and 589 – 658 nm, respectively. We hypothesize that these irregularities are derived from the instrumental limitations in the lens used in our experimental setup. Fig. 12 reveals the other test objects, the green and red LEDs. For the red LED, the filament is perfectly seen in the first spectral images, from  $\lambda = 613$  nm to  $\lambda = 621$  nm. It is



**FIGURE 17.** Set of spectral images corresponding to the first day of the leaf exposed to the optical system from 425.4424 nm to 658.5265 nm.

clear that with this configuration more spectral information of the object is obtained. For the green LED, the filament

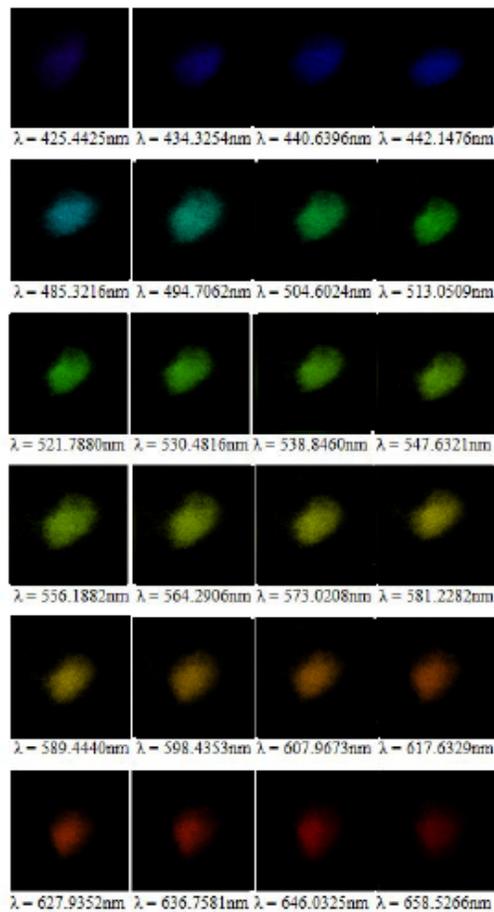


FIGURE 18. Set of the spectral images corresponding to the second day of the leaf exposed to the optical system from 425.4425 nm to 658.5266 nm.

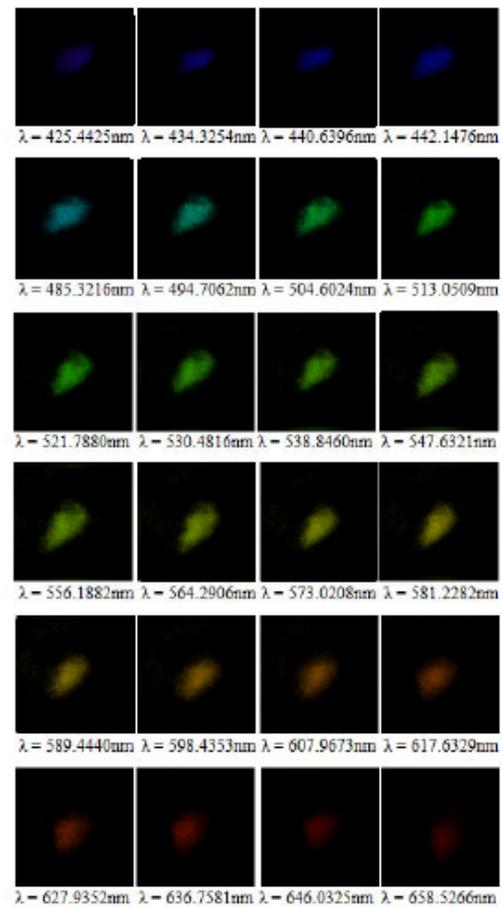


FIGURE 19. Set of spectral images corresponding to the third day of the leaf exposed to the optical system from 425.4425 nm to 658.5266 nm.

is observed from  $\lambda = 572.789$  nm to  $\lambda = 576.54$  nm. It should be remembered that the results were validated by measuring with a spectrometer. Moreover, we have shown that the proposed system can obtain spectral or hyperspectral images.

The use of the REBEL T9 camera is known for featuring the Bayer mosaic filter, and it is made up of three RGB bandpass filters that break the image into three separate bands. In addition to adding unnecessary spectral filtering, this also requires post-processing of the RGB image to recover the intensity of the image. Furthermore, the sensor is equipped with an IR filter that removes the IR spectral components and thus considerably reduces the spectral range of the camera. Therefore, for improvements in capturing image, a monochrome camera will be used. However, these detected problems do not detract from the research work, and it has been shown that the system is suitable for obtaining spectral or hyperspectral images depending on the necessary optical configuration.

## V. CONCLUSION

The imaging system with modified pupil function by diffraction grating is suitable for obtaining spectral or hyperspectral images. It was shown that the system can analyze the object at a specific wavelength, which means, that the system can tune a spectral image from a set of hyperspectral images. In addition, the spectral resolution can be defined in the optical array configuration. It was shown that with the configuration in the scan, the system was able to detect 24 spectral images with a resolution of 9.7 nm, and 140 images with a resolution of 1.6 nm. In the case of LEDs, 100 spectral images were obtained for each case, with a resolution of 0.26 nm for the green LED and 0.41 nm for the red one. With these results, we can conclude that a spectral image can be tuned from the set of hyperspectral images at different resolutions. It is important to mention that even with the limitations of the optical system, the system can resolve spectral images and that basic image processing would be sufficient to obtain relevant information on the objects under study.

It can be added that the presented imaging system has been characterized to know its resolution capacity, as well as tests with transparent and opaque objects, with which its usefulness can be corroborated. In addition, an improvement or future work to the presented system is to include a mechanical displacement system that allows the capture of the desired number of images in established periods of time.

#### ACKNOWLEDGMENT

The author F. Javier García-Díaz thanks the “Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT” for the support with a Ph.D. scholarship.

#### DISCLOSURES

The authors declare no conflicts of interest.

#### REFERENCES

- [1] A. F. H. Goetz, G. Vane, J. E. Solomon, and B. N. Rock, “Imaging spectrometry for Earth remote sensing,” *Science*, vol. 228, no. 4704, pp. 1147–1153, 1985.
- [2] A. F. H. Goetz, “Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, pp. S5–S16, Sep. 2009.
- [3] K. Chao, P. M. Mehl, and Y. R. Chen, “Use of hyper- and multi-spectral imaging for detection of chicken skin tumors,” *Appl. Eng. Agricult.*, vol. 18, no. 1, pp. 113–119, 2002.
- [4] M. Ahmad, S. Shabbir, R. A. Raza, M. Mazzara, S. Distefano, and A. M. Khan, “Artifacts of different dimension reduction methods on hybrid CNN feature hierarchy for hyperspectral image classification,” *Optik*, vol. 246, Nov. 2021, Art. no. 167757.
- [5] M. Ahmad, “Ground truth labeling and samples selection for hyperspectral image classification,” *Optik*, vol. 230, Mar. 2021, Art. no. 166267.
- [6] T. Mu, F. Han, H. Li, A. Tuniyazi, Q. Li, H. Gong, W. Wang, and R. Liang, “Snapshot hyperspectral imaging polarimetry with full spectropolarimetric resolution,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 148, Jan. 2022, Art. no. 106767.
- [7] G. Lu and B. Fei, “Medical hyperspectral imaging: A review,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 19, no. 1, Jan. 2014, Art. no. 010901.
- [8] A. Gowen, C. P. O’Donnell, P. J. Cullen, G. Downey, and J. M. Frias, “Hyperspectral imaging—An emerging analytical tool for food quality and safety control,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 18, no. 12, pp. 590–598, Dec. 2007.
- [9] C. Fischer and I. Kakoulli, “Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: Current research and potential applications,” *Stud. Conservation*, vol. 51, pp. 3–16, Dec. 2006.
- [10] H. Liang, “Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation,” *Appl. Phys. A, Solids Surf.*, vol. 106, no. 2, pp. 309–323, 2012.
- [11] M. Govender, K. Chetty, and H. Bulcock, “A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies,” *Water SA*, vol. 33, no. 2, pp. 145–151, 2007.
- [12] E. Adam, O. Mutanga, and D. Rugege, “Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: A review,” *Wetlands Ecol. Manage.*, vol. 18, no. 3, pp. 281–296, Jun. 2010.
- [13] C.-I. Chang, *Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification*, 3rd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2003.
- [14] P. K. Varshney and M. K. Arora, *Advanced Image Processing Techniques for Remotely Sensed Hyperspectral Data*, 1st ed. Berlin, Germany: Springer, 2004.
- [15] C.-I. Chang, *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis*, 1st ed. Annapolis, MD, USA: Wiley, 2013.
- [16] R. Abdlaty, L. Doerwald-Munoz, A. Madooei, S. Sahli, S.-C.-A. Yeh, J. Zerubia, R. K. W. Wong, J. E. Hayward, T. J. Farrell, and Q. Fang, “Hyperspectral imaging and classification for grading skin erythema,” *Frontiers Phys.*, vol. 6, pp. 1–10, Aug. 2018.
- [17] J. P. Kerekes and J. E. Baum, “Spectral imaging system analytical model for subpixel object detection,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 5, pp. 1088–1101, May 2002.
- [18] X. Shang, M. Song, Y. Wang, C. Yu, H. Yu, F. Li, and C.-I. Chang, “Target-constrained interference-minimized band selection for hyperspectral target detection,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 59, no. 7, pp. 6044–6064, Jul. 2021.
- [19] P. Wang, L. Wang, H. Leung, and G. Zhang, “Super-resolution mapping based on spatial-spectral correlation for spectral imagery,” *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 59, no. 3, pp. 2256–2268, Mar. 2021.
- [20] M. Wang, X. Zheng, and C. Feng, “Color constancy enhancement for multi-spectral remote sensing images,” in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS)*, Jul. 2013, pp. 864–867.
- [21] X. Sun, L. Zhang, H. Yang, T. Wu, Y. Cen, and Y. Guo, “Enhancement of spectral resolution for remotely sensed multispectral image,” *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 8, no. 5, pp. 2198–2211, May 2015.
- [22] Z. Wang, G.-S. Xia, C. Xiong, and L. Zhang, “Spectral active clustering of remote sensing images,” in *Proc. IEEE Geosci. Remote Sens. Symp.*, Jul. 2014, pp. 1737–1740.
- [23] H. D. Cheng, X. H. Jiang, Y. Sun, and J. Wang, “Color image segmentation: Advances and prospects,” *Pattern Recognit.*, vol. 34, no. 12, pp. 2259–2281, Dec. 2001.
- [24] P. A. M. Aguilar, O. Palillero-Sandoval, and L. R. Berriel-Valdos, “Engineering of apodizer filters in the optical imaging using a set of phase plates,” *Proc. SPIE*, vol. 55, no. 5, pp. 1–8, Oct. 2016.
- [25] M. J. Ordóñez-Padilla, A. Olivares-Pérez, and O. Palillero-Sandoval, “Holographic recording mechanism in albumin films with iron ions,” *Proc. SPIE*, vol. 10127, pp. 191–195, Apr. 2017.
- [26] C. Isaza, J. M. Mosquera, G. A. Gómez-Méndez, J. P. Zavala-De Paz, and E. Karina-Anaya, “Development of an acousto-optic system for hyperspectral image segmentation,” *Metrolog. Meas. Syst.*, vol. 26, pp. 517–530, Sep. 2019.
- [27] O. Palillero-Sandoval, J. F. Aguilar, and L. R. Berriel-Valdos, “Phase mask coded with the superposition of four Zernike polynomials for extending the depth of field in an imaging system,” *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 18, pp. 4033–4038, Jun. 2014.
- [28] T. M. Babkina and V. B. Voloshinov, “A new method of acousto-optic image processing and edge enhancement,” *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, vol. 3, no. 4, pp. S54–S61, Jul. 2001.
- [29] A. Korpel, “Acousto-optics—A review of fundamentals,” *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 1, pp. 48–53, Jan. 1981.
- [30] P. P. Banerjee, D. Cao, and T. C. Poon, “Basic image-processing operations by use of acousto-optics,” *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 14, pp. 3086–3089, May 1997.
- [31] P. P. Banerjee, D. Cao, and T. C. Poon, “Notch spatial filtering with an acousto-optic modulator,” *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 32, pp. 7532–7537, Nov. 1998.
- [32] V. B. Voloshinov, V. Y. Molchanov, and J. C. Mosquera, “Spectral and polarization analysis of optical images by means of acousto-optics,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 28, no. 2, pp. 119–127, Mar. 1996.
- [33] F. L. Ignacio, “Síntesis de las rejillas de período largo en fibra óptica por medio de un algoritmo genético,” Ph.D. dissertation, Fac. de Ing., Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007.
- [34] V. I. Balakshy and D. E. Kostyuk, “Acousto-optic image processing,” *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 7, pp. C24–C32, Mar. 2009.
- [35] M. Lesaffre, F. Jean, A. Funke, P. Santos, M. Atlan, B. C. Forget, E. Bossy, F. Ramaz, A. C. Boccara, M. Gross, P. Delaye, and G. Roosen, “Acousto-optic imaging techniques for optical diagnosis,” *IFAC Proc. Volumes*, vol. 39, no. 18, pp. 11–15, 2006.
- [36] C. M. J. Mosquera, S. G. Alberto, and A. B. C. Isaza, “Procesamiento de imágenes ópticas de frutos café en cereza por medio de filtros acousto-ópticos,” *Ingeniería y Desarrollo*, no. 21, pp. 93–102, Jun. 2007.
- [37] A. Machikhin, L. Burmak, O. Polschikova, A. Ramazanov, V. Pozhar, and S. Boritko, “Multispectral phase imaging based on acousto-optic filtration of interfering light beams,” *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 10, pp. C64–C69, Apr. 2018.
- [38] H. Zhao, Z. Wang, G. Jia, X. Li, and Y. Zhang, “Field imaging system for hyperspectral data, 3D structural data and panchromatic image data measurement based on acousto-optic tunable filter,” *Opt. Exp.*, vol. 26, no. 13, pp. 17717–17730, Jun. 2018.
- [39] D. Lorente, N. Aleixos, J. Gómez-Sanchis, S. Cubero, O. L. García-Navarrete, and J. Blasco, “Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 5, no. 4, pp. 1121–1142, May 2012.

- [40] J. C. Mosquera, C. A. Isaza, and G. A. Gómez, "Technical analog-digital for segmentation of spectral images acquired with an acousto-optic system," in *Proc. 17th Symp. Image, Signal Process., Artif. Vis. (STSIVA)*, Sep. 2012, pp. 307–311.
- [41] M. Ishikawa, C. Okamoto, K. Shinoda, H. Komagata, C. Iwamoto, K. Ohuchida, M. Hashizume, A. Shimizu, and N. Kobayashi, "Detection of pancreatic tumor cell nuclei via a hyperspectral analysis of pathological slides based on stain spectra," *Biomed. Opt. Exp.*, vol. 10, no. 9, pp. 4568–4588, Aug. 2019.
- [42] D. W. Sun, "Quality evaluation of strawberry," in *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation*, 2nd ed. Ireland, Europe: Academic, 2016, ch. 13, pp. 327–350.
- [43] P. Zhou, H. Zhao, Y. Zhang, and C. Li, "Accurate optical design of an acousto-optic tunable filter imaging spectrometer," in *Proc. IEEE Int. Conf. Imag. Syst. Techn. Proc.*, Jul. 2012, pp. 1558–2809.
- [44] X. Zhang, C. Zhang, Y. Wang, H. Wang, Z. Sheng, Z. Tan, W. Qiu, X. Huang, P. Wang, W. Liu, H. Tong, Y. Liu, and X. Wang, "High-resolution hyperspectral microscopic imaging with single acousto-optic tunable filter based on double filtering," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 2169–3536, 2020.
- [45] L. Bei, I. G. Dennis, M. H. Miller, W. T. Spaine, and W. J. Carnahan, "Acousto-optic tunable filters: Fundamentals and applications as applied to chemical analysis techniques," *Prog. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 67–87, Dec. 2004.
- [46] K. V. Zaichenko and B. S. Gurevich, "Information productivity of the systems intended for biological objects images multispectral processing using acousto-optic tunable filters," in *Proc. AIP Conf.*, vol. 2140, Aug. 2019, Art. no. 020081, doi: 10.1063/1.5122006.
- [47] U. Gundogan and S. F. Oktem, "Computational spectral imaging with diffractive lenses and spectral filter arrays," in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP)*, Sep. 2021, pp. 2938–2942 and 978, doi: 10.1109/ICIP42928.2021.9506357.



**F. JAVIER GARCÍA-DÍAZ** received the bachelor's degree in electronics engineering and telecommunications from the Polytechnic University of Puebla, in 2015, and the Master of Engineering degree from the Center for Research in Engineering and Applied Sciences (CIICAp), University Autonomous of the State of Morelos (UAEM), worked with sensors optical based on fiber optics, in 2018, where he is currently pursuing the Ph.D. degree in engineering. His Ph.D. research is in optical imaging systems.



**OMAR PALILLERO-SANDOVAL** received the B.S. degree from the Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Mexico, the M.S. degree in engineering electronics from the University of Guanajuato, Mexico, and the Ph.D. degree in optics science from the INAOE. He is currently a Professor at the Center for Research in Engineering and Applied Science (CIICAp), Mexico. He was trained in optical design using phase-space optics. His current

research interests include applied optical imaging systems in spectral imaging, microscopy, and optoelectronic systems.



**J JESÚS ESCOBEDO-ALATORRE** received the Diploma degree in electronics engineering from the University of Guadalajara, Mexico, in 1994, and the M.Sc. and Ph.D. degrees from the National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics (INAOE), Mexico, in 1997 and 2005, respectively. Since 1998, he has been working at the Research Center of Engineering and Applied Sciences (CIICAp), Autonomous University of Morelos (UAEM), Mexico. His research interests include

propagation in waveguides, microcontrollers, digital signal processing, and digital circuits design.



**MIGUEL A. BASURTO-PENSADO** received the Ph.D. degree from the Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), Tonantzintla, Puebla, in 2000. He is currently with the Center for Research in Engineering and Applied Sciences (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). His work is mainly based on the development of optical fibers, such as sensors. He has participated in some book chapters, more than 30 publications, and a patent. He belongs to the National System of Researchers (SNI) of Mexico.



**PEDRO A. MÁRQUEZ-AGUILAR** received the B.S. and M.S. degrees from Moscow State University, and the Ph.D. degree with a specialty in materials optics from the National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics, Mexico, in 1996. He is currently a Research Professor at the Center for Research in Engineering and Applied Science, Autonomous University of the State of Morelos, Mexico. His main research interests include non-linear optics and laser metrology, recycling of ceramic materials, and applied optics.



**ALVARO ZAMUDIO-LARA** received the Industrial in Electronics Engineer degree from the Technological Institute of Veracruz, in 1995, and the Master of Science and Ph.D. degrees from the National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics, in 1997 and 2005, respectively. He has been the Director of Technological Developments and Academic Liaison and the Co-ordinator of Administration and Planning with the Autonomous University of the State of Morelos. Since 1998, he has been a full-time Research Professor at the Center for Research in Engineering and Applied Sciences (CIICAp), UAEM. His research interests include digital signal and image processing, automation and control, and energy sustainability systems.



**JONNY PAUL ZAVALA-DE PAZ** received the B.E. degree in electronic engineering from the Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, in 2006, the M.S. degree from the Faculty of Engineering, Guanajuato University, in 2009, and the Ph.D. degree in advance technology from the Center for Research in Applied Science and Advanced Technology, IPN, in 2013. He is currently a Research Professor with the Polytechnic University of Querétaro. He is a member of the

National System of Researchers Level I CONACYT. He is a reviewer of scientific papers in journals and conferences. His research interests include applications of computational techniques for 3D reconstruction, digital signal processing, and 3D vision systems, embedded systems applied.



**JOSÉ ANTONIO MARBÁN-SALGADO** received the degree in electromechanical engineering from the Technological Institute of Zacatepec, in 2004, and the Master of Engineering and Ph.D. degrees from the Center for Research in Engineering and Applied Sciences, University Autonomous of the State of Morelos, in 2007 and 2013, respectively. From 2013 to 2014, he was an Associate Researcher at the Autonomous University of the State of Morelos. From 2014 to 2018, he was the Head of

the Department of Technical Projects, Autonomous University of the State of Morelos. Since 2015, he has been a full-time Research Professor at the Center for Research in Engineering and Applied Sciences (CIICAp), UAEM. His research interests include digital signal and image processing, as well as optical techniques for surface characterization.

\*\*\*

