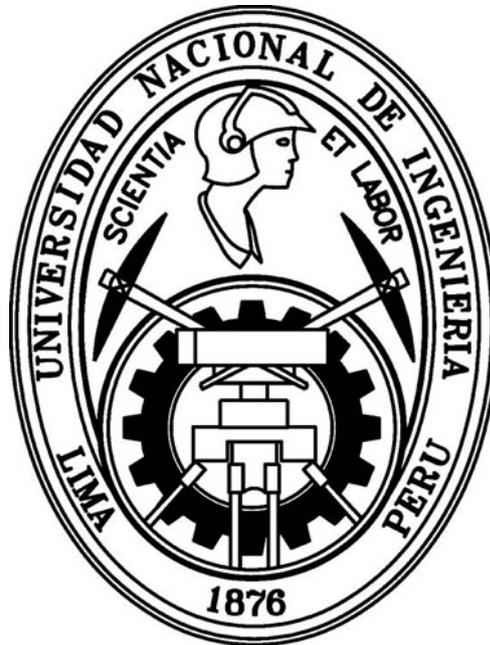


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**



**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**LICENCIADO DE FÍSICA**

**TITULADA:**

**“OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS EN  
INSTRUMENTOS ESPECTROSCÓPICOS E IMPLEMENTACIÓN  
DE UN ESPECTRÓMETRO, APLICADOS A LA  
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FOTOSENSIBLES”**

**PRESENTADA POR:**

**EDER RUBÉN SÁNCHEZ ALCÁNTARA**

**ASESORA:**

**Dra. CARMEN EYZAGUIRRE GORVENIA**

**LIMA–PERÚ**

**2013**

***DEDICADO:***

*A mis queridos padres Roosevelt y Juana Rosa*

*A mis hermanos Frank y Caty*

*A mis abuelos Mario, Catalina, Jorge y Marcelina*

*A mi sobrina Sofía*

*A mis amigos y amigas*

## AGRADECIMIENTOS

La culminación de la redacción de esta tesis es para mí una gran satisfacción profesional y personal, pues el tiempo transcurrido en la elaboración de este trabajo, está lleno de éxitos, fracasos, anécdotas, esfuerzo, dedicación, comprensión, esperanza, consejos, familia y amigos. Por lo que es para mí un deber y placer expresar mi profundo agradecimiento a todas esas personas e instituciones que me han acompañado y apoyado en el transcurso de este trabajo.

En primer lugar deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Dra. Carmen Eyzaguirre por haber sido mi asesora de tesis, por su guía, paciencia y motivación en el desarrollo de mi trabajo, y por sus constantes sugerencias en la implementación de equipos espectroscópicos y elaboración de materiales holográficos que se requieren en el Laboratorio de Óptica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Mi agradecimiento al M.C. Guillermo Baldwin por su asesoramiento de tesis durante mi estancia en el Laboratorio de Óptica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Agradezco sus constantes sugerencias y planteamientos de sistemas ópticos que se han desarrollado en este trabajo de tesis, lo que ha permitido motivar mi interés por la instrumentación óptica.

Mi agradecimiento al Mg. Miguel Asmad por sus enseñanzas en el tema de láseres, interferencia holográfica, por los aportes en la elaboración de materiales holográficos, y por su apoyo personal desinteresado.

Mi agradecimiento al Ing. Rafael Coello por el asesoramiento en la instrumentación electrónica para control del monocromador JOBIN YVON H25 usando un microprocesador.

Mi agradecimiento a Sandra Robles por la elaboración del programa LIBS.m que ha permitido controlar la tarjeta electrónica del monocromador JOBIN YVON H25.

Mi agradecimiento a la Puya Raimondi y al Dr. François Piuzzi por traer el Monocromador JOBIN YVON H-25 desde Francia al Perú, que ha sido usado en el presente trabajo.

Mi agradecimiento al Dr. Jean Pierre Galaup por las consultas y la bibliografía brindada respecto al monocromador tipo Czerny-Turner.

Mi agradecimiento a Franco Gonzales y Loreleyn Flores por la comprensión hacía mi persona, el apoyo incondicional a mi trabajo, y la gran amistad.

Un especial agradecimiento a toda mi familia que me ha apoyado incondicionalmente en mis éxitos y fracasos, y por su comprensión en todo momento de mi trabajo.

En general quiero agradecer a todos los profesores de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería y todos quienes contribuyeron en mi formación profesional.

## RESUMEN

En esta tesis se presenta la optimización óptica de un monocromador Czerny-Turner, la implementación de un espectrómetro Czerny-Turner, y sus aplicaciones a la caracterización de películas fotosensibles; en base a la espectroscopia de absorción ultravioleta-visible. Como trabajo futuro se propone implementar un equipo de espectroscopia de fluorescencia utilizando el espectrómetro que se ha implementado en esta tesis.

El trabajo inicial que se realiza en esta tesis, es la descripción de los elementos ópticos (rejillas de difracción, lentes, espejos cóncavos) que se utilizan en un monocromador o espectrómetro. Luego se da a conocer las características de la configuración óptica Czerny-Turner para un monocromador y un espectrómetro, así como las recomendaciones a seguir para utilizarlo óptimamente y como calibrarlo. También se describe los parámetros ópticos de un monocromador y un espectrómetro, con la finalidad de optimizar el equipo de acuerdo a la aplicación requerida.

Dentro del fundamento teórico se ha descrito la interferencia óptica entre dos haces de luz monocromática, el cual fundamenta el grabado de rejillas holográficas en una emulsión fotosensible.

En la parte experimental, se caracteriza un monocromador Czerny-Turner JOBIN YVON H-25 y se automatiza para ser controlado mediante un programa elaborado en MATLAB. Parte de su caracterización ha sido la simulación del sistema óptico del monocromador para determinar sus límites de resolución, optimización del alineamiento óptico e identificar los problemas de interferencia entre órdenes de difracción que generan luz no deseada en el monocromador.

Luego de automatizar el monocromador se ha acoplado un sistema óptico para que se obtenga un espectrofotómetro. Con este espectrofotómetro se han registrado curvas de absorbancia y transmitancia de materiales fotosensibles (gelatina dicromatada), que luego han sido analizadas con la finalidad de optimizar la elaboración de estos materiales fotosensibles.

Se han propuesto diseños ópticos de un espectrofotómetro y un espectrómetro. En base al diseño óptico del espectrómetro se ha implementado este instrumento para ser aplicado en la caracterización de materiales fotosensibles y películas delgadas. El espectrómetro ha sido implementado con recursos de la Asociación Civil Puya Raimondi.

Otro de los trabajos experimentales desarrollados en el Laboratorio de Óptica de la UNI, ha sido la elaboración y caracterización de emulsiones fotosensibles de gelatina dicromatada. Se ha evaluado su sensibilidad óptica frente a dos longitudes de ondas diferentes, en base a los espectros de transmitancia registrados con el monocromador JOBIN YVON H-25 y con el espectrómetro implementado. En base a los espectros de transmitancia se concluye que la sensibilidad óptica de las emulsiones decae con la longitud de onda.

En un futuro trabajo se propone el grabado y caracterización de rejillas holográficas en emulsiones de gelatina dicromatada con otras longitudes de onda, es especial con luz ultravioleta.

Otro futuro trabajo, es implementar una réplica del espectrómetro, en el Laboratorio de Óptica de la Universidad Nacional de Ingeniería; con la finalidad que este sea parte de un equipo de espectroscopia de fluorescencia.

# CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b> .....	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>15</b>
<b>REJILLAS DE DIFRACCIÓN</b> .....	<b>15</b>
1.1. REJILLA DE DIFRACCIÓN PLANA.....	15
1.2 REJILLAS CÓNCAVAS.....	20
1.2.1. CÍRCULO DE ROWLAND .....	21
1.2.2. ABERRACIONES EN REJILLAS CÓNCAVAS.....	23
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>25</b>
<b>INSTRUMENTOS DISPERSORES DE LUZ Y PARÁMETROS ÓPTICOS</b> .....	<b>25</b>
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	25
2.2 PARÁMETROS ÓPTICOS DE UN ESPECTRÓMETRO Y UN MONOCROMADOR .....	28
2.3 CONFIGURACIONES ÓPTICAS DE MONOCROMADORES Y ESPECTRÓMETROS CON REJILLAS DE DIFRACCIÓN PLANAS.....	33
2.3.2 CONFIGURACIÓN EBERT-FASTIE .....	33
2.3.3 CONFIGURACIÓN LITTROW.....	35
2.3.4 CONFIGURACIÓN CZERNY-TURNER .....	35
2.4 ACOPLAMIENTO ÓPTICO A UN ESPECTRÓMETRO O MONOCROMADOR CON REJILLAS DE DIFRACCIÓN PLANAS.....	37
2.5 CONFIGURACIONES ÓPTICAS DE MONOCROMADORES Y ESPECTRÓMETROS CON REJILLAS DE DIFRACCIÓN CÓNCAVAS .....	39
2.6 ABERRACIONES EN ESPECTRÓMETROS Y MONOCROMADORES.....	40
2.7 PRECAUCIONES AL UTILIZAR UN ESPECTRÓMETRO O MONOCROMADOR .....	41
2.8 CRITERIOS DE ELECCIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO O MONOCROMADOR .....	42
2.9 CALIBRACIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO O MONOCROMADOR .....	43

<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>45</b>
<b>INTERFERENCIA DE ONDAS PLANAS.....</b>	<b>45</b>
3.1 INTERFERENCIA DE ONDAS PLANAS SOBRE UNA EMULSIÓN FOTOSENSIBLE.....	45
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>48</b>
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>49</b>
<b>CARACTERIZACIÓN DE MONOCROMADORES Y OPTIMIZACIÓN.....</b>	<b>49</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MONOCROMADOR CZERNY-TURNER JOBIN YVON (JY) H-25 .....	49
4.1.1 ESQUEMATIZACIÓN DEL SISTEMA ÓPTICO DEL MONOCROMADOR .....	53
4.1.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ÓPTICO DEL MONOCROMADOR .....	55
4.1.3 ANÁLISIS DE LA RESOLUCIÓN DEL MONOCROMADOR .....	64
4.1.4 SISTEMA ÓPTICO DE ACOPLAMIENTO AL MONOCROMADOR H-25	66
4.1.5 AUTOMATIZACIÓN DEL MONOCROMADOR JY H-25.....	68
4.1.6 CALIBRACIÓN DEL MONOCROMADOR JOBIN YVON H-25 .....	72
4.1.7 PROBLEMAS DE INTERFERENCIA EN EL MONOCROMADOR JY H-25 .....	79
4.1.7.1 SOLAPAMIENTO DE ÓRDENES DE DIFRACCIÓN .....	79
4.1.7.2 SUPERPOSICIÓN DE LOS ÓRDENES DE DIFRACCIÓN “0” Y “-1” .....	81
4.2 SIMULACIÓN DE UN MONOCROMADOR MC-PHERSON MODEL 272 (MONTAJE SEYA-NAMIOKA) .....	85
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>98</b>
<b>DISEÑOS ÓPTICOS PARA UN ESPECTROFOTÓMETRO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO .....</b>	<b>98</b>
5.1. SISTEMA 1: DISEÑO DE ESPECTROFOTÓMETRO CON UN MONOCROMADOR CZERNY-TURNER .....	98
5.2. SISTEMA 2: DISEÑO DE UN SISTEMA ÓPTICO PARA MEDIR TRANSMITANCIA Y ABSORBANCIA CON UN ESPECTRÓMETRO CZERNY- TURNER CRUZADO .....	103
5.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS 1 y 2.....	106
5.4. IMPLEMENTACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO CZERNY-TURNER CRUZADO A PARTIR DEL SISTEMA ÓPTICO 2 .....	107
<b>CAPITULO 6.....</b>	<b>110</b>

<b>ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FOTOSENSIBLES.....</b>	<b>110</b>
6.1 PREPARACIÓN DE LA EMULSIÓN FOTOSENSIBLE DE GELATINA DICROMATADA.....	110
6.3 GRABADO DE REJILLAS HOLOGRÁFICAS SOBRE EMULSIONES DE GELATINA DICROMATADA.....	114
6.3.1 Equipo holográfico de geometría vertical .....	114
6.3.2 Equipo de interferencia con luz verde (532 nm) para emulsiones fotosensibles .....	115
6.3.3 Tiempo de exposición a los sistemas de interferencia óptica.....	116
6.4 REVELADO DE LAS EMULSIONES DE GELATINA DICROMATADA ...	116
<b>CAPITULO 7.....</b>	<b>119</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>119</b>
7.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE TESIS.....	119
7.2 RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS.....	121
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>124</b>
<b>CONSTRUCCIÓN DE LA TARJETA ELECTRÓNICA DE CONTROL PARA EL MONOCROMADOR JOBIN YVON H25 .....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>134</b>
<b>MANUAL DE CONTROL DEL MONOCROMADOR JOBIN-YVON H25 .....</b>	<b>134</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Parámetros característicos de la rejilla de difracción 51007.....	52
Tabla 4.2 Cálculo de “ $\Delta\lambda$ ” para diferentes longitudes de onda. ....	64
Tabla 4.3 Datos característicos de los espectros del láser He-Ne para $W_s$ variable. ....	73
Tabla 4.4 Datos característicos de los espectros del láser He-Ne para $W_E$ variable.....	75
Tabla 4.5 Datos característicos de los espectros de la lámpara de Ar.....	78
Tabla 4.6 Comparación de las aberraciones en cada uno de los sistemas ópticos del monocromador Mc-Pherson.....	95
Tabla 4.7 Datos de los tamaños del spot de cada sistema óptico del monocromador Mc-Pherson y sus respectivas resoluciones ópticas.....	96
Tabla 5.1. Descripción de los parámetros físicos del monocromador Czerny-Turner....	99
Tabla 5.2. Descripción de los parámetros físicos del espectrómetro Czerny Turner....	103
Tabla 5.3. Ventajas y desventajas entre los sistemas 1 y 2. ....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema del funcionamiento de una rejilla de difracción por reflexión para el orden $m$ y longitud de onda $\lambda$ .....	16
Figura 1.2. Esquema del funcionamiento de una rejilla de difracción con superficie Blazing para $\lambda$ . .....	18
Figura 1.3. Esquema de la superposición de órdenes de difracción en una rejilla de difracción para un rango espectral entre $\lambda_1$ y $\lambda_2$ . .....	19
Figura 1.4 Espectros de reflectancia de metales en el rango ultravioleta. ....	20
Figura 1.5 Generado de surcos en una rejilla cóncava convencional. ....	21
Figura 1.6 El círculo de Rowland. ....	21
Figura 1.7 Esquema que muestra la variación del espacio entre surcos de una rejilla de difracción para aperturas pequeñas ( $\theta < 15^\circ$ ). ....	22
Figura 1.8. Distribución de la energía luminosa sobre el plano imagen sagital.....	24
Figura 2.1 Esquema de algunos aparatos espectroscópicos: (a) espectroscopio, (b) espectrógrafo y espectrómetro, (c) monocromador, y (d) espectrofotómetro.....	26
Figura 2.2 Esquema de un monocromador y un espectrómetro, ambos de configuración Czerny-Turner (a. Geometría tradicional, b. Geometría cruzada). ....	27
Figura 2.3 Esquema de la formación de imágenes con una lente delgada. ....	28
Figura 2.4 Esquema de la aberración cromática. ....	29
Figura 2.5 Esquema de la aberración esférica.....	30
Figura 2.7 Esquema de la aberración coma. ....	31
Figura 2.8 Perfil de la línea espectral de un láser de He-Ne. ....	32
Figura 2.9 Esquema de un espectrómetro de configuración Ebert-Fastie.....	34
Figura 2.10 Esquema de un monocromador de configuración Littrow. ....	35
Figura 2.11 Esquema de un espectrómetro de configuración Czerny - Turner. ....	36
Figura 2.12 Esquema del acoplamiento del sistema óptico a un monocromador Czerny - Turner.....	38
Figura 2.13 Montajes con rejillas cóncavas: (a) Paschen-Runge, (b) Wadsworth, (c) Seya-Namioka. ....	39
Figura 1.21 Superposición del haz incidente con el orden cero para un monocromador Czerny -Turner. ....	42

Figura 3.1 Interferencia de dos ondas planas que se desplazan hacia lados opuestos para crear un holograma de reflexión. ....	45
Figura 4.1 Fotografía del monocromador JOBIN YVON H-25, las partes enumeradas de rojo se especifican debajo de la figura. ....	49
Figura 4.2. (a) Rendija del monocromador JOBIN YVON H-25, (b) rendija del monocromador vista con un microscopio 15X. ....	50
Figura 4.3 Gráfico de la curva de calibración de la rendija (entrada o salida) del monocromador JOBIN YVON H-25. ....	51
Figura 4.4. Curva de eficiencia relativa para la rejilla de difracción 510 07. Este gráfico ha sido tomado del catálogo de rejillas de JOBIN YVON (JY). ....	52
Figura 4.5 Foto del monocromador Czerny Turner de Jobin Yvon H-25.....	53
Figura 4.6 Esquema del monocromador Czerny Turner H-25 visto desde arriba. ....	54
Figura 4.7 Esquema del monocromador Czerny Turner H-25 desde una vista lateral. .	55
Figura 4.8 Trazo de rayos del sistema óptico M1 del monocromador Czerny Turner H-25, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.....	56
Figura 4.9 Análisis del trazo de rayos del sistema óptico M1, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.....	57
Figura 4.10 Análisis del diagrama de manchas (spot) del sistema óptico M1, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.....	58
Figura 4.11 Trazo de rayos del sistema óptico M2 del monocromador Czerny Turner H-25, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.....	59
Figura 4.12 Análisis del trazo de rayos del sistema óptico M2, usando el programa OSLO EDU 6.3.3. ....	60
Figura 4.13 Análisis del diagrama de manchas (spot) del sistema óptico M2, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.....	61
Figura 4.14 Análisis del diagrama de manchas (spot) en escala 5 (amplificado) del sistema óptico M1, usando el programa OSLO EDU 6.3.3. ....	62
Figura 4.15 Análisis del diagrama de manchas (spot) en escala 5 (amplificado) del sistema óptico M2, usando el programa OSLO EDU 6.3.3. ....	62
Figura 4.16 a) sistema óptico de acoplamiento A1 (lente obturador), b) sistema óptico de acoplamiento A2 (obturador). ....	67
Figura 4.17 Esquema de la fuente de alimentación del fotosensor PMT H5783-04.....	68
Figura 4.18 Izquierda: Curva de sensibilidad Vs. longitud de onda del fotosensor, derecha: curva de ganancia (sensibilidad) del fotosensor.....	69

Figura 4.19 Foto de la fuente de alimentación para el fotosensor PMT H5783-04 .....	69
Figura 4.20 Esquemático impreso del circuito de la tarjeta de control para el monocromador JOBIN YVON H-25. ....	70
Figura 4.21 Foto de la tarjeta de control para el monocromador JOBIN YVON H-25. ....	71
Figura 4.22 Foto del sistema de automatización para el monocromador JY H-25. ....	72
Figura 4.23 Curva y ajuste lineal del ángulo de difracción en función de la longitud de onda. ....	73
Figura 4.24 Espectros del láser He-Ne para diferentes anchos de la rendija de salida del monocromador JY H-25. ....	74
Figura 4.25 Gráfica del FWHM en función del ancho de la rendija de salida ( $W_S$ ). ....	75
Figura 4.26 Espectros del láser He-Ne para diferentes anchos de la rendija de entrada del monocromador JY H-25. ....	76
Figura 4.27 Gráfica del FWHM en función del ancho de la rendija de entrada ( $W_E$ ). ...	76
Figura 4.28 Espectro de la lámpara de argón (Ar_01) en el rango espectral de 693 nm hasta 706 nm, obtenidos con el monocromador JY H-25. ....	77
Figura 4.29 Espectro de la lámpara de argón (Ar_02) en el rango espectral de 744 nm hasta 772 nm, obtenidos con el monocromador JY H-25. ....	78
Figura 4.30 Solapamiento de la dispersión de la luz para diferentes órdenes de difracción en una rejilla de 1200 líneas / mm del monocromador JY H-25. ....	80
Figura 4.31 Espectro de un led UV con el monocromador JY H-25. ....	80
Figura 4.32 Superposición de los espectros del led UV en los órdenes de difracción 1 y 2. ....	81
Figura 4.33 Superposición del orden cero al reingresar la luz (a) en el espejo colimador E2, y (b) en el espejo de enfoque E3, del monocromador JY H-25. ....	82
Figura 4.34 Ingreso al detector de la luz dispersada del orden cero cuando la rejilla se encuentra girada en la posición de $2^\circ$ en el monocromador JY H-25. ....	83
Figura 4.35 Superposición del orden -1 al reingresar la luz (a) en el espejo colimador E2, y (b) en el espejo de enfoque E3, del monocromador JY H-25. ....	84
Figura 4.36 Esquema del monocromador Mc-Pherson 272 visto desde arriba. ....	85
Figura 4.37 Trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso A: luz ultravioleta con $\lambda = 250$ nm. ....	86
Figura 4.38 Análisis del trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso A: luz ultravioleta con $\lambda = 250$ nm. ....	87

Figura 4.39 Análisis del diagrama de manchas (spot) para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso A: luz UV con $\lambda = 250$ nm. ....	88
Figura 4.40 Trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso B: luz visible $\lambda = 400$ nm.....	89
Figura 4.41 Análisis del trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso B: luz visible $\lambda = 400$ nm.....	90
Figura 4.42 Análisis del diagrama de manchas (spot) para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso B: luz visible $\lambda = 400$ nm. ....	91
Figura 4.43 Trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso C: luz IR $\lambda = 1000$ nm. ....	92
Figura 4.44 Análisis del trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso C: luz IR $\lambda = 1000$ nm. ....	93
Figura 4.45 Análisis de las dimensiones del diagrama de manchas (spot) para el monocromador Mc-Pherson 272.....	94
Figure 4.46 Imagen ideal de la rendija superpuesta con la imagen de los puntos del borde de la rendija (spots).....	95
Figura 5.1 Montaje de un monocromador Czerny-Turner para un espectrofotómetro en el rango espectral de 400 nm a 800 nm.....	98
Figura 5.2 Trazo de rayos del sistema óptico del monocromador Czerny-Turner para un espectrofotómetro en el rango espectral 400 nm a 800 nm.....	99
Figura 5.3 Análisis del trazo de rayos del sistema óptico del monocromador Czerny-Turner para un espectrofotómetro en el rango espectral 400 nm a 800 nm.....	100
Figura 5.4 Análisis del diagrama de manchas (spot) en escala 5 (amplificado) del sistema óptico del monocromador Czerny-Turner.....	100
Figura 5.5 Sistema óptico para proyectar la luz del monocromador hacia la muestra en estudio y coleccionar la luz que atraviesa esta hacia el detector de luz.....	101
Figura 5.6 Sistema óptico de un espectrofotómetro en base a un monocromador para el rango espectral visible entre 400 nm a 800 nm.....	102
Figura 5.7 Montaje de un espectrómetro Czerny-Turner cruzado para medir transmitancia y absorbancia en el rango espectral de 400 nm a 600 nm. ....	103
Figura 5.8 Trazo de rayos del sistema óptico del espectrómetro Czerny-Turner cruzado para medir transmitancia y absorbancia.....	104

Figura 5.9 Análisis del trazo de rayos del sistema óptico del espectrómetro Czerny-Turner cruzado alrededor de la longitud de onda central de 633 nm.....	104
Figura 5.10 Análisis del diagrama de manchas (spot) en escala 2 (amplificado) del sistema óptico del espectrómetro Czerny-Turner. ....	105
Figura 5.11 Sistema óptico de un espectrómetro para medir transmitancia y absorbancia en el rango espectral visible entre 400 nm a 600 nm. ....	105
Figura 6.1 Fotos del proceso de preparación de emulsiones de gelatina dicromatada. ....	110
Figura 6.2 Emulsiones de gelatina dicromatada elaboradas en el Laboratorio de Óptica. ....	111
Figura 6.6 Esquema del equipo holográfico de geometría vertical del laboratorio de Óptica de la UNI. ....	114
Figura 6.7 Esquema del equipo de interferencia con luz láser verde (532 nm) usado en la PUCP.....	115
Figura 6.8 Fotos del montaje experimental para medir el número de líneas en las rejillas de difracción grabadas y la eficiencia.....	117
Figura 6.9 Fotos de los espectros de luz de un fluorescente y un foco incandescente, obtenidas con las rejillas de difracción grabadas.....	117
Figura 6.10 Fotos de los órdenes de difracción de luz roja de 633 nm al atravesar las rejillas de difracción grabadas. Izquierda: grabadas con luz verde de 532nm, derecha: grabadas con luz azul de 473nm.....	118
Figura A.1 Foto de la tarjeta de control para el monocromador JOBIN YVON H-25. ....	124
Figura A.2. Esquemático electrónico del circuito de la tarjeta de control para el monocromador JOBIN YVON H-25. ....	125
Figura A.3. Esquemático del circuito impreso de la tarjeta de control para el monocromador JOBIN YVON H-25. ....	126

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta tesis es implementar un prototipo de espectrofotómetro a partir de la automatización de un monocromador, para estudiar materiales fotosensibles que se elaboran en el Laboratorio de óptica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La técnica para estudiar los materiales fotosensibles será la de espectrometría ultravioleta-visible en el rango espectral de 350 nm a 850 nm. Para esta técnica espectroscópica se requiere un monocromador automatizado para obtener la curva de transmitancia o absorbancia de la muestra en estudio. Luego de obtener estos espectros de transmitancia o absorbancia se darán a conocer criterios para su interpretación.

En esta tesis se proponen algunos diseños ópticos de un espectrómetro y un monocromador para poder implementar un espectrofotómetro en el laboratorio de óptica de la Universidad Nacional de Ingeniería. Estos diseños ópticos se pueden implementar para ser aplicados en otras técnicas espectroscópicas como: espectroscopia de emisión ultravioleta-visible, espectroscopia de fluorescencia, espectroscopia Raman, o ser utilizado para la enseñanza en cursos de la carrera profesional de física.

La primera aplicación que tiene esta tesis es poder obtener espectros de transmitancia y absorbancia de emulsiones de gelatina dicromatada que se elaboran en el Laboratorio de Óptica, y que son expuestas a sistemas de interferencia ópticos con el fin de optimizar el registro de rejillas holográficas y mejorar su fotosensibilidad.

**En el Capítulo 1** de esta tesis se dan a conocer las generalidades de las rejillas de difracción plana y cóncava. Se presentan los parámetros ópticos característicos de las rejillas de difracción que se deben tener en cuenta en los equipos espectroscópicos.

**En el Capítulo 2** se presenta la descripción general de instrumentos dispersores de luz y sus parámetros ópticos que los caracterizan. Se muestran las diferentes configuraciones ópticas con rejillas planas y cóncavas utilizadas en los monocromadores y espectrómetros, siendo una de las configuraciones con mayor discusión la configuración Czerny-Turner. Luego se presentan las precauciones que se debe tener al utilizar un espectrómetro, y se describe los pasos a seguir para calibrar un espectrómetro. Así también se da a conocer los criterios a seguir para la elección de un espectrómetro en base a su aplicación científica o tecnológica.

**En el Capítulo 3** se da a conocer la física que explica la interferencia de dos haces de luz monocromática, que será la responsable de que grabar rejillas holográficas en emulsiones fotosensibles.

**En el Capítulo 4** se presenta la caracterización, simulación y optimización de un monocromador Jobin Yvon H-25, cuya configuración óptica es Czerny-Turner. La simulación del sistema óptico del monocromador se realizó con el programa OSLO.EDU.

Cabe mencionar que con la colaboración del Laboratorio de Óptica de la Pontificia Universidad Católica del Perú se ha estudiado el monocromador JOBIN YVON H-25 de tipo Czerny-Turner que se encuentra en dicho laboratorio. El cual fue donado a dicha institución durante la Escuela Andina y la Conferencia Internacional de Espectroscopia 2005.

En base a la simulación del monocromador JOBIN YVON H-25, se ha realizado su automatización en el rango espectral de 350 nm a 900 nm. La automatización del monocromador se ha centrado en el control del motor a pasos que gira la rejilla de difracción y en la adquisición de la señal eléctrica con un fotosensor sensible en el rango ultravioleta-visible. Se ha diseñado y construido una fuente de alimentación para el funcionamiento del fotosensor PMT H5783-04, y la tarjeta de control que es programada con un microcontrolador PIC18F452.

El control del monocromador se ha realizado mediante un programa en Matlab 7.0 (comulación serial entre la tarjeta electrónica y el computador). En este programa, el operador puede elegir el rango espectral de barrido del monocromador, el incremento de longitud de onda en el barrido espectral, y configurar el osciloscopio que registra la señal eléctrica de la salida del fotosensor PMT H5783-04.

En base a la simulación se han encontrado rangos espectrales (UV-visible) en el que existe superposición de órdenes de difracción (entre “0” y “-1”, también entre “-1” y “2”), los cuales producen registros espectrales no deseados. Otros parámetros que se obtuvo con la simulación fueron la dispersión lineal en diferentes zonas del rango espectral y sus respectivas resoluciones ópticas.

En vista que el Laboratorio de Óptica- UNI tiene un monocromador con rejilla cóncava, se ha estudiado al monocromador a través de la simulación óptica, con el fin de que este equipo sea utilizado para registrar espectros de transmitancia en un futuro; debido a que ahora se encuentra aplicado a seleccionar longitudes de onda para otros experimentos en el laboratorio.

El modelo del monocromador es un Mc-Pherson 272 de configuración tipo Seya-Namioka y se ha simulado en alrededor de diferentes longitudes de onda (250 nm, 400 nm, y 1000 nm). Con la simulación óptica se ha registrado que la resolución óptica del monocromador se mantiene alrededor de 0.5 nm en el rango espectral de 250 nm a 400 nm; y para longitudes de onda en el rango visible e infrarrojo cercano la resolución se ve seriamente afectada por su desenfoque sobre la rendija de salida. Además en el rango visible rojo e infrarrojo cercano el astigmatismo sagital puede ser un grave problema, pues el tamaño de este (astigmatismo sagital) hace que el espectro de luz se expanda demasiado, de tal forma que se reduce la cantidad de luz que atraviesa la rendija de salida. Frente a los problemas que se presentan en este monocromador se hacen observaciones y recomendaciones.

**En el capítulo 5** se presenta los diseños ópticos de un espectrofotómetro y el de un espectrómetro para medir curvas de transmitancia y absorbancia. En base a la simulación óptica de un espectrómetro Czerny-Turner cruzado, se ha implementado uno de estos instrumentos para registrar espectros de transmitancia de materiales

fotosensibles y películas delgadas. Siendo el rango espectral de 400 nm a 700 nm, y su resolución óptica está entre 0,3 nm y 0,5 nm.

**En el capítulo 6** se presenta la descripción detallada de la elaboración de emulsiones de gelatina dicromatada para grabar rejillas holográficas, con dos sistemas de interferencia óptica antes de ser expuestas las muestras al sistema de interferencia óptica, se ha medido el espectro de transmitancia y absorbancia con el monocromador JOBIN YVON H-25 que se ha automatizado, y con un espectrómetro de igual configuración óptica que se ha implementado en esta tesis. Se realizó una primera interpretación de los espectros (transmitancia y absorbancia) obtenidos, para seguir recomendaciones respecto a la fotosensibilidad de la emulsión de gelatina dicromatada.

**En el capítulo 7** de la tesis se dan a conocer las conclusiones, recomendaciones a seguir; así también, los trabajos a realizar en futuras investigaciones.

# **FUNDAMENTO TEÓRICO**

# CAPITULO 1

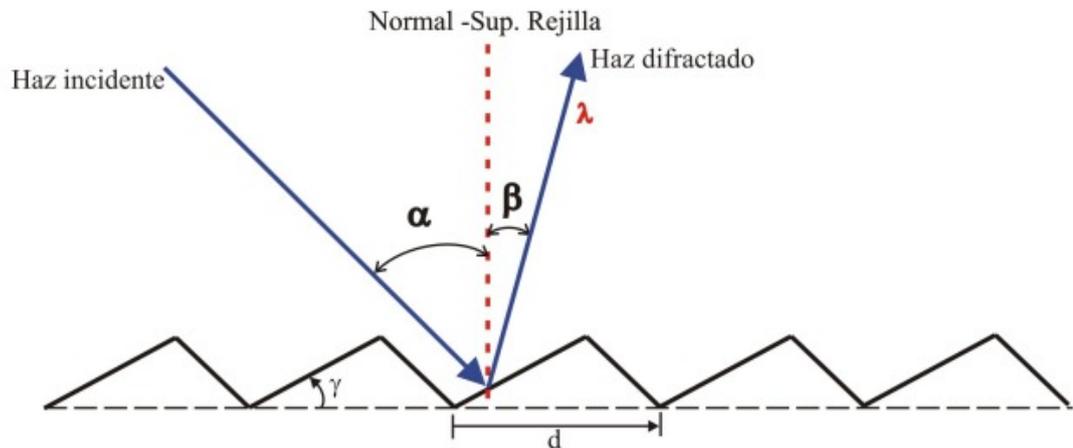
## REJILLAS DE DIFRACCIÓN

### 1.1. REJILLA DE DIFRACCIÓN PLANA

La rejilla de difracción es uno de los elementos más importante en los equipos de espectroscopia que lo utilizan, el cual ha permitido observar y encontrar información experimental muy importante en campos de la investigación como la física, la química, la biología, la metalurgia, entre otras. Todas estas áreas utilizan la rejilla de difracción como una herramienta rutinaria de gran exactitud y precisión, para la detección de especies atómicas y moleculares.

La rejilla de difracción puede definirse como una superficie óptica plana o curva con un conjunto de surcos de cierta forma (los más comunes son las que poseen surcos rectos, paralelos e igualmente espaciados). Estas líneas se producen mecánicamente o por medio de la interferencia de dos haces de luz monocromática (láser). Su principio de funcionamiento se basa, en que al incidir un haz de luz sobre la superficie de la rejilla de difracción este (el haz de luz) es difractado, proyectando luego un patrón de luz (patrón de difracción) característico de la rejilla. La luz se dispersa en diferentes direcciones de acuerdo a las longitudes de onda que contiene el haz de luz inicial, al ángulo de incidencia, al espaciado entre líneas y al orden de difracción del patrón de luz proyectado.

La relación general que caracteriza a una rejilla de difracción está definida por la **ecuación (1.1)**, cuyas variables se muestran en detalle en la figura 1.1. La convención de los signos de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  es positivo en ambos casos.



**Figura 1.1. Esquema del funcionamiento de una rejilla de difracción por reflexión para el orden  $m$  y longitud de onda  $\lambda$ .**

$$d(\text{sen}\alpha + \text{sen}\beta) = m\lambda \quad (1.1)$$

$d$ : Espaciado entre líneas de la rejilla de difracción.

$\alpha$ : Ángulo del haz de luz incidente con respecto a la normal de la superficie de la rejilla de difracción.

$\beta$ : Ángulo del haz de luz dispersado con respecto a la normal de la superficie de la rejilla de difracción.

$\lambda$ : Longitud de onda dispersada por la rejilla de difracción en la dirección  $\beta$ .

$m$ : Orden de difracción del haz dispersado en la dirección  $\beta$ .

$\gamma$ : Ángulo de Blaze.

$\rho$ : Densidad lineal de la rejilla de difracción (líneas/mm).

La densidad lineal  $\rho$  se relaciona con el valor  $d$  por la **ecuación (1.2)**.

$$\rho = \frac{1}{d} \quad (1.2)$$

La rejilla de difracción se caracteriza por su dispersión angular, dispersión lineal, poder de resolución, la longitud de onda de Blaze (el blazing), y el rango espectral libre. A continuación se explica con detalle estos parámetros ópticos.

<sup>1</sup> Hutley, M.C.; **Diffraction gratings** / Pag. 23

**1.1.1 DISPERSIÓN ANGULAR:** es la medida de la separación de longitudes de onda (difractadas por la rejilla), por unidad de ángulo de dispersión ( $\beta$ ). Está definido por la **ecuación (1.3)**, que se obtiene al diferenciar la ecuación general de la rejilla de difracción respecto a  $\beta$ .

$$D_a = \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = \frac{m}{d \cos \beta} \quad (1.3)$$

$D_a$ : dispersión angular ( $^\circ/\text{nm}$ ).

**1.1.2 DISPERSIÓN LINEAL:** es la medida de la separación de longitudes de onda (difractadas por la rejilla), por unidad de longitud, sobre el plano imagen de la óptica utilizada (para proyectar la imagen de la luz difractada). Está definido por la ecuación (1.4), que se obtiene del producto de la dispersión angular y la longitud focal ( $f$ ) de la óptica utilizada.

$$D_L = \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \cdot f = \frac{f \cdot m}{d \cdot \cos \beta} \quad (1.4)$$

$D_L$ : dispersión lineal ( $\text{mm}/\text{nm}$ ).

**1.1.3 PODER DE RESOLUCIÓN:** está definido como la relación entre el mínimo cambio de longitud de onda ( $\Delta\lambda$ ) que la rejilla de difracción puede resolver y la longitud de onda a la que está operando ( $\lambda$ ). Utilizando la ecuación general de la rejilla de difracción y la definición del poder de resolución se llega a la **ecuación (1.5)**.

$$R_p = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm \quad (1.5)$$

$R_p$ : Poder de resolución de la rejilla de difracción ( $\text{nm}/\text{nm}$ ).

$N$ : Número total de líneas iluminadas por el haz de luz incidente sobre la rejilla de difracción.

**1.1.4 LONGITUD DE ONDA DE BLAZE:** Para obtener una mayor eficiencia de la rejilla de difracción en un determinado rango de longitudes de onda se fabrican las rejillas con cierto perfil en su superficie, este perfil tiene forma de diente de sierra (ver figura 1.2) y está definido por “ $\gamma$ ” que se conoce como ángulo de Blaze. De acuerdo a la

condición de Blaze (donde la máxima intensidad de luz del patrón difractado se da por reflexión directa  $i = r$ , indicado en la figura 1.2), se obtiene la longitud de onda de Blaze ( $\lambda_B$ ), donde la eficiencia de la rejilla de difracción es máxima. Siendo el rango de longitudes de onda con eficiencia mayor del 40% (del máximo a la longitud de onda de Blaze) igual a  $[2/3\lambda_B, 2\lambda_B]$ .

Utilizando la ecuación general de la rejilla de difracción y la condición de Blaze se llega a obtener la ecuación (1.6). La convención de los signos para la ecuación (1.6) es positiva para todos los ángulos, de acuerdo a la figura 1.2.

$$\lambda_B = \frac{2d \operatorname{sen} \gamma \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{m} \quad [1.6]$$

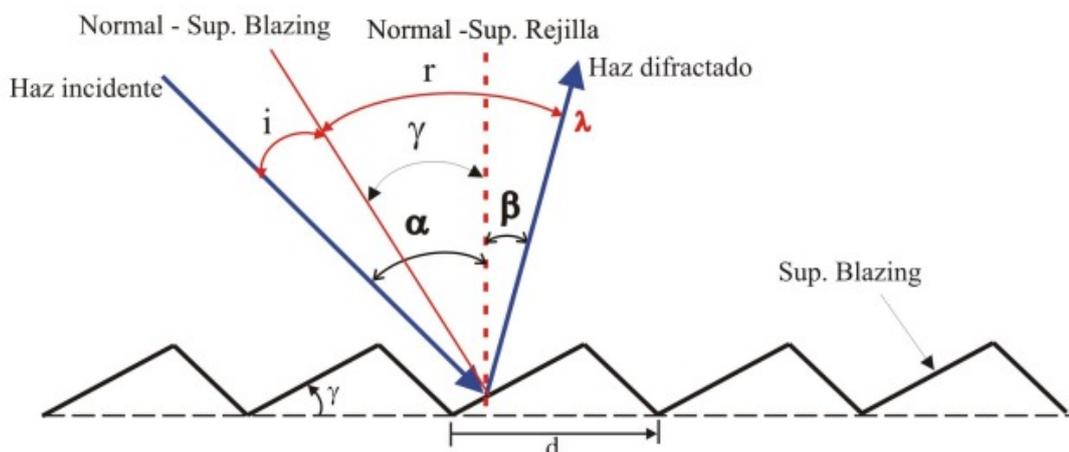
$\lambda_B$ : Longitud de onda de Blaze de la rejilla de difracción.

Símbolos para la figura 1.2.

$\gamma$ : Ángulo de Blaze.

$i$ : Ángulo de incidencia respecto a la normal de la superficie Blazing.

$r$ : Ángulo de reflexión respecto a la normal de la superficie Blazing.



**Figura 1.2.** Esquema del funcionamiento de una rejilla de difracción con superficie Blazing para  $\lambda$ .

**1.1.5 RANGO ESPECTRAL LIBRE:** Para un haz de luz que incide con un ángulo “ $\alpha$ ” sobre una rejilla, la luz se difracta en diferentes direcciones “ $\beta_i$ ” para distintos  $\lambda_i$

en un orden  $m$  determinado. De acuerdo a la ecuación general de la rejilla de difracción por reflexión (ver ecuación (1.1)), para un  $\alpha$  y  $\beta$  fijo, el término  $m\lambda$  es constante. De esta deducción se llega a la ecuación (1.7) que indica que dos longitudes de onda se pueden superponer (solapar) en órdenes sucesivos. Entonces cuando un haz de luz llega a la rejilla y se difracta en diferentes órdenes existirá un rango de longitudes de onda que se superpongan, tal como se muestra en la figura 1.3.

Al rango de longitudes de onda que no se superponen en un cierto rango espectral para dos órdenes consecutivos se le denomina “**rango espectral libre**” y se determina de acuerdo a la ecuación (1.8).

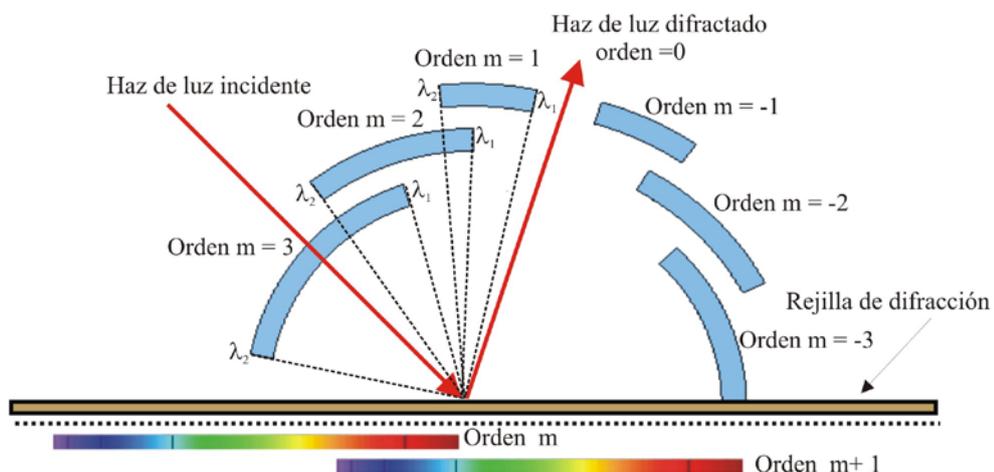
$$d(\text{sen}\alpha + \text{sen}\beta) = m\lambda = (m+1)\lambda' \quad (1.7)$$

La ecuación (1.7) es válida para el mismo  $\alpha$  y  $\beta$  en los diferentes órdenes de difracción.

$\lambda'$ : Longitud de onda del orden  $m+1$  superpuesta a  $\lambda$  en el orden  $m$ .

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1}{m} \quad (1.8)$$

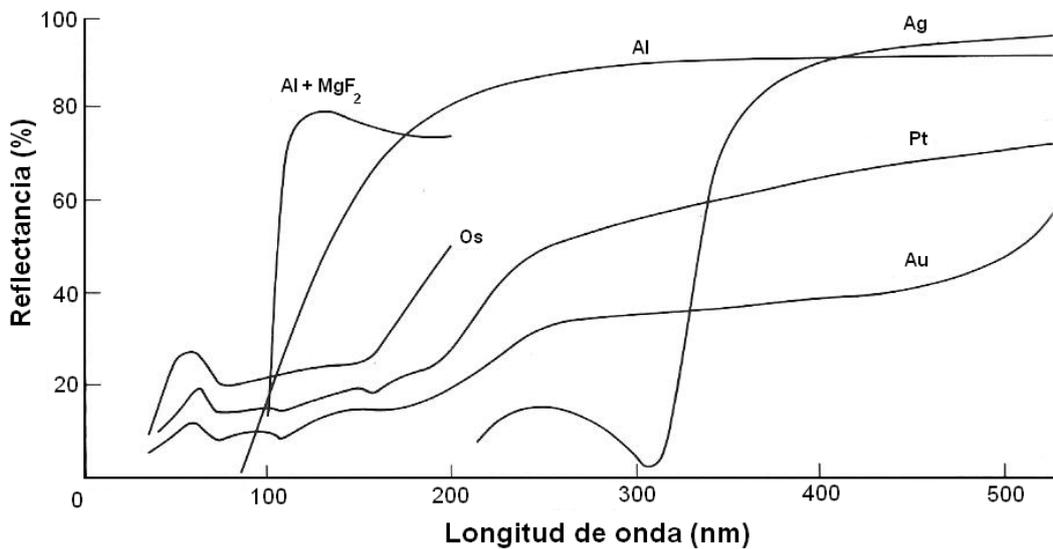
Donde:  $\lambda_2 > \lambda_1$



**Figura 1.3. Esquema de la superposición de órdenes de difracción en una rejilla de difracción para un rango espectral entre  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ .**

## 1.2 REJILLAS CÓNCAVAS

En 1882 H.A. Rowland mostró que una rejilla de difracción hecha sobre una superficie esférica cóncava, podía ella misma dispersar la luz y a la vez enfocar en el plano imagen. Esto significó una considerable ventaja con respecto al uso de rejillas planas que necesitaban un espejo de colimación y otro de enfoque (para un monocromador o espectrómetro) con lo que había pérdidas de energía de la luz entrante al reflejarse sobre ellas.

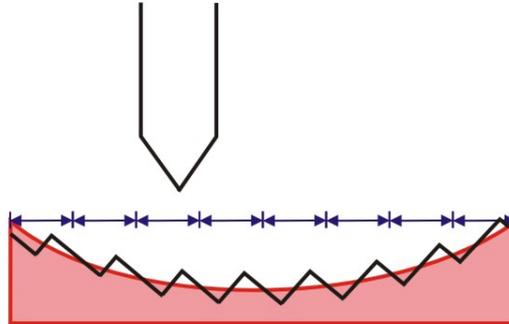


**Figura 1.4 Espectros de reflectancia de metales en el rango ultravioleta.**

En el tiempo de Rowland los componentes ópticos reflejante eran hechos de metales especulares con una máxima reflectancia del 70%. Así que el máximo de transmisión en un monocromador o espectrómetro con una rejilla plana (asumiendo que la eficiencia relativa es 100%) era de 35% aproximadamente, que es la mitad de la luz que se obtendría con un instrumento que utiliza una rejilla cóncava.

En la figura 1.4 se puede observar la reflectancia de las superficies metálicas que se utilizan comúnmente en superficies ópticas reflejantes. Se puede notar que para longitudes de onda en el rango UV la reflectancia cae bruscamente, siendo el recubrimiento más usado el aluminio y el aluminio con fluoruro de magnesio (en el rango de 110 nm hasta 200 nm).

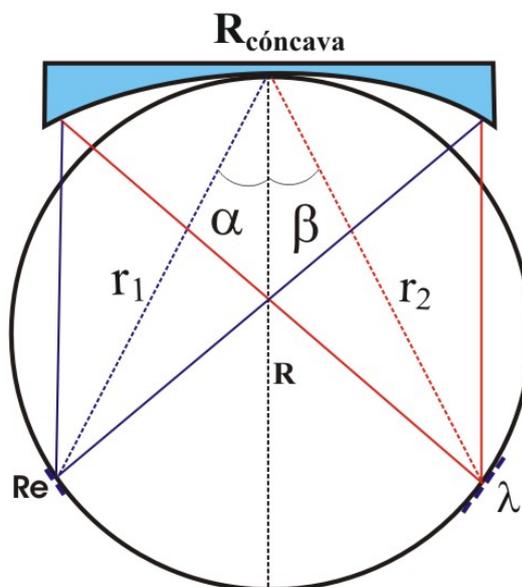
Rowland generó las rejillas en una superficie esférica cóncava usando la misma ingeniería que el generado de surcos en una rejilla plana. En la figura 1.5 se observa que el espaciamiento de surcos en la rejilla cóncava no es constante, pero si es constante cuando se proyectan la superficie esférica a lo largo de una recta.



**Figura 1.5 Generado de surcos en una rejilla cóncava convencional.**

### 1.2.1. CÍRCULO DE ROWLAND

Rowland demostró que para una rejilla cóncava, que si una fuente puntual es ubicada en un punto de un círculo que toca la rejilla de forma perpendicular (**en un polo del círculo**) y que su radio de curvatura es la mitad del radio de la superficie cóncava de la rejilla, entonces la ubicación de la imagen de la luz difractada en primera aproximación se encontrará en el mismo círculo. Este círculo es llamado círculo de Rowland y es mostrado en la figura 1.6.



**Figura 1.6 El círculo de Rowland.**

La ecuación de una rejilla de difracción cóncava de acuerdo a las figuras 1. 6 y 1.7 es la siguiente:

$$\frac{\cos \alpha}{R} - \frac{\cos^2 \alpha}{r_1} + \frac{\cos \beta}{R} - \frac{\cos^2 \beta}{r_2} = 0 \quad (1.9)$$

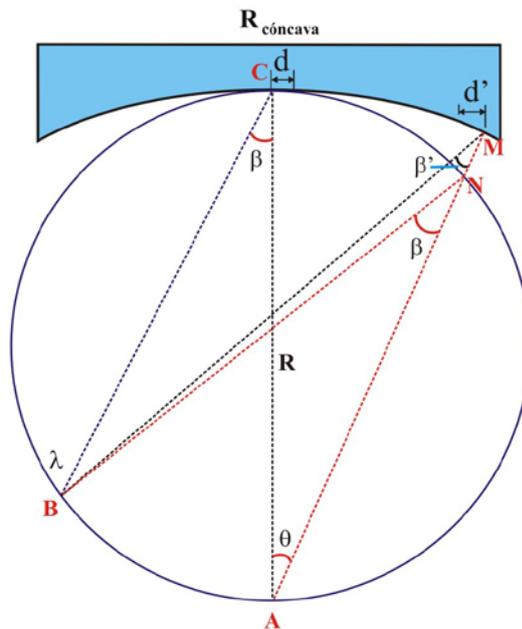
Una solución de esta ecuación se da asumiendo que los términos  $\alpha$  y  $\beta$  son independientes. Entonces igualando cada conjunto de términos de  $\alpha$  y  $\beta$  por separados tendríamos que:

$$r_1 = R \cos \alpha \quad r_2 = R \cos \beta$$

Estas relaciones hacen que los puntos A y B (ver figura 1.7) se encuentre dentro de un círculo de diámetro R (círculo de Rowland.)

De acuerdo a la figura 1.7, si la apertura es pequeña ( $\theta < 15^\circ$ ), el espacio entre surcos en la rejilla para que la luz dispersada enfoque sobre el círculo de Rowland debe variar según la ecuación 1.10.

$$d' = \frac{d}{\cos \theta} \quad (1.10)$$



**Figura 1.7** Esquema que muestra la variación del espacio entre surcos de una rejilla de difracción para aperturas pequeñas ( $\theta < 15^\circ$ ).

## 1.2.2. ABERRACIONES EN REJILLAS CÓNCAVAS

### Aberración esférica

Cuando la apertura numérica  $\theta$  (el ángulo que contiene al cono de luz que llega a la rejilla) no es pequeña, los rayos difractados cercanos al borde de la rejilla no llegan a enfocar exactamente sobre el círculo de Rowland. Entonces, la imagen sufre una aberración esférica, siendo el error total ( $E_{est}$ ) en longitud de camino óptico entre el rayo difractado del **polo de la rejilla** y el de la región subtendida un ángulo  $\theta$  es igual a:

(determinado por Madden y Strong en 1958)

$$E_{est} = \frac{m\lambda R \tan \beta' \theta^4}{8d} \quad (1.11)$$

Donde:

$\lambda$ : Longitud de onda y las demás variables se encuentran especificadas en la figura 1.7.

m: orden de difracción

Se puede apreciar que el error se incrementa con la cuarta potencia de la apertura numérica.

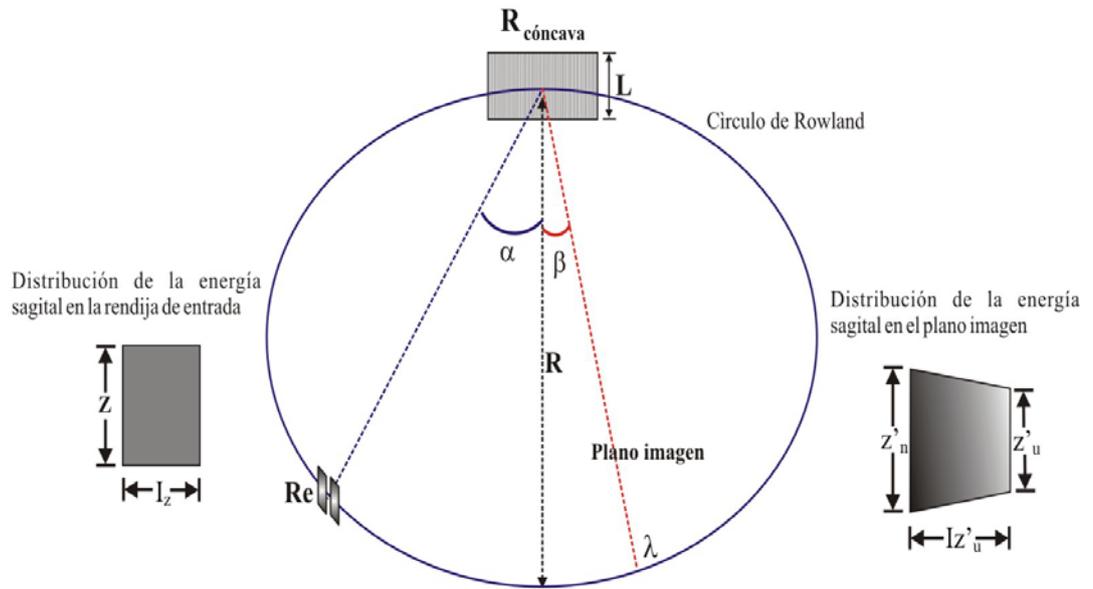
### Astigmatismo

La aberración más importante cuando se utilizan las rejillas cóncavas configurada en el círculo de Rowland, es el astigmatismo. En este caso, una fuente puntual ubicada en el círculo de Rowland no enfoca en el plano imagen como un punto, sino como una línea de longitud definida.

Una de las contribuciones del astigmatismo se da debido a las características de la distribución de luz de la fuente (que se desea analizar). Cuando una rejilla cóncava se utiliza en un montaje usando el círculo de Rowland, no es recomendable colocar la fuente en la rendija de entrada o enfocarla en ella, ya que la luz dispersada no llegará a enfocar exactamente sobre el plano imagen.

Una forma de corregir considerablemente el astigmatismo en rejillas cóncavas es usar un montaje del tipo Wadsworth, que colima la luz de la fuente antes que llegue a la rejilla cóncava. Otra forma de corregir el astigmatismo es usando rejillas deformadas toroidalmente.

Una consecuencia adicional debido al astigmatismo es que las líneas espectrales no son uniformes y en algunos casos la intensidad de algunas líneas espectrales se reduce considerablemente en comparación a las demás. Esta situación es ilustrada en la figura 1.8.



**Figura 1.8. Distribución de la energía luminosa sobre el plano imagen sagital.**

## CAPITULO 2

### INSTRUMENTOS DISPERSORES DE LUZ Y PARÁMETROS ÓPTICOS

#### 2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

También llamados aparatos espectroscópicos, los cuáles se definen como aquellos aparatos capaces de registrar un espectro de luz. Ellos se diferencian en la forma de obtener y registrar un espectro, tal como se muestra en la figura 2.1. A continuación se da a conocer una breve descripción de ellos.

***Espectroscopio:*** es un instrumento con el que se puede visualizar el espectro con el ojo humano.

***Espectrógrafo:*** es un instrumento que registra el espectro fotográficamente.

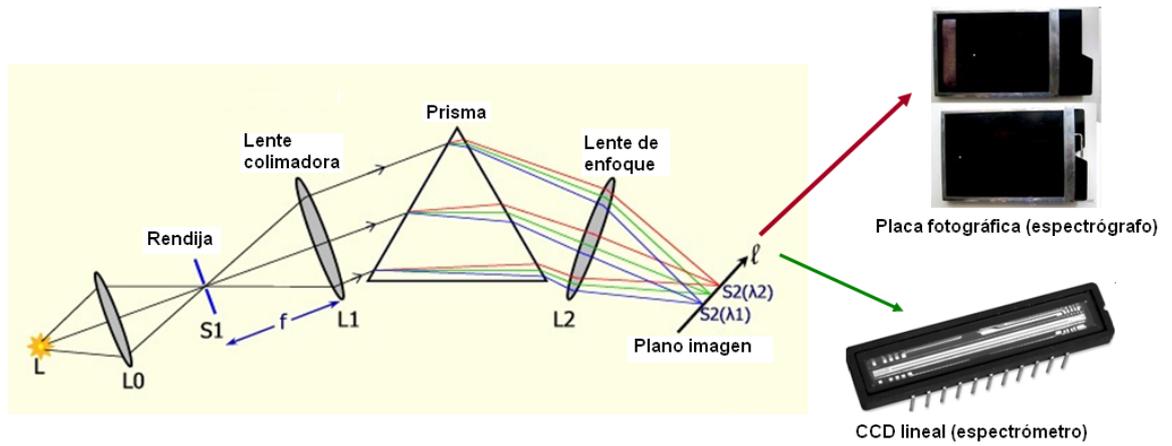
***Espectrómetro:*** es un instrumento que registra el espectro con un detector de luz (CCD, fotodiodo).

***Monocromador:*** es un instrumento que proporciona la emisión de una banda estrecha del espectro de luz que sale por una rendija. La banda estrecha que pasa por la rendija puede moverse a través del espectro en forma continua en función del movimiento del elemento óptico dispersor (prisma, red de difracción).

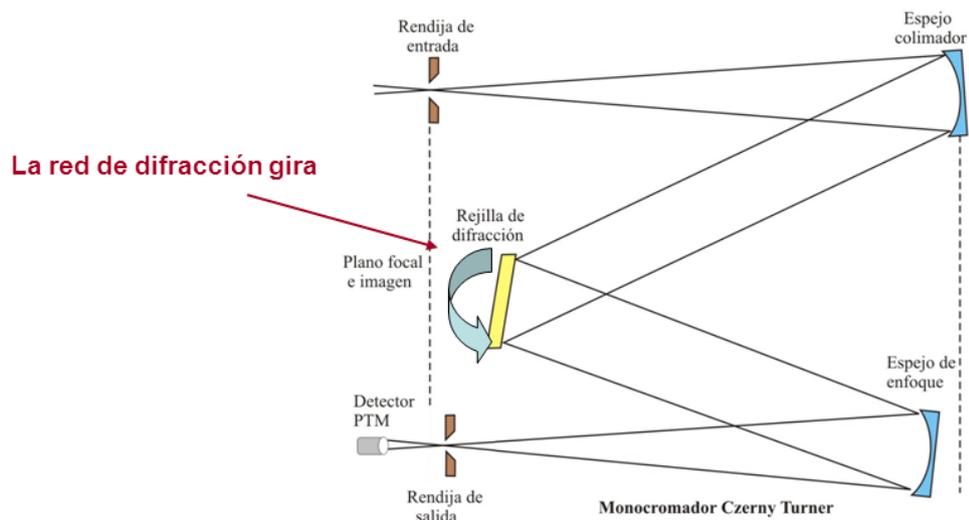
***Espectrofotómetro:*** es un instrumento espectroscópico que registra espectros de absorción, transmitancia y/o reflexión de una muestra en estudio.



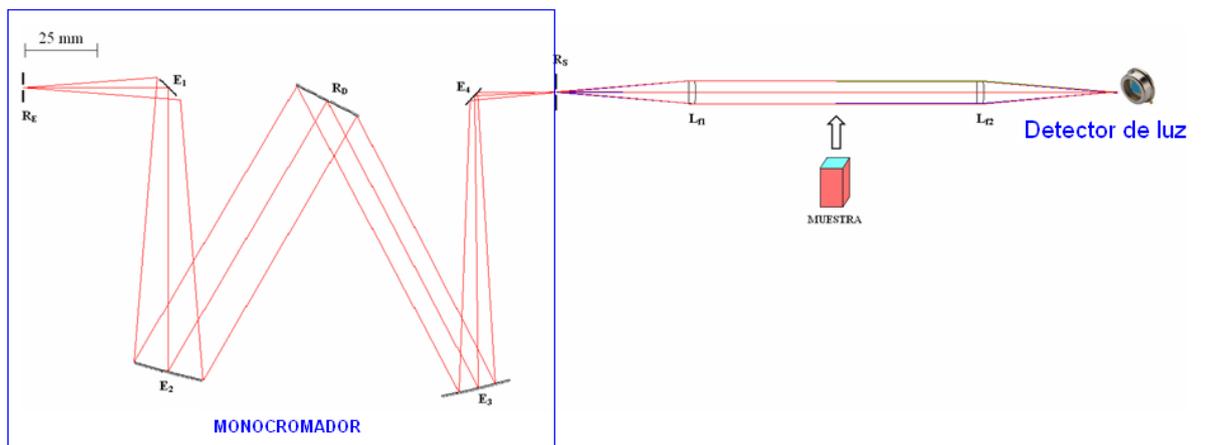
(a)



(b)



(c)

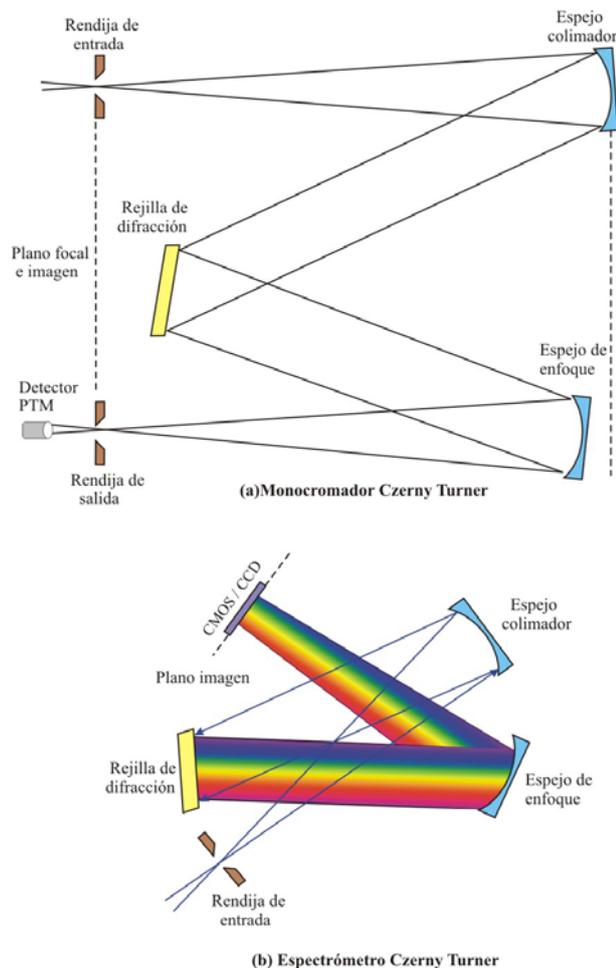


(d)

Figura 2.1 Esquema de algunos aparatos espectroscópicos: (a) espectroscopio, (b) espectrógrafo y espectrómetro, (c) monocromador, y (d) espectrofotómetro.

Dos de los instrumentos dispersores más utilizados son los espectrómetros y monocromadores. Los espectrómetros dispersan la luz incidente (sin mover la rejilla de difracción), sobre arreglos espaciales de una o dos dimensiones. La salida del espectrómetro tiene correspondencia entre la posición espacial y la longitud de onda. En el monocromador la luz incidente es dispersada para cada longitud de onda sobre la misma posición de salida (girando la rejilla de difracción sobre su eje). El espectrómetro registra todas o muchas partes del espectro de luz simultáneamente, mientras que el monocromador registra una por una las longitudes de onda del espectro.

El espectrómetro utiliza varios detectores (el CMOS y el CCD), para registrar el espectro, en cambio los monocromadores utilizan un sólo detector (el fotomultiplicador y el fotodiodo avalancha). En la figura 2.2 se muestra los esquemas representativos de un espectrómetro y un monocromador, ambos de configuración Czerny-Turner.



**Figura 2.2 Esquema de un monocromador y un espectrómetro, ambos de configuración Czerny-Turner (a. Geometría tradicional, b. Geometría cruzada).**

Uno de los usos más comunes de los espectrómetros es el análisis químico de materiales (registro de fluorescencia atómica, molecular), mientras que el uso frecuente de los monocromadores es medir la transmitancia, absorbancia, y la reflexión de materiales.

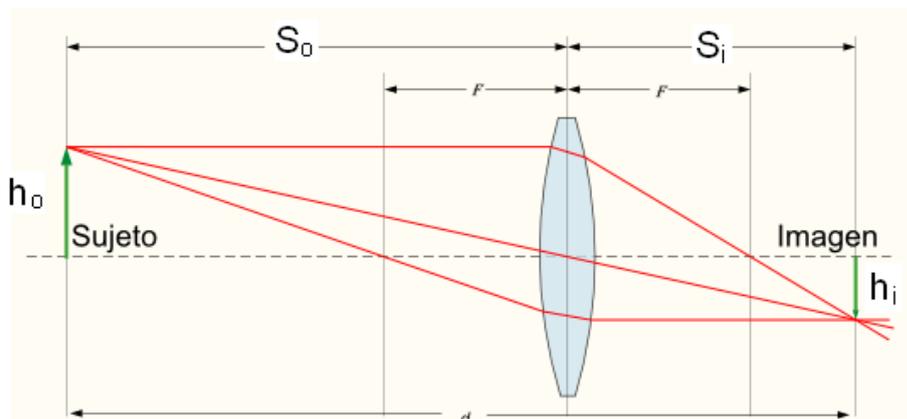
## 2.2 PARÁMETROS ÓPTICOS DE UN ESPECTRÓMETRO Y UN MONOCROMADOR

En esta sección se describe y/o determinan los parámetros más importantes de un espectrómetro o monocromador.

### 2.2.1 ÓPTICA GEOMÉTRICA PARA LENTES DELGADAS

La óptica geométrica estudia la formación de imágenes por medio de las leyes de refracción y reflexión. Una primera aproximación de la formación de imágenes es a través de la ecuación de lentes delgadas (ecuación 2.1).

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_i} \quad (2.1)$$



**Figura 2.3 Esquema de la formación de imágenes con una lente delgada.**

$h_o$ : altura del objeto

$S_o$ : distancia objeto respecto a la lente delgada

$h_i$ : altura de la imagen

$S_i$ : distancia imagen respecto a la lente delgada

$F$ : distancia focal de la lente delgada

La ecuación 2.2 muestra la magnificación transversal de la imagen respecto al tamaño del objeto.

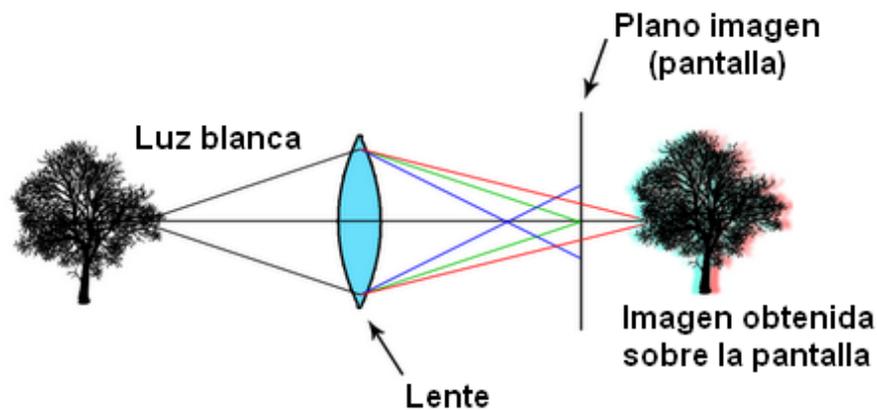
$$M_T = \frac{h_i}{h_o} = \frac{S_i}{S_o} \quad (2.2)$$

### 2.2.2 ABERRACIONES ÓPTICAS

Una aberración óptica es la degradación de la calidad de imagen que se encuentra sobre un plano. En general se da porque la luz que proviene de un punto objeto (parte infinitesimal representativa del objeto) no forma un punto sobre el plano imagen, luego de atravesar un sistema óptico. Entre las aberraciones básicas tenemos la aberración cromática, la esférica, por astigmatismo y la coma. Estas las describiremos brevemente a continuación:

#### *Aberración cromática*

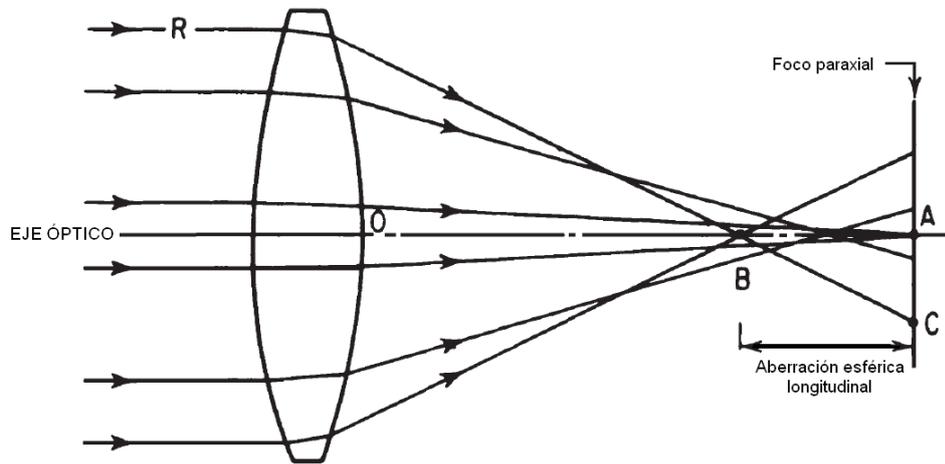
Este tipo de aberración se da cuando la luz de diferentes longitudes de onda (luz blanca) que proviene de un mismo punto objeto y atraviesa un elemento refractivo (una lente), forman varias imágenes en diferentes planos de acuerdo a la longitud de onda. Esto es debido a que un material refractivo, tiene diferentes índices de refracción para cada longitud de onda (periodo espacial de la onda electromagnética), lo que hace que la luz se propague en diferentes direcciones cuando incide sobre el material refractivo.



**Figura 2.4** Esquema de la aberración cromática.

#### *Aberración esférica*

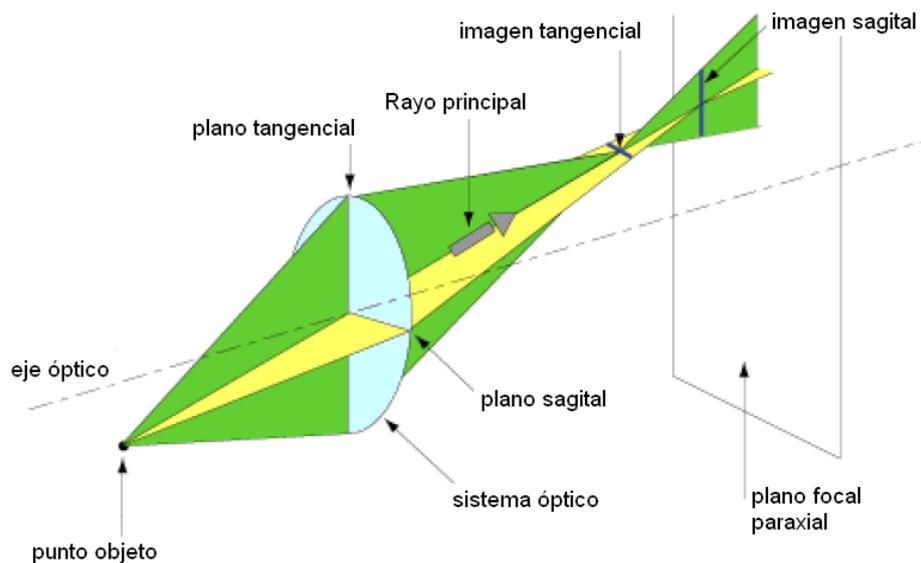
Este tipo de aberración se puede definir como la variación de enfoque de la luz que proviene de un objeto en función de la apertura numérica. Esto es debido a la desviación de los haces de luz cuando inciden sobre superficies esféricas de los elementos ópticos.



**Figura 2.5 Esquema de la aberración esférica.**

### *Aberración por astigmatismo*

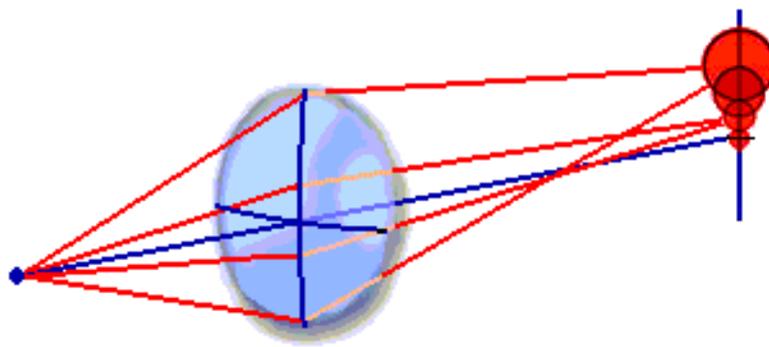
Este tipo de aberración es debido a que la curvatura de las superficies esféricas (en los lentes y espejos) en direcciones perpendiculares no son las mismas. Cuando un haz de luz de un punto objeto incide a la superficie esférica en una orientación (plano tangencial) este forma su imagen sobre un plano (imagen tangencial). Y cuando incide este mismo haz de luz sobre la superficie esférica en una orientación perpendicular a la anterior (plano sagital), forma su imagen sobre otro plano (imagen sagital). La siguiente figura explica este tipo de aberración, y se observa que la imagen del punto objeto en cada plano (tangencial y sagital) es una línea.



**Figura 2.6 Esquema de la aberración por astigmatismo.**

### ***Aberración coma***

Este tipo de aberración se puede definir como la magnificación óptica de acuerdo a la apertura numérica del sistema óptico. Cuando el haz de luz proveniente de un punto objeto incide sobre una superficie óptica en diferentes orientaciones respecto al eje óptico (eje por el que pasan los centros de los elementos ópticos), se genera una imagen en forma de un cometa sobre el plano imagen.



**Figura 2.7 Esquema de la aberración coma.**

### **2.2.3 APERTURA NÚMÉRICA (AN)**

Es el parámetro óptico que indica la cantidad de luz que ingresa a un sistema óptico. Para el espectrómetro o monocromador Czerny-Turner queda definido de acuerdo a la ecuación 2.3, siendo  $\theta$  definido por la ecuación 2.4.

$$AN = n \sin(\theta) \quad (2.3)$$

Dónde:

$$\theta = 2 \arctan\left(\frac{D}{2f}\right) \quad (2.4)$$

D: diámetro del espejo colimador de la configuración Czerny-Turner.

f: distancia focal del espejo colimador de la configuración Czerny-Turner.

### **2.2.4 F-NÚMERO (f/#)**

Este parámetro está definido por la ecuación 2.5.

$$f/\# = \frac{1}{2 AN} \quad (2.5)$$

### 2.2.5 ANCHO DE BANDA (BANDPASS)

El bandpass (BP) de un instrumento dispersor es el intervalo espectral que puede ser aislado. Este depende de muchos factores, tales como: el ancho de la rejilla, las aberraciones ópticas del sistema, la resolución espacial del detector, el ancho de la rendija de entrada y salida, la óptica del instrumento. El bandpass se ubica en el plano imagen en el espectrómetro y en la rendija de salida en un monocromador.

Si la fuente de luz fuera cuasi-monocromática (luz láser), el bandpass se reduce al ancho de la línea espectral, que será definido como el ancho a la mitad de la altura máxima del perfil (FWHM) de la línea espectral que se muestra en la figura 2.8.

En un monocromador el bandpass (de luz monocromática) se define como la dispersión lineal por el ancho de la rendija de salida (ver la ecuación 2.6).

$$BP = D_L^{-1} \cdot W \quad (2.6)$$

$D_L^{-1}$ : Inversa de la dispersión lineal.

$W$ : ancho de la rendija de salida en un monocromador.

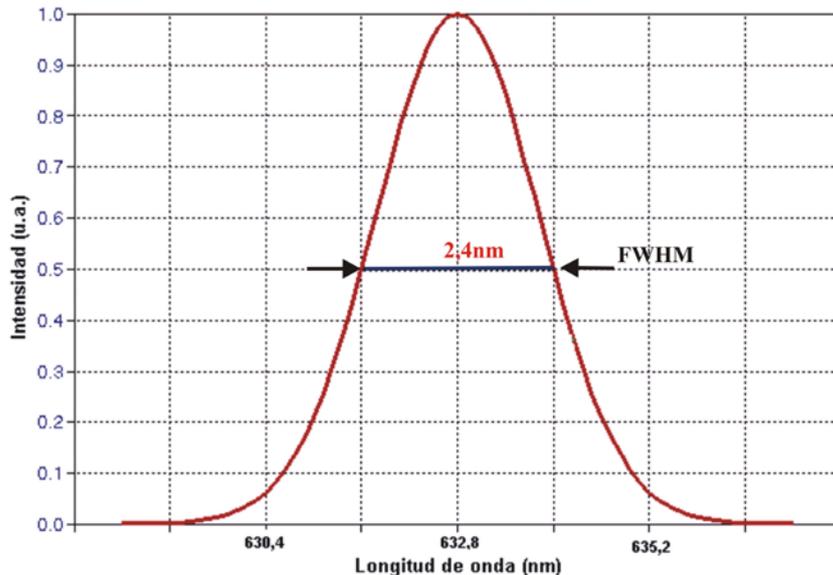


Figura 2.8 Perfil de la línea espectral de un láser de He-Ne.

### 2.2.6 RESOLUCIÓN ÓPTICA ESPECTRAL

La resolución del espectrómetro depende la óptica del sistema, siendo la dispersión lineal (rejilla de difracción y la focal del sistema óptico de enfoque) y el ancho de la

rendija de entrada los elementos determinantes. En el caso de un monocromador otro elemento importante será la rendija de salida.

Esta resolución espectral ( $R_s$ ) para el espectrómetro o monocromador puede ser estimada por la ecuación 2.7.

$$R_s = D_L^{-1} \cdot W \quad (2.7)$$

$D_L^{-1}$ : Inversa de la dispersión lineal.

W: ancho de la rendija de entrada (espectrómetro), o rendija de salida (monocromador).

## 2.3 CONFIGURACIONES ÓPTICAS DE MONOCROMADORES Y ESPECTRÓMETROS CON REJILLAS DE DIFRACCIÓN PLANAS

### 2.3.1 RESEÑA HISTÓRICA

En el siglo XIX los arreglos para un espectroscopio estaban compuestos de una rendija, un colimador (sistema de lentes), un dispersor (prisma), y un telescopio (sistema de lentes) <sup>[5]</sup>. Y fue H. Ebert quien a partir de la investigación y producción de rejillas de difracción por Henry Augustus Rowland, propuso un espectrómetro acromático usando un espejo esférico. La función de este espejo era la de un colimador, un telescopio y a la vez eliminar la dispersión longitudinal no deseada, que es inherente en un sistema óptico de lentes.

Extrañamente, esta configuración parece haber sido ignorada hasta que fue redescubierta por William G. Fastie<sup>2</sup> y, mientras tanto, Czerny y Turner había sustituido a los dos tradicionales lentes (de la configuración del espectroscopio) por dos espejos esféricos. A la vez Littrow había evolucionado de manera similar usando un espejo esférico o paraboloidal llegando a una mejor resolución, limitada por la difracción.

### 2.3.2 CONFIGURACIÓN EBERT-FASTIE

El esquema de la configuración de un monocromador Ebert-Fastie se muestra en la figura 2.9. Una de las características de esta configuración, que comparte con el

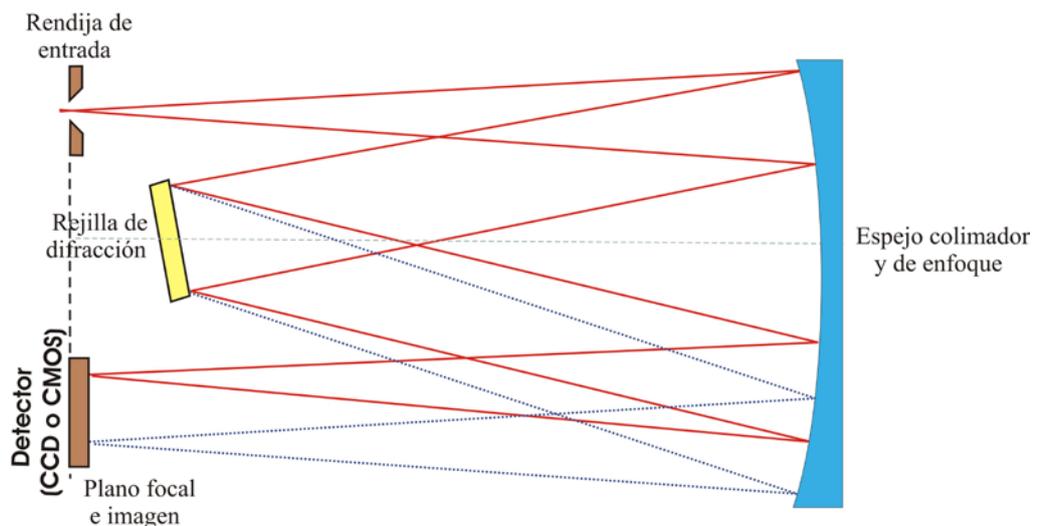
---

<sup>2</sup> Image Forming Properties of the Ebert Monochromator  
William G. Fastie, J. Opt. Soc. Am. **42** 647-51

montaje de Czerny-Turner (que se verá más adelante) [5], es la corrección parcial de la aberración de coma tangencial, dejando la aberración esférica y astigmatismo como las dos principales aberraciones a corregir. El astigmatismo es tolerado, porque para la observación o detección del espectro, sólo es requerido trabajarlo sobre el plano meridional. La distorsión se ignora ya que la dispersión espectral, en cualquier caso, no es lineal y basta observar la parte central del espectro.

A pesar de que esta configuración es capaz de producir una alta resolución con una apertura numérica alta, la restricción está impuesta por el único espejo que realiza la adaptación óptica, lo cual hace difícil una buena alineación óptica del sistema. Lo que hizo que la configuración Ebert-Fastie sea descartada en favor del montaje de Czerny-Turner, en la mayoría de los diseños comerciales.

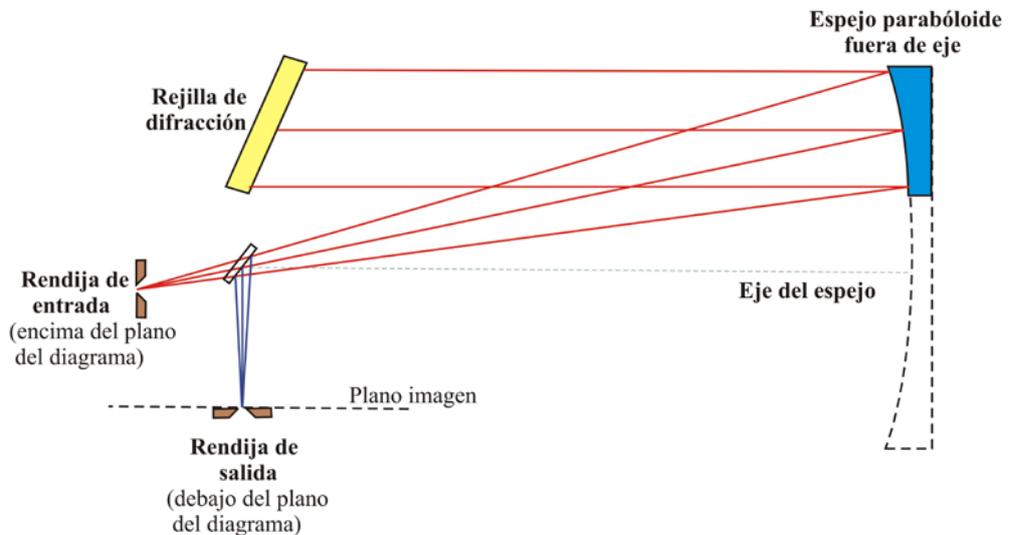
En la figura 2.9 se puede observar que la configuración Ebert-Fastie sólo utiliza efectivamente dos partes del espejo, ya que no puede haber una superposición entre los haces de luz de entrada y salida. Es por este motivo que le colocaron una máscara en el centro de la apertura para evitar que la luz no dispersada (por la rejilla de difracción) llegue al detector. Esto reduce al equipo, esencialmente a la misma configuración de Czerny-Turner y el Ebert-Fastie ya no será considerado en adelante.



**Figura 2.9 Esquema de un espectrómetro de configuración Ebert-Fastie.**

### 2.3.3 CONFIGURACIÓN LITTROW

La principal aplicación de esta configuración es la de un monocromador que genera una imagen libre de aberraciones a partir de una pequeña rendija de entrada recta y un espejo parabólico fuera de eje.



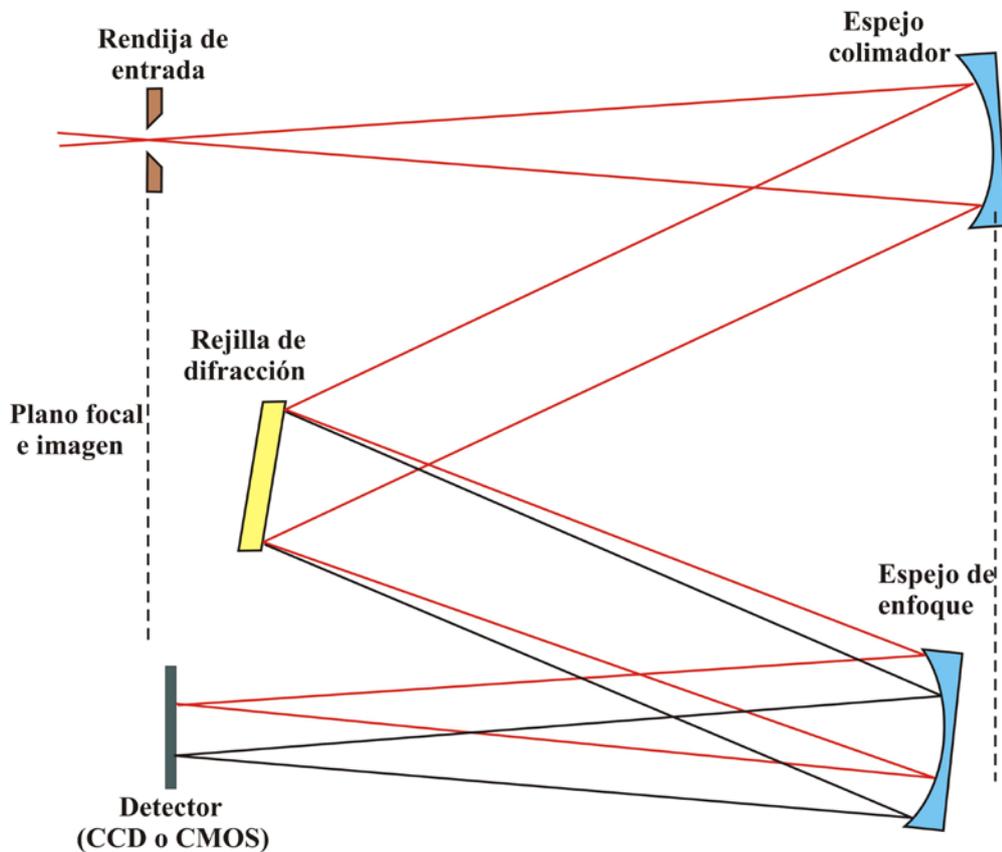
**Figura 2.10** Esquema de un monocromador de configuración Littrow.

El esquema de la configuración Littrow se muestra en la figura 2.10, donde la dispersión es perpendicular al plano de la figura, y el espectro está formado junto a la rendija de entrada. La mayor desventaja de esta configuración es la necesidad de un espejo parabólico fuera de eje, lo que implica un espejo excesivamente grande y pesado o tener un espejo reducido por corte. Entonces existe la posibilidad de distorsión de la superficie, debida al proceso de corte, y por consiguiente la pérdida de resolución. Este es un punto de discusión con el fabricante del espejo.

### 2.3.4 CONFIGURACIÓN CZERNY-TURNER

Esta configuración se muestra en la figura 2.11 y es el arreglo más popular en espectrómetros que utilizan una rejilla de difracción plana. Los dos espejos son usados con los rayos principales fuera de eje, y consecuentemente se genera aberración coma en el haz de luz entrante. Si hubiera un espejo plano en el lugar de la rejilla de difracción, la luz se reflejaría hacia el segundo espejo, la coma sería exactamente corregida, quedando sólo la aberración esférica y astigmatismo al final del haz convergente.

Sin embargo, después de la difracción el haz colimado saliente es más amplio, así que si el sistema está hecho simétricamente (como muchos de los espectrómetros hechos), la coma es corregida parcialmente. No obstante para un f-número de  $f/12 - f/16$  se obtiene resoluciones satisfactorias para diversos propósitos.



**Figura 2.11 Esquema de un espectrómetro de configuración Czerny - Turner.**

En el espectrómetro Czerny Turner la rejilla debe ser inclinada normalmente hacia el lado del haz de luz entrante. Esta es una precaución elemental, porque la salida del haz de luz es más estrecha y permite mayor longitud del espectro a ser enfocado por el diámetro de un determinado espejo.

Con la configuración estándar del Czerny Turner, se tiene parámetros de diseño que son libres de modificar, los cuales son necesarios para garantizar un mejor rendimiento. Una regla general en el diseño de esta configuración, es mantener los ángulos (de los espejos) fuera de eje lo menor posible acorde con la longitud del espectro que será registrado, y a lograr que los rayos principales de entrada y salida

sean paralelos entre sí. Esta última condición simplifica enormemente el detalle práctico de diseño y la construcción del instrumento.

Una nota de precaución es necesaria en el último punto. Debe haber suficiente margen (espacio) entre los distintos haces de luz (reflejados, dispersados) a permitir que se propaguen libremente. Los intentos de ahorrar espacio doblando el camino óptico con espejos planos pueden comprometer esta función y es demasiado importante para ser ignorado. Por esta misma razón, el llamado montaje “Czerny-Turner de geometría cruzada” ha de ser considerado con mucho cuidado.

Con la configuración Czerny Turner es posible lograr una alineación de la óptica, ya que los espejos (colimador y de enfoque) tiene más grados de libertad<sup>3</sup> y una mayor flexibilidad.

## **2.4 ACOPLAMIENTO ÓPTICO A UN ESPECTRÓMETRO O MONOCROMADOR CON REJILLAS DE DIFRACCIÓN PLANAS**

Muchas veces al ingresar la luz (floreescencia, fosforescencia, etc.) por la rendija de entrada de un monocromador o un espectrómetro, se observa que la apertura numérica (AN) del haz de luz entrante (directamente o a través de una fibra óptica) es mayor que la apertura numérica del instrumento (monocromador o espectrómetro). Esto genera luz parásita que llega a producir falsas medidas.

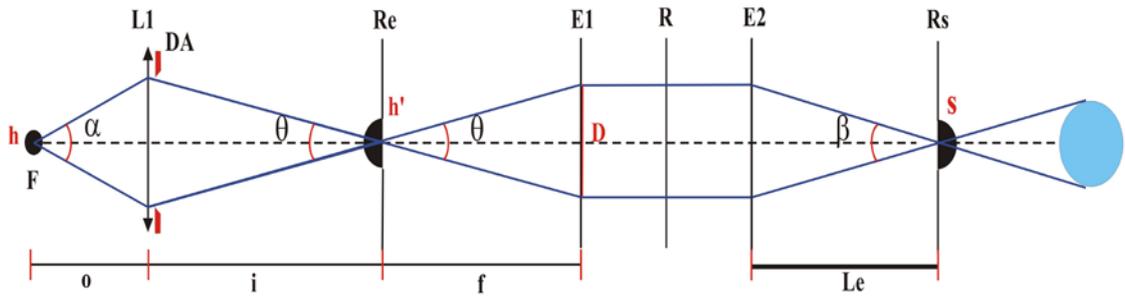
En caso que la apertura numérica del haz entrante sea menor que la del instrumento, habrá poca luz y el instrumento no será aprovechado óptimamente.

Para evitar estos dos casos (AN mayor o menor al del instrumento) se usa un sistema óptico de acoplamiento a la apertura numérica del instrumento. Puede usarse un sistema de lentes, una fibra óptica de AN adecuada, u otro sistema óptico. En la figura 2.12 se muestra un esquema del sistema óptico de acoplamiento a la apertura numérica de un monocromador. La ecuación (2.8) y (2.9) muestra el cálculo para hallar las

---

<sup>3</sup> Los espejos de una configuración Czerny Turner tienen mayor grados de libertad que el espejo de una configuración Ebert-Fastie<sup>[5]</sup>.

distancias de acoplamiento del sistema óptico de acuerdo a las aperturas numéricas de la fuente de luz y del instrumento.



**Figura 2.12 Esquema del acoplamiento del sistema óptico a un monocromador Czerny -Turner.**

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (2.8)$$

$$M = \sqrt{\frac{h'}{h}} = \frac{f/\#_I}{f/\#_F} = \frac{AN_F}{AN_I} = \frac{i}{o} \quad (2.9)$$

Donde:

$f_1$ : distancia focal de la lente L1.

$f$ : distancia focal del espejo colimador.

$o$ : distancia objeto de la lente L1 (distancia entre la fuente de luz y la lente).

$i$ : distancia imagen de la lente L1 (distancia entre la lente y la rendija de entrada).

$h'$ : tamaño de la imagen producida por la lente L1. Al acoplar el sistema óptico esta debe ser el tamaño de la rendija de salida.

$h$ : tamaño del objeto para la lente L1. Es igual al tamaño de la fuente de luz.

$f/\#_I$ : f-número del espectrómetro o monocromador (instrumento).

$f/\#_F$ : f-número de la fuente de luz.

$AN_I$ : apertura numérica del espectrómetro o monocromador (instrumento). Definido por la ecuación 1.9.

$AN_F$ : apertura numérica de la fuente de luz.

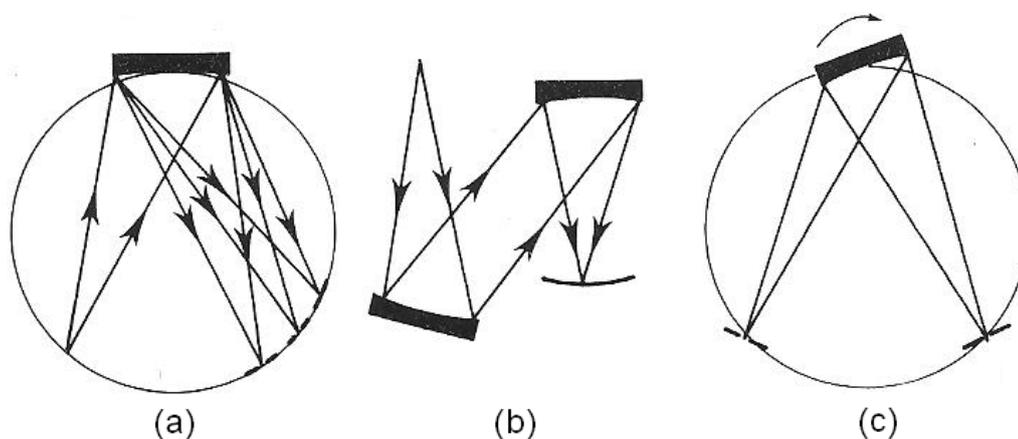
## 2.5 CONFIGURACIONES ÓPTICAS DE MONOCROMADORES Y ESPECTRÓMETROS CON REJILLAS DE DIFRACCIÓN CÓNCAVAS

La ecuación 1.9 describe la relación entre una fuente puntual y su imagen en el plano meridional formado por una rejilla cóncava. La primera solución que corresponde a la configuración del círculo de Rowland es cuando se cumple:  $r_1 = R \cos \alpha$ ,  $r_2 = R \cos \beta$ .

Pero hay otras formas que cumplen con la condición del círculo de Rowland, y algunas de ellas se muestran en la figura 2.13. El montaje más simple de todos es el de **Paschen-Runge** (figura 2.13.a), en que la rendija de entrada es ubicada en el círculo de Rowland y el detector es construido de tal forma que se ajuste al círculo de Rowland. Pero no todo el espectro se encuentra ubicado en el círculo de Rowland, sólo se enfoca una porción (la que es de interés según la aplicación requerida). Esta configuración es conveniente para análisis de rutina en muestras de metales y aleaciones.

Otra solución para la ecuación 1.9 la cumple el montaje de **Wadsworth** (figura 2.13.b), en que la luz incidente es colimada, así que el valor de  $r_1$  es infinito y la ecuación es reducida a la ecuación 2.10.

$$r_2 = \frac{R \cos^2 \beta}{\cos \alpha + \cos \beta} \quad (2.10)$$



**Figura 2.13 Montajes con rejillas cóncavas: (a) Paschen-Runge, (b) Wadsworth, (c) Seya-Namioka.**

Una característica de este montaje es que el astigmatismo es cero cuando la imagen es formada en el centro de la rejilla (por ejemplo cuando  $\beta=0$ ). Este montaje es usualmente usado para aplicaciones en que la luz incidente es naturalmente colimada (por ejemplo: en satélites astronómicos, espectroheliografía, en trabajos usando radiación sincrotrónica). Sin embargo, si la luz no es naturalmente colimada el montaje Wadsworth requiere de un espejo colimador, cuya desventaja es que habrá pérdidas por reflexión.

No todos los montajes con rejillas cóncavas son soluciones de la ecuación 1.9, pues en algunos casos las ventajas pueden ser compensadas por un cierto defecto de enfoque. Un caso particular de este efecto es el montaje de Seya-Namioka (figura 2.13.c), en que la rendija de entrada y salida se mantienen fijas, mientras que el espectro es escaneado por una simple rotación de la rejilla. La gran ventaja de este montaje es su simplicidad para armarlo, y es ampliamente usado en trabajos que requieren una resolución media. Seya llegó a encontrar que este montaje era optimizado para un ángulo formado entre la rendija de entrada y salida (con la rejilla cóncava) igual a  $70^{\circ}15'$ .

## 2.6 ABERRACIONES EN ESPECTRÓMETROS Y MONOCROMADORES

Las aberraciones más comunes en espectrómetros y monocromadores que utilizan rejillas de difracción plana y una configuración Czerny Turner son: la aberración esférica, aberración de astigmatismo, coma, y curvatura de campo.

Estas aberraciones son minimizadas optimizando un método de fabricación de los espejos y la rejilla de difracción, siendo esta última la de mayor interés en su investigación. Varios de los métodos para disminuir las aberraciones han sido investigados por M. V. R. K. Murty, algunos se describen a continuación:

**La aberración esférica** puede minimizarse con una elección adecuada:

- i. del f-número.
- ii. de los radios de curvatura de los espejos para colimar y enfocar respectivamente.

**La aberración de astigmatismo** puede minimizarse:

- i. usando pequeños ángulos fuera de eje en los espejos cóncavos.

**La aberración coma** puede eliminarse para una longitud de onda:

i. seleccionando dos espejos cóncavos que tienen radios de curvaturas ligeramente diferentes o al darle diferentes ángulos fuera de eje.

**La curvatura de la superficie del espectro** puede ser controlada por:

i. la elección apropiada de la posición de la rejilla de difracción con respecto a la superficie del espejo de enfoque.

## **2.7 PRECAUCIONES AL UTILIZAR UN ESPECTRÓMETRO O MONOCROMADOR**

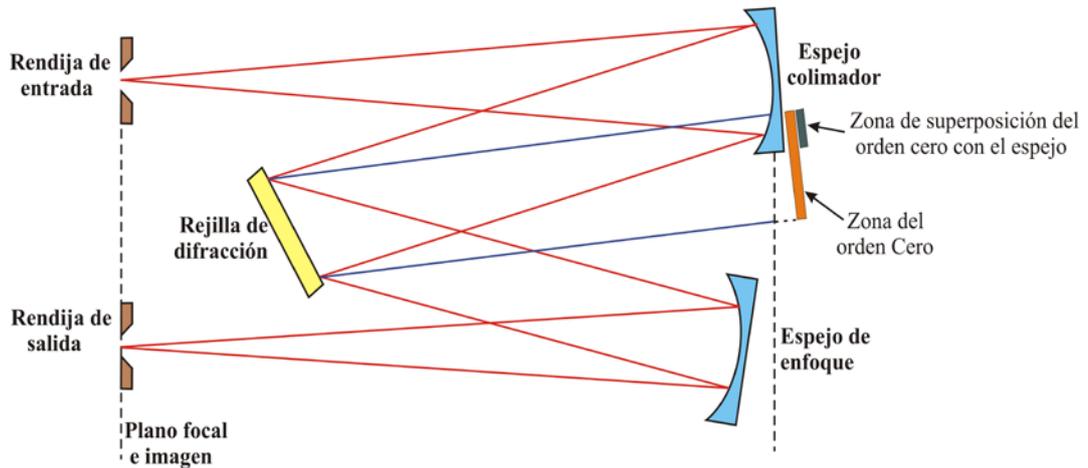
**Luz parásita:** las cubiertas internas de los monocromadores y espectrómetros están pintadas de color negro para que la luz no deseada (luz parásita) se atenúe rápidamente y no ingrese a la rejilla de difracción o a otro elemento óptico. En caso que la luz no deseada llegue a la rejilla esta puede llegar a la salida del monocromador o espectrómetro y dar una falsa medida. Esta luz parásita se genera por la dispersión de la luz en los bordes de los espejos o rejillas, también se genera cuando la apertura numérica de la luz que pasa por la rendija de entrada es mayor a la apertura numérica del monocromador o espectrómetro.

En muchos espectrómetros y monocromadores actuales se utilizan trampas ópticas (cavidades curvadas) en sus paredes interiores, para atenuar la luz parásita.

**Superposición de órdenes de difracción:** hay que tener cuidado con la dispersión de la luz por la rejilla de difracción en órdenes diferentes al que se trabaja en el instrumento, esto se explica con detalle en la sección 1.1.5 (rango espectral libre). Ya que a la hora de tomar medidas en un rango espectral, hay que considerar las longitudes de onda (diferentes a las que se quiere registrar) de órdenes superiores (segundo, tercero) que salgan bajo el mismo ángulo, y que lleguen al detector dando una falsa medida.

**Dispersión del orden cero:** hay casos en que la luz dispersada por rejilla en órdenes superiores al primero no presentan superposición con el rango espectral del orden uno (o menos uno). Pero el orden cero o el orden menos uno (o uno) pueden reflejarse sobre

el espejo colimador y producir una dispersión no deseada sobre la rejilla y obtener una respuesta falsa a la salida del instrumento, tal como se muestra en figura 2.14.



**Figura 1.21 Superposición del haz incidente con el orden cero para un monocromador Czerny -Turner.**

## 2.8 CRITERIOS DE ELECCIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO O MONOCROMADOR

Para elegir el espectrómetro o monocromador adecuadamente, lo primero que se debe tener en cuenta es la aplicación que se le va a dar. Sabiendo la aplicación del instrumento se sugiere tener en cuenta cuatro criterios a seguir.

**Primer criterio:** La dispersión lineal, la resolución y el bandpass / rango espectral.

La dispersión lineal (ver ecuación 1.4) indica la capacidad de dispersar la luz y se determina eligiendo la rejilla de difracción y la distancia focal del espejo de enfoque. La cual determina el rango espectral del espectrómetro o el bandpass (ver ecuación 2.6) del monocromador. La resolución requerida se determinará eligiendo la rejilla y la rendija de entrada adecuadamente (espectrómetro).

**Segundo criterio:** La precisión y velocidad.

La precisión y velocidad en un monocromador lo determina el motor a pasos que controla la rejilla de difracción y el detector, mientras que en el espectrómetro lo determina el CCD y su electrónica.

**Tercer criterio:** Rendimiento y calidad de imagen.

El rendimiento óptico del espectrómetro o monocromador lo determina la apertura numérica y su dispersión lineal. La calidad de la imagen va depender de la manufactura óptica de los espejos y la rejilla de difracción. En espectrómetros modernos se usan superficies toroidales en espejos y/o rejillas para corregir el astigmatismo.

**Cuarto criterio:** Luz parásita, diseño y longitud focal.

La luz parásita puede ser controlada de acuerdo a la calidad de la óptica del instrumento y las trampas ópticas que contenga el diseño mecánico interno de construcción. Cuando la luz parásita tiene una intervención importante en la aplicación es conveniente usar un espectrómetro o monocromador de mayor distancia focal. El diseño óptico a elegir determinará también el tamaño del instrumento, los espectrómetros y monocromadores más grandes y comerciales utilizan la configuración asimétrica Czerny-Turner. Mientras que los instrumentos más pequeños usan la configuración asimétrica tipo V.

## **2.9 CALIBRACIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO O MONOCROMADOR**

Luego del alineamiento óptico del espectrómetro o monocromador para una rendija de entrada y un sistema óptico de acoplamiento elegido adecuadamente, se procede a calibrar el instrumento, como se describe a continuación.

2.9.1 Se utiliza una fuente de luz con líneas espectrales (por lo menos dos líneas monocromáticas) bien definidas y conocidas por alguna base de datos.

2.9.2 Se dirige esta luz a la entrada del espectrómetro o monocromador para que sea registrado su espectro.

2.9.3.a **Caso del espectrómetro:** sabiendo la relación matemática que existe entre la posición de cada píxel del CCD o CMOS (detector lineal) con la dispersión lineal de la rejilla de difracción, se identifica las líneas atómicas del espectro captado y se halla las constantes para la relación matemática.

2.9.3.b **Caso del monocromador:** sabiendo la relación matemática que existe entre la variación de la longitud de onda con el ángulo de giro del elemento dispersivo (rejilla de difracción), se identifica las líneas atómicas del espectro captado y se halla las constantes para la relación matemática.

Se sabe que la respuesta espectral en conjunto del monocromador y del detector usado no es plana, ya que la eficiencia de cualquiera de ellos no es la misma para todas las longitudes de onda. Para normalizar la intensidad que registra el detector en el instrumento se siguen los siguientes pasos.

2.9.4 Buscar una o varias fuentes de respuesta espectral conocida, de tal forma que cubra todo el rango espectral del instrumento. Esto quiere decir, que la intensidad de la(s) fuente(s) en función de la longitud de onda debe ser conocida de alguna base de datos de fuentes, como las lámparas de tungsteno y deuterio.

2.9.5 Registrar el espectro de esta(s) fuente(s) de luz con el monocromador o espectrómetro. Luego buscar la transformación matemática correspondiente para obtener la misma respuesta espectral de la base de datos, y luego aplicarla a la respuesta del detector utilizado en el instrumento.

2.9.6 Medida de la resolución del instrumento: luego de calibrar el instrumento de registra el espectro de una fuente monocromática conocida, como la del láser He-Ne. Se mide el ancho de la línea espectral monocromática (en manómetros) a la altura media de su intensidad (FWHM), y se estima la resolución del monocromador o espectrómetro como la mitad del FWHM.

# CAPITULO 3

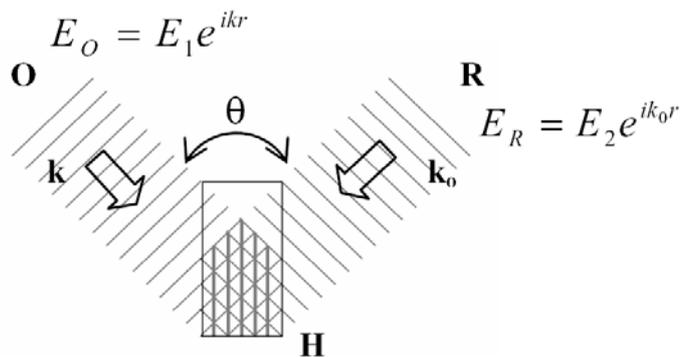
## INTERFERENCIA DE ONDAS PLANAS

### 3.1 INTERFERENCIA DE ONDAS PLANAS SOBRE UNA EMULSIÓN FOTSENSIBLE

La holografía es una técnica que permite grabar la información tridimensional de los objetos. El registro de un holograma se realiza sobre una emulsión fotosensible y es debido a la interferencia de dos ondas, una de ellas la llamaremos onda de referencia y la otra será la onda objeto. La onda objeto se forma al iluminar el objeto con luz proveniente de un láser, esta onda lleva la información tridimensional del objeto. La onda de referencia será luz proveniente del mismo láser expandida que llega directamente sobre la película fotosensible. La interferencia de estas ondas se produce sobre la emulsión fotosensible durante el registro.

Para el registro de un holograma de reflexión la onda de referencia y la onda objeto inciden sobre la placa fotosensible en direcciones opuestas. La mayor ventaja de los hologramas de reflexión es que se puede reconstruir una onda imagen monocromática a partir de una iluminación con luz blanca.

En este trabajo nos interesa grabar una red de difracción holográfica, para poder caracterizar la calidad de la emulsión fotosensible. Por simplicidad analizaremos la interferencia de dos haces planos proporcionados por un láser (Figura 3.1).



**Figura 3.1 Interferencia de dos ondas planas que se desplazan hacia lados opuestos para crear un holograma de reflexión.**

Donde:

O: onda objeto      R: onda de referencia

H: emulsión fotosensible donde se registra la interferencia de las ondas planas.

k: vector de onda objeto ( $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ )       $k_0$ : vector de onda de referencia

$\theta$ : ángulo entre los haces de ondas planas que interfieren sobre la emulsión.

La intensidad de la onda resultante que interfiere sobre la emulsión, se determina a través del cuadrado de la amplitud de la suma de las ondas objeto y de referencia. Esta intensidad resultante se describe en la ecuación 3.1.

$$\begin{aligned} |\mathbf{E}|^2 &= |\mathbf{E}_1 e^{ikr} + \mathbf{E}_2 e^{ik_0 r}|^2 \\ |\mathbf{E}|^2 &= \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \cos[(k_0 - k) \cdot r] \end{aligned} \quad (3.1)$$

La condición para valores máximos de  $E^2$  se describe en la ecuación 3.2.

$$(k_0 - k) \cdot r = 2\pi m \quad (3.2)$$

Donde  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

La ecuación 3.2 representa un sistema de planos perpendiculares al vector  $\mathbf{k} - \mathbf{k}_0$ . La distancia  $d$  entre los planos satisface la ecuación 3.3

$$|k_0 - k| d = 2\pi \quad (3.3)$$

Considerando que  $|k| = |k_0|$ , se obtiene:

$$|k_0 - k| = 2k \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.4)$$

Reemplazando la ecuación 3.4 en la ecuación 3.2, se obtiene el siguiente resultado:

$$d = \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.5)$$

Si tomamos en cuenta el índice de refracción  $n$  la ecuación 3.5 tomaría la siguiente expresión:

$$d = \frac{\lambda}{2n \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.6)$$

En particular cuando dos ondas que vienen en direcciones opuestas ( $\theta = \pi$ ) interfieren, los planos de máximo oscurecimiento son paralelos a los frentes de onda que interfieren. Entonces la distancia entre planos sería  $d = \frac{\lambda}{2n}$ .

# **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

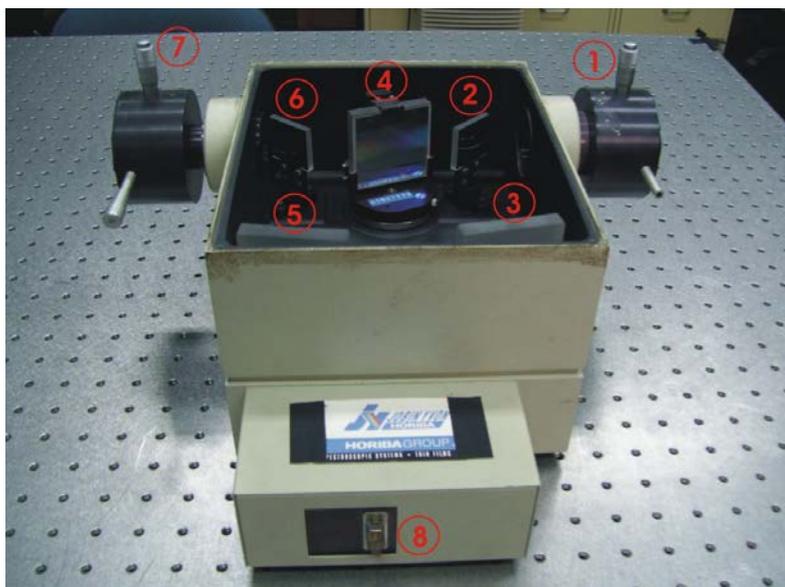
## CAPITULO 4

# CARACTERIZACIÓN DE MONOCROMADORES Y OPTIMIZACIÓN

En esta sección se caracteriza y optimiza el funcionamiento de un monocromador **Jobin Yvon H-25** tipo Czerny-Turner a través de la simulación óptica, cálculos de sus parámetros ópticos, la automatización y su calibración. Así también se caracteriza el funcionamiento de un monocromador **Mc-Pherson 272** tipo Seya-Namioka a través de la simulación óptica.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MONOCROMADOR CZERNY-TURNER JOBIN YVON (JY) H-25

El laboratorio de Óptica de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) cuenta con un monocromador Czerny-Turner de **JOBIN YVON H-25** que fue entregado en donación<sup>4</sup> y sin manual alguno, es por este motivo que se ha tenido que caracterizar (medición de los parámetros principales) el monocromador. En la figura 4.1 se muestra una fotografía del monocromador, cuyos parámetros se describen a continuación.

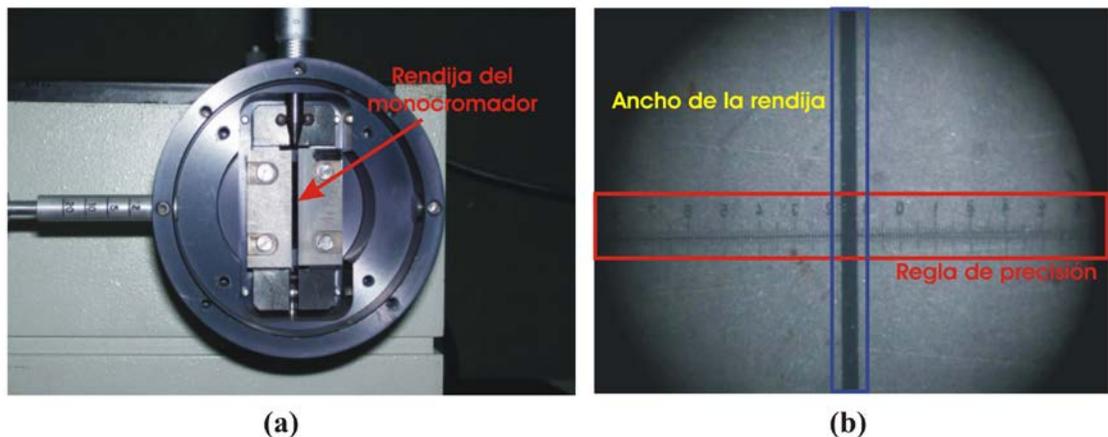


**Figura 4.1** Fotografía del monocromador **JOBIN YVON H-25**, las partes enumeradas de rojo se especifican debajo de la figura.

<sup>4</sup> La donación del monocromador JY H-25 fue hecha en la I Escuela Andina de Espectroscopia del 2005 y entregada por el Dr. François Piuzzi (Atomic Energy Commission, Francia).

- 1: Rendija de entrada
- 2: Espejo plano
- 3: Espejo esférico de distancia focal igual a 25 cm
- 4: Rejilla de difracción
- 5: Espejo esférico de distancia focal igual a 25 cm
- 6: Espejo plano
- 7: Rendija de salida
- 8: Puerto serial para controlar el motor que gira la rejilla de difracción

**i. Rendijas de entrada y salida:** estas rendijas pueden variar su ancho por medio de un micrómetro (girando una perilla manualmente). La variación del ancho de las rendijas no es directamente proporcional a la lectura del micrómetro, pero si es linealmente dependiente. Esta relación se determinó mediante la variación de la lectura de la perilla con la medida física que se obtuvo con una regla (con precisión de 50  $\mu\text{m}$ ) y un microscopio. La figura 4.2 muestra una fotografía de la experiencia y los resultados de la calibración se muestran en la figura 4.3.



**Figura 4.2. (a) Rendija del monocromador JOBIN YVON H-25, (b) rendija del monocromador vista con un microscopio 15X.**

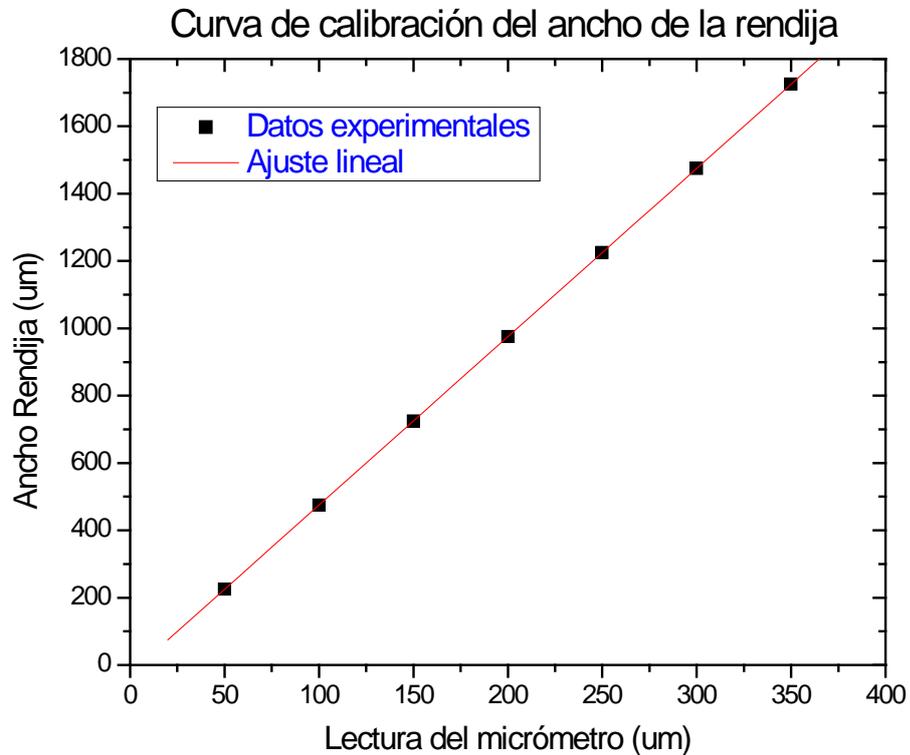
La ecuación (4.1) muestra la relación linealmente dependiente entre la lectura del micrómetro y el ancho de la rendija. Esta ecuación fue obtenida del ajuste lineal de la curva de calibración que se muestra en la figura 4.3.

$$W_R = 5L_M - 25 \quad (4.1)$$

$W_R$ : ancho de la rendija de entrada o salida en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ).

$L_M$ : lectura del micrómetro ( $\mu\text{m}$ ).

De acuerdo al máximo giro de la perilla del micrómetro y la curva de calibración de la figura 4.3, se tiene que el ancho de las rendijas (entrada o salida) pueden variar desde 0 hasta 1800  $\mu\text{m}$  con una precisión de 5  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.3 Gráfico de la curva de calibración de la rendija (entrada o salida) del monocromador JOBIN YVON H-25.**

ii. **f-número (f/#)**: este parámetro está definido por la ecuación (4.5), para calcularlo se ha utilizado los datos del monocromador.

f: distancia focal

D: diámetro del espejo

$$f = 250\text{mm}$$

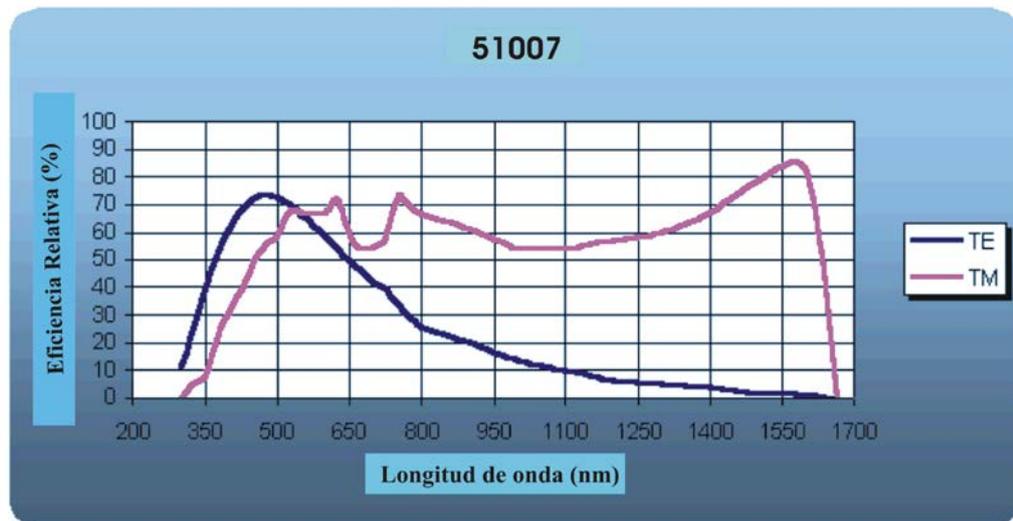
$$D = 58\text{mm}$$

Por lo tanto:  $f/\# = f/2,2$

iii) **Rejilla de difracción:** La rejilla de difracción que posee el monocromador H-25 tiene una densidad lineal de 1200 líneas/mm. En la tabla 4.1 se encuentran las características de la rejilla. La eficiencia de la rejilla en relación a la longitud de onda está dada por las curvas de la figura 4.4.

**Tabla 4.1 Parámetros característicos de la rejilla de difracción 51007.**

<b>Serial y Tipo</b>	510 07 –Rejilla de difracción plana hecha mecánicamente.			
<b>Tamaño</b>	58x58x10 mm			
<b>Densidad (líneas/mm)</b>	<b>Rango espectral (nm)</b>	<b>Longitud de onda de Blaze (nm)</b>	<b>Ángulo de Blaze (°)</b>	<b>Configuración</b>
1200		500	17°27'	Quasi-litrow



**Figura 4.4. Curva de eficiencia relativa para la rejilla de difracción 510 07. Este gráfico ha sido tomado del catálogo de rejillas de JOBIN YVON (JY).**

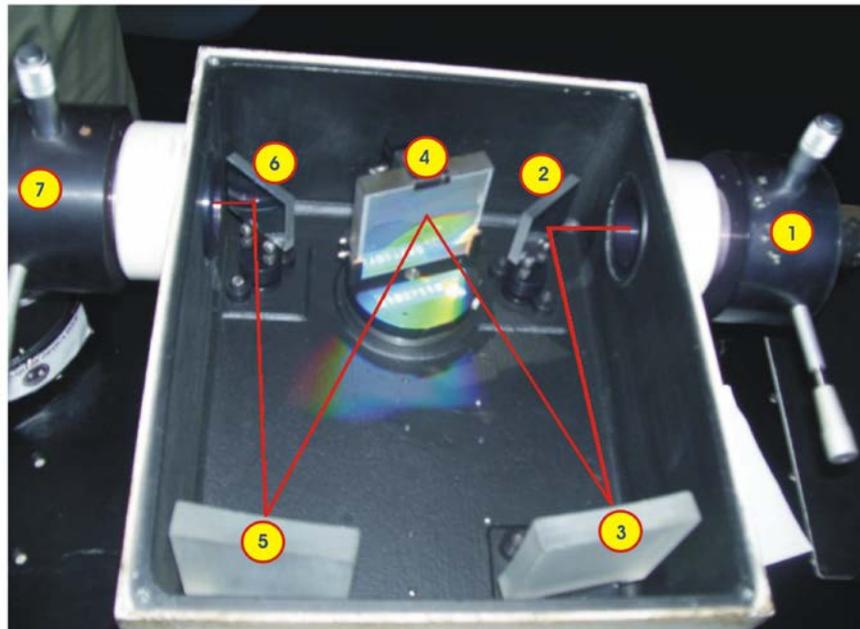
iv) **Dispersión y resolución:** estos parámetros pueden variar de acuerdo al ancho de la rendija de entrada y salida, el alineamiento óptico, la óptica, el acoplamiento óptico de entrada, otros. Serán determinados en la sección 4.1.6 de calibración.

En las secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 se describirán la óptica del sistema y se calcularán ciertos parámetros, como el poder de resolución de la rejilla, la dispersión lineal. Luego de conocer la configuración del monocromador, se simulará su sistema óptico utilizando el programa OSLO EDU 6.3.3.

#### 4.1.1 ESQUEMATIZACIÓN DEL SISTEMA ÓPTICO DEL MONOCROMADOR

Las partes del monocromador Czerny Turner Jobin Yvon H-25 se muestran en la figura 4.5, cuyas características se detallan a continuación:

- 1: Rendija de entrada con ancho variable (0 a 1800  $\mu\text{m}$ ), de acuerdo a la ecuación (4.1).
- 2: Espejo plano de dimensiones de 35 x 32 x 5  $\text{mm}^3$ .
- 3: Espejo esférico de  $R_1 = 500$  mm, y de dimensiones de 58 x 58 x 10  $\text{mm}^3$ .
- 4: Rejilla de difracción de 1200 líneas/mm.
- 5: Espejo esférico de  $R_2 = 500$  mm, y de dimensiones de 58 x 58 x 10  $\text{mm}^3$ .
- 6: Espejo plano de dimensiones de 35 x 32 x 5  $\text{mm}^3$ .
- 7: Rendija de salida con ancho variable (0 a 1800  $\mu\text{m}$ ), de acuerdo a la ecuación (4.1).



**Figura 4.5 Foto del monocromador Czerny Turner de Jobin Yvon H-25.**

En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran dos esquemas del monocromador H-25, que muestra la orientación, las distancias (vista desde arriba) y el tamaño de los elementos ópticos (vista lateral). Los elementos de los esquemas se describen a continuación.

$R_E$ : rendija de entrada

$R_D$ : rejilla de difracción

$E_2$ : espejo esférico de radio  $R_1 = 500$  mm

$E_4$ : espejo esférico de radio  $R_2 = 500$  mm

$R_S$ : rendija de salida

$E_1$ : espejo plano

$E_3$ : espejo plano

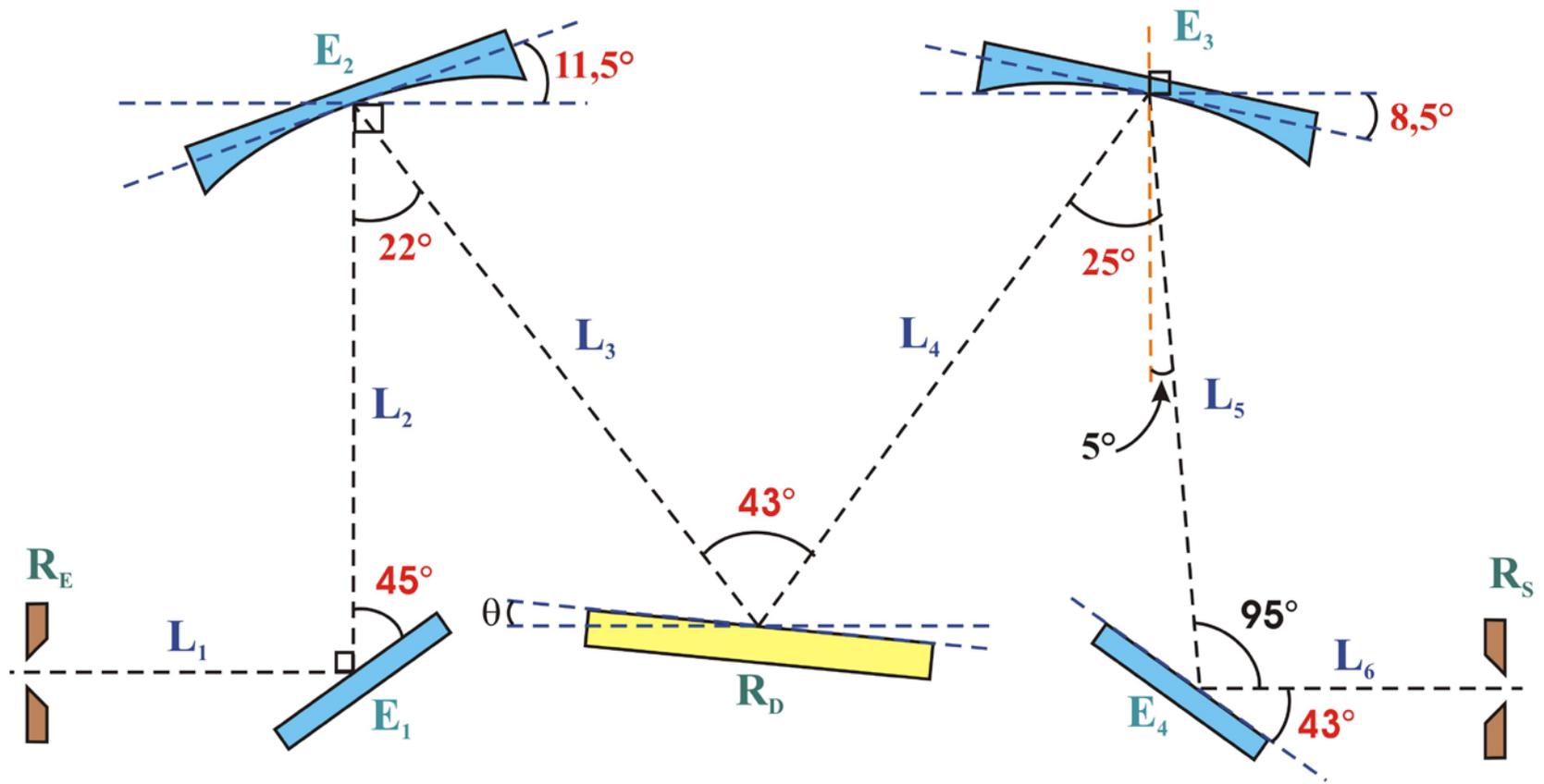


Figura 4.6 Esquema del monocromador Czerny Turner H-25 visto desde arriba.

Donde:

$L_1 = 100 \text{ mm}$

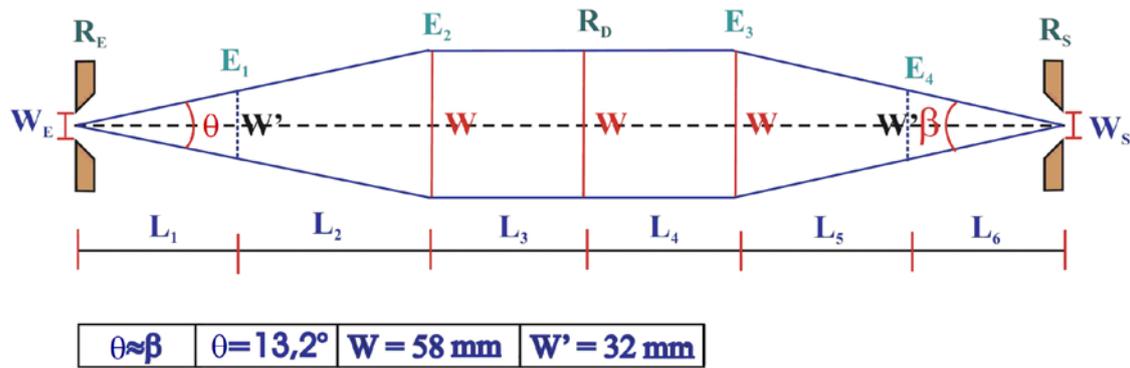
$L_2 = 150 \text{ mm}$

$L_3 = 155 \text{ mm}$

$L_4 = 160 \text{ mm}$

$L_5 = 155 \text{ mm}$

$L_6 = 83 \text{ mm}$



**Figura 4.7** Esquema del monocromador Czerny Turner H-25 desde una vista lateral.

Donde:

$W_E$ : ancho de la rendija de entrada.

$W_S$ : ancho de la rendija de salida.

$W'$ : ancho de los espejos planos.

$W$ : ancho de los espejos esféricos y la rejilla de difracción.

#### 4.1.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ÓPTICO DEL MONOCROMADOR

En esta la simulación se ha tomado los datos del sistema óptico del monocromador, que han sido expuestos en la sección 4.1.1. Para facilitar la simulación no se han colocado los espejos planos, sino solamente los espejos esféricos, cambiando la configuración física pero manteniéndose la óptica del sistema.

En las siguientes figuras se muestra el trazo de rayos de dos configuraciones del sistema óptico del monocromador, y sus respectivos análisis (aberraciones y diagrama de manchas <sup>[6]</sup>). Estos gráficos se han obtenido usando el programa OSLO EDU 6.3.3.

**Sistema óptico M1:** en este sistema se sigue la configuración del gráfico 4.6, modificando la distancia  $L_6$  ligeramente para obtener un diagrama de manchas de menor ancho.

**Sistema óptico M2:** en este sistema se sigue la configuración del gráfico 4.6, modificando los ángulos de los espejos  $E_2$  (de  $11,5^\circ$  a  $12,5^\circ$ ) y  $E_3$  (de  $8,5^\circ$  a  $12,5^\circ$ ). También se modifica la distancia  $L_6$  ligeramente para obtener un diagrama de manchas de menor ancho.

Ambos sistemas ópticos se trabajaron con un ancho en la rendija de entrada de  $25 \mu\text{m}$ .

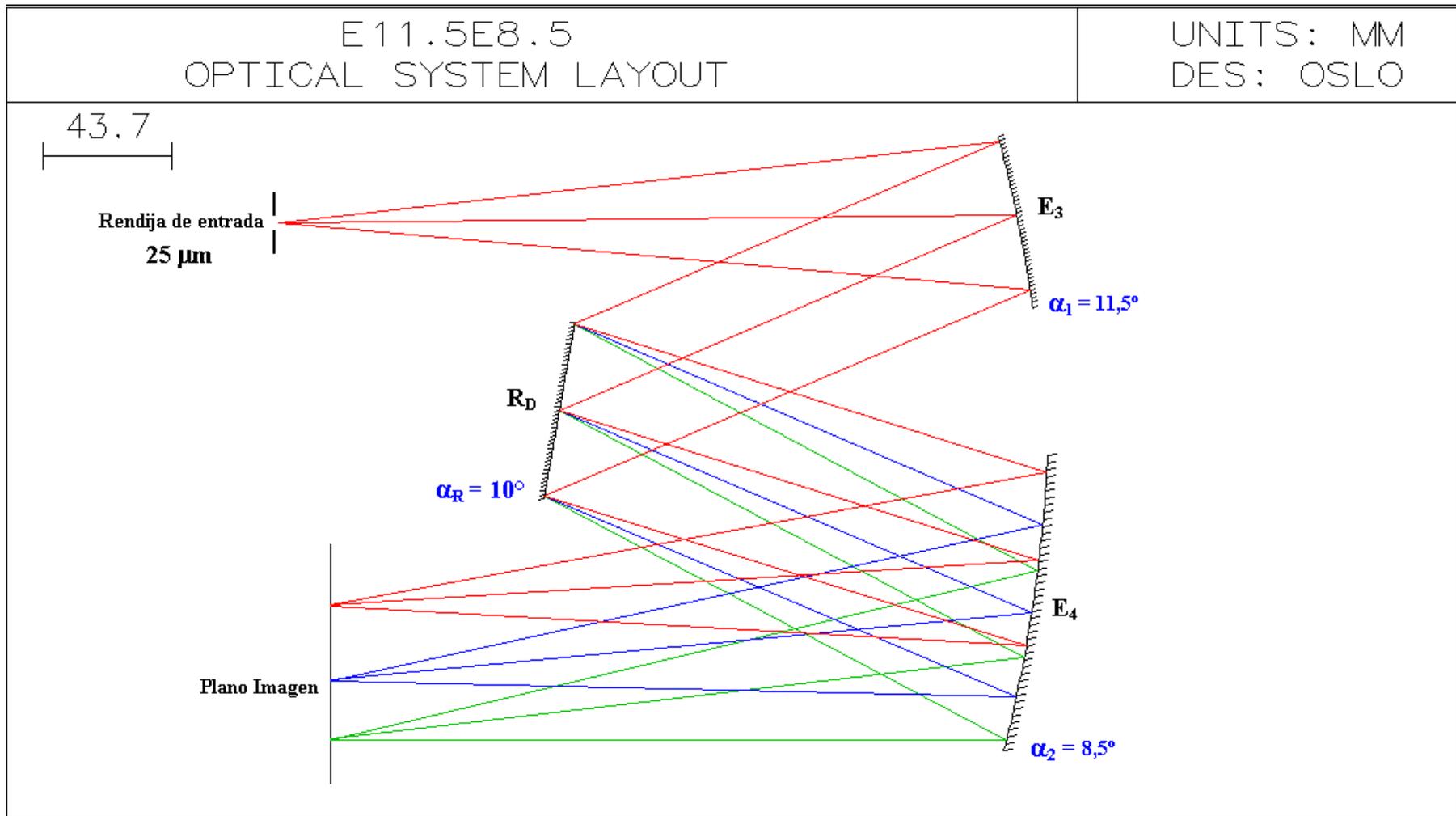
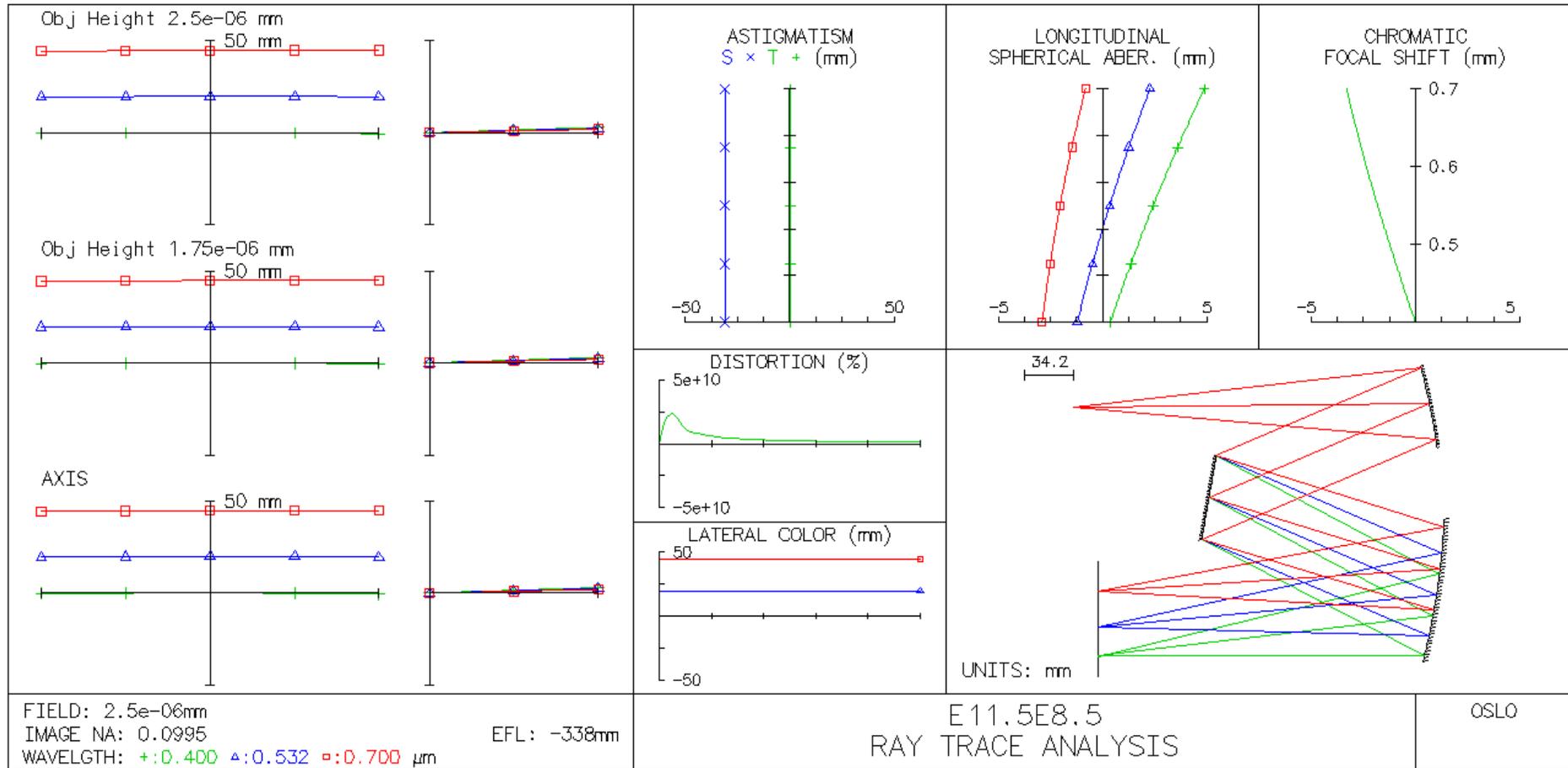
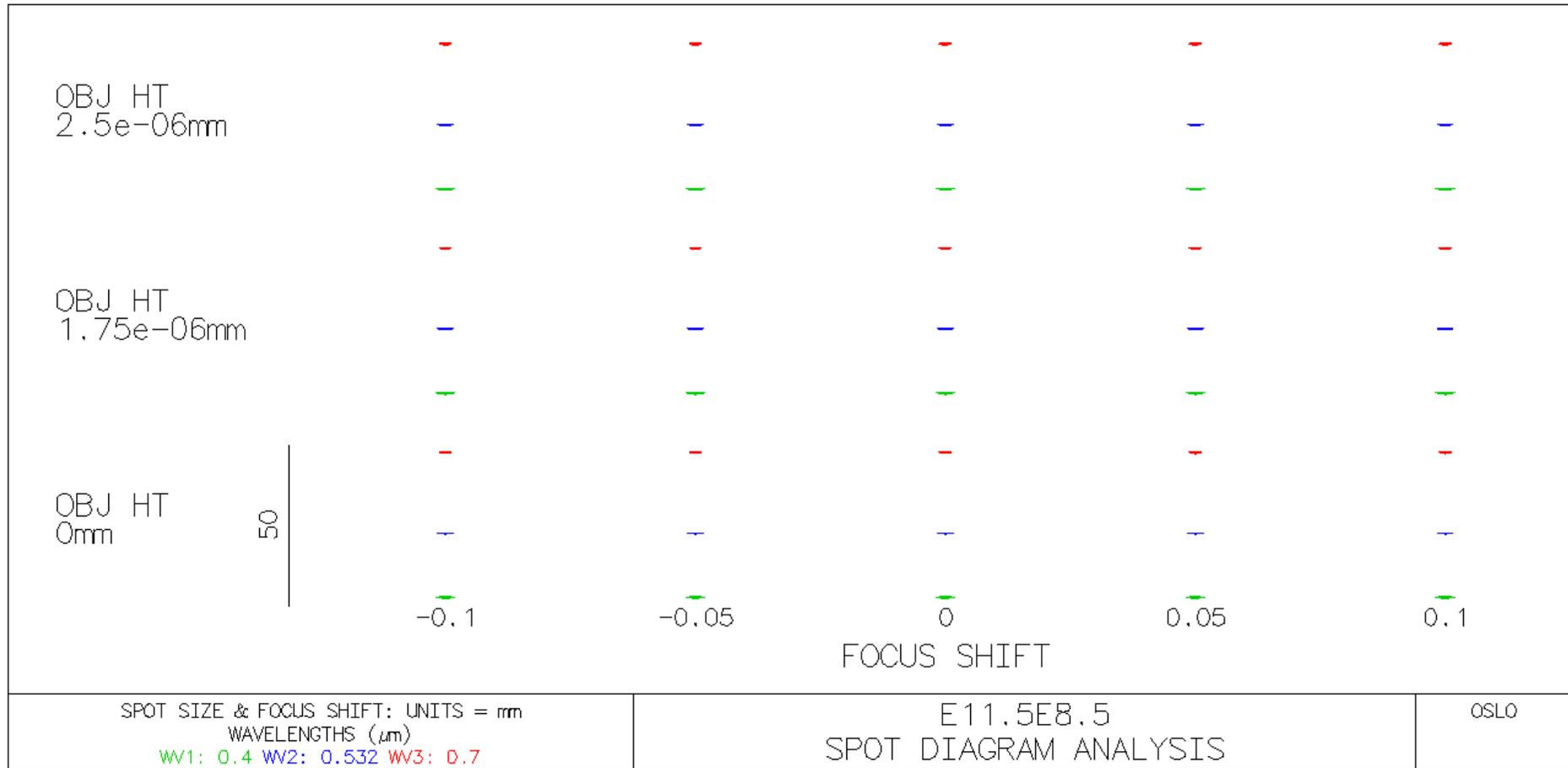


Figura 4.8 Trazo de rayos del sistema óptico M1 del monocromador Czerny Turner H-25, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.



**Figura 4.9** Análisis del trazo de rayos del sistema óptico M1, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.



**Figura 4.10** Análisis del diagrama de manchas (spot) del sistema óptico M1, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.

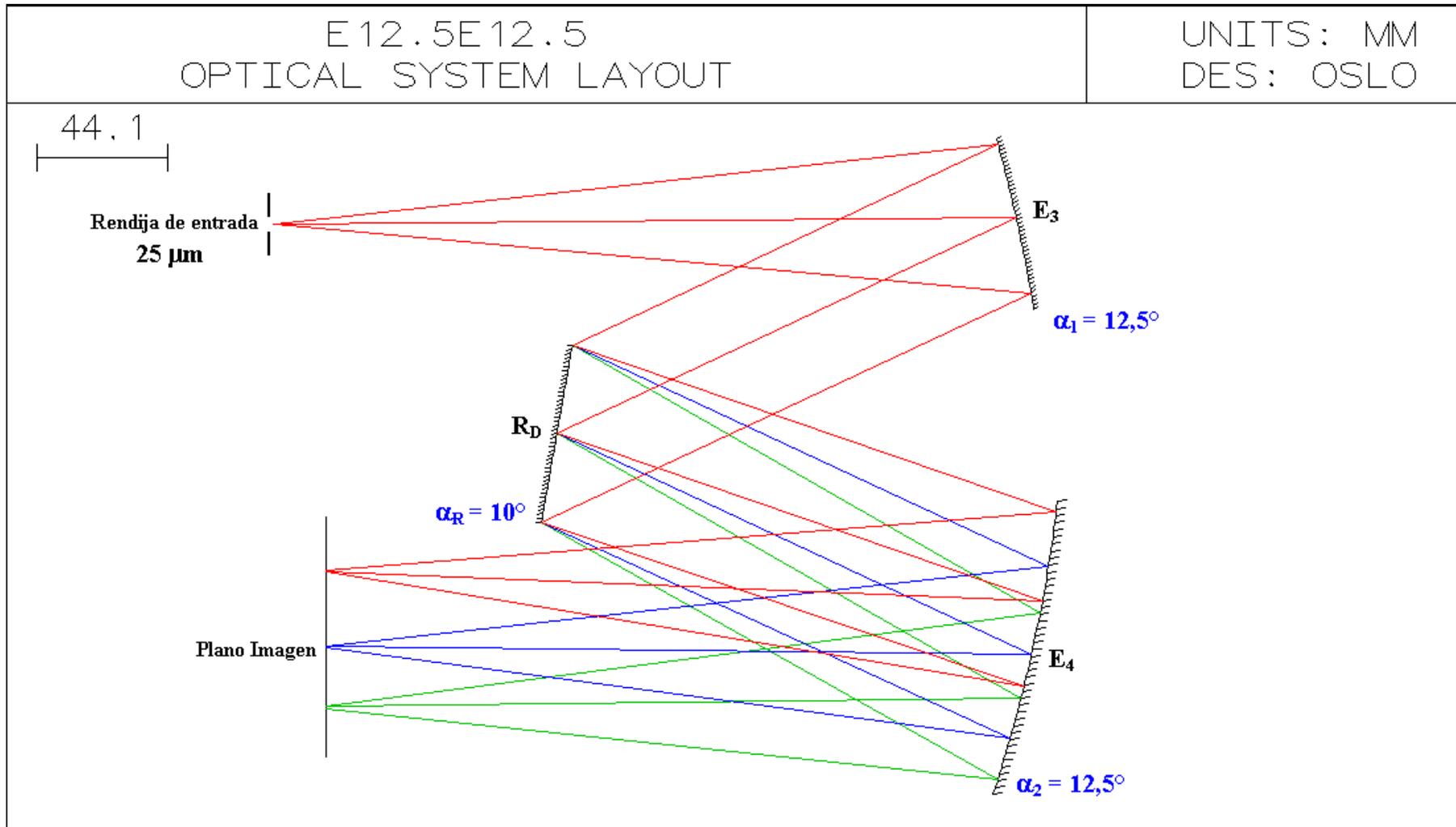


Figura 4.11 Trazo de rayos del sistema óptico M2 del monocromador Czerny Turner H-25, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.

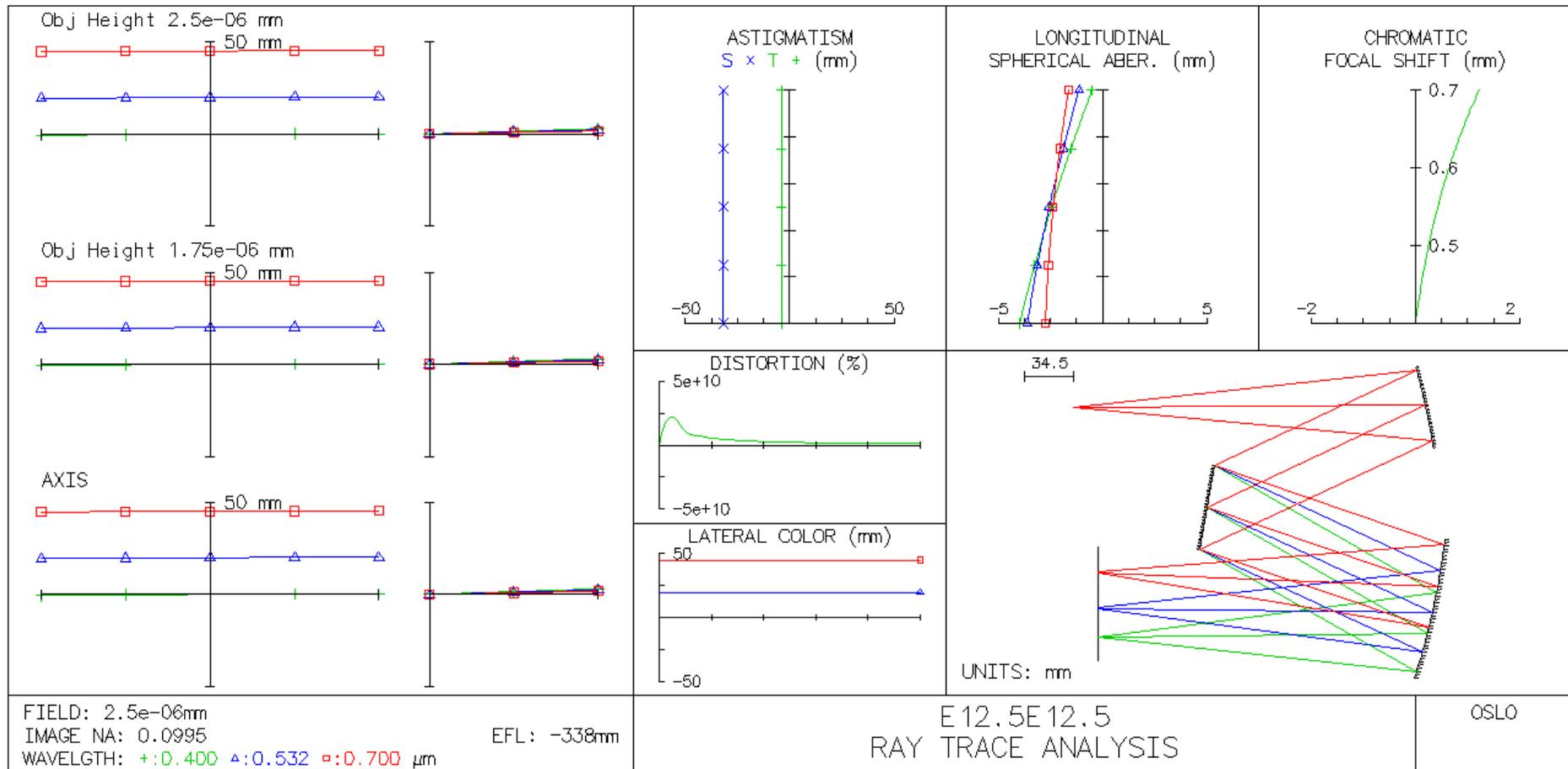
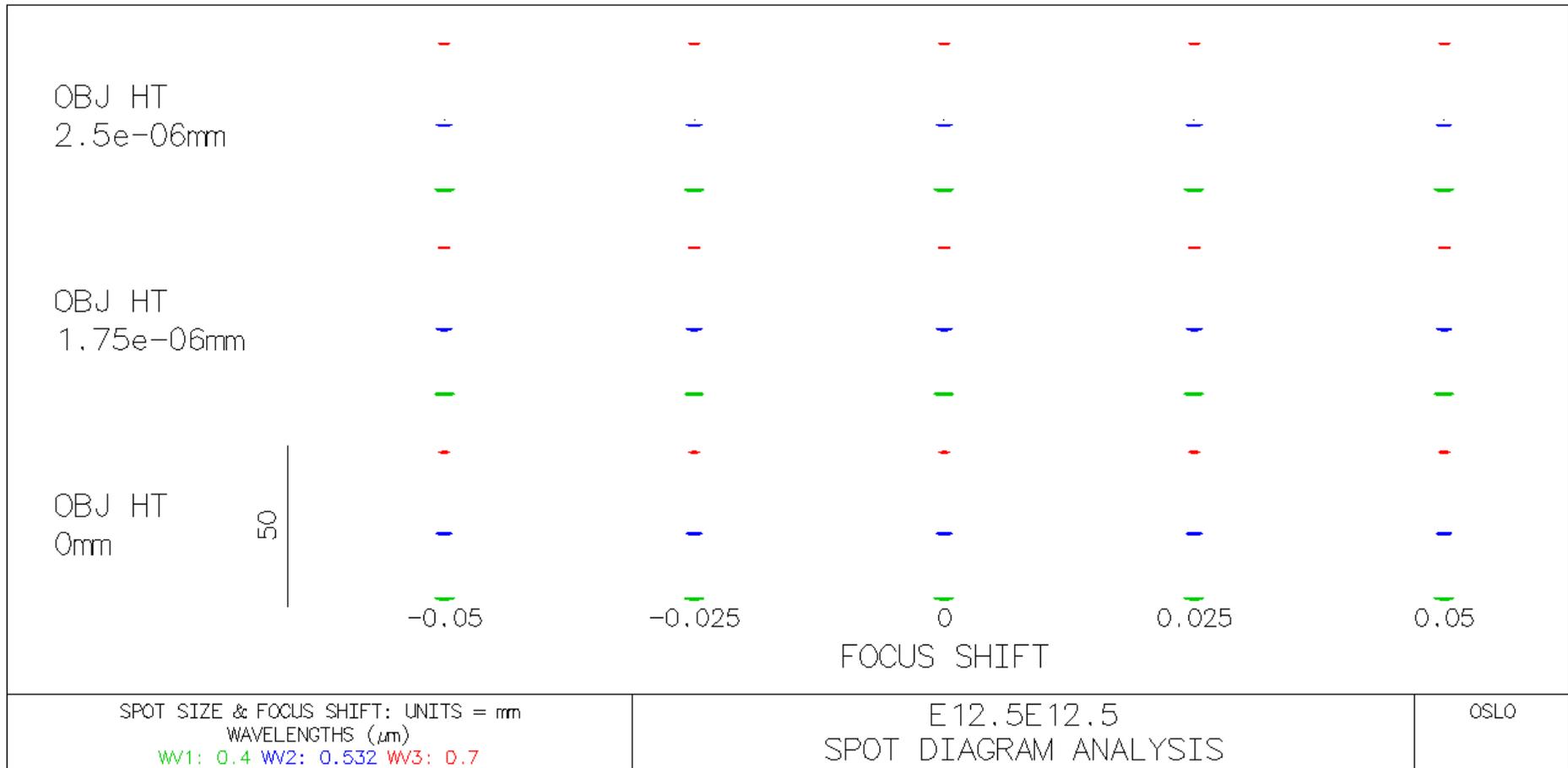
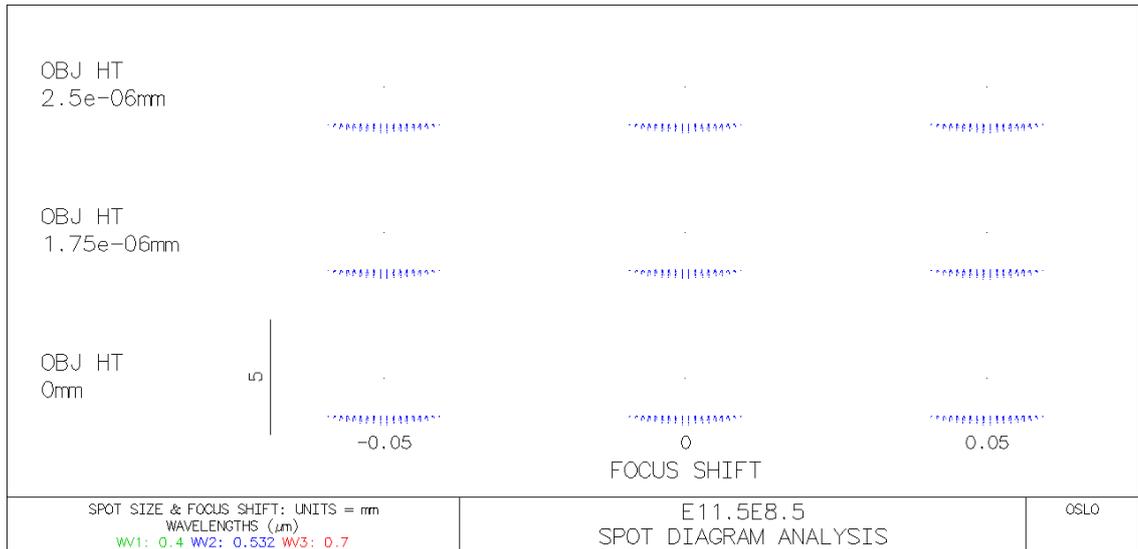


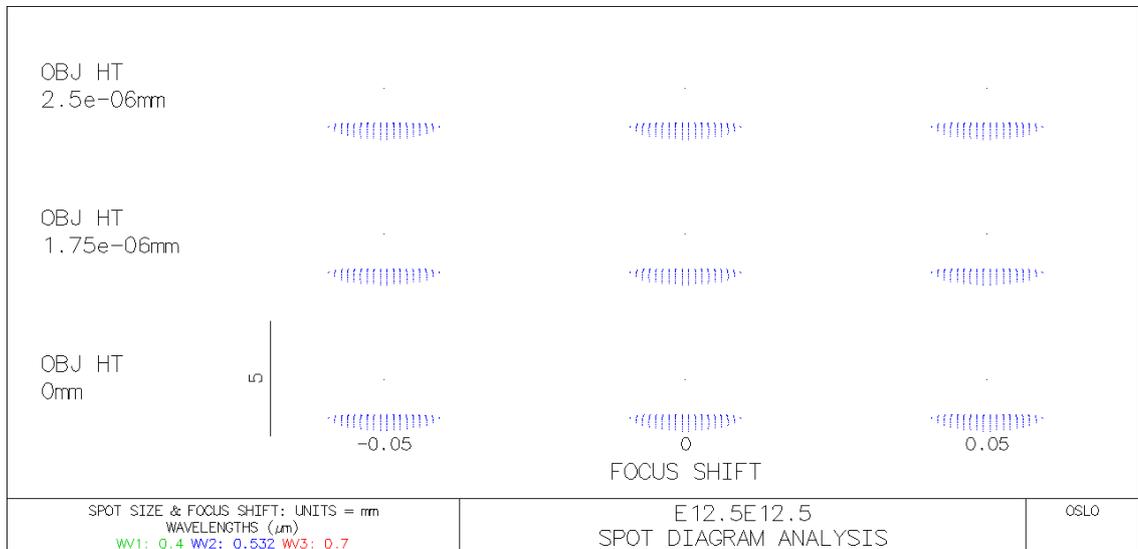
Figura 4.12 Análisis del trazo de rayos del sistema óptico M2, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.



**Figura 4.13** Análisis del diagrama de manchas (spot) del sistema óptico M2, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.



**Figura 4.14** Análisis del diagrama de manchas (spot) en escala 5 (amplificado) del sistema óptico M1, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.



**Figura 4.15** Análisis del diagrama de manchas (spot) en escala 5 (amplificado) del sistema óptico M2, usando el programa OSLO EDU 6.3.3.

Longitud de onda	DM1: Valor RMS del diámetro del spot para el sistema óptico M1	DM2: Valor RMS del diámetro del spot para el sistema óptico M2	DM2/DM1
400 nm	0,1250	0,2204	1,8
532 nm	0,0922	0,1950	2,1
700 nm	0,1518	0,1396	0,9
<b>Promedio</b>	0,1230	0,1850	1,5

La distancia  $L_6$  del esquema de la figura 4.6 ha sido fija e igual a 82,5 mm en los sistemas ópticos M1 y M2, con este valor se ha optimizado la simulación en el diagrama de manchas.

En la figura 4.8 se observa que la configuración del sistema óptico M1 es asimétrica, ya que los ángulos de inclinación de los espejos E3 ( $11,5^\circ$ ) y E4 ( $8,5^\circ$ ) son diferentes.

En la figura 4.11 se observa que la configuración del sistema óptico M2 es simétrica, ya que los ángulos de inclinación de los espejos E3 ( $12,5^\circ$ ) y E4 ( $12,5^\circ$ ) son iguales.

De las figuras 4.9 y 4.12 se observa cambios en las medidas de sus aberraciones<sup>[6]</sup>, llegando a lo siguiente.

- i) El astigmatismo en el eje sagital se mantiene (32 mm aprox.), mientras que en el eje transversal aumenta para el sistema óptico simétrico M2 a 4 mm aprox. Cuando el astigmatismo transversal del sistema óptico asimétrico M1 es casi 0 mm.
- ii) Las curvas que representan la aberración esférica longitudinal en el sistema óptico asimétrico M1 se encuentran igualmente espaciadas mientras que las del sistema óptico simétrico M2 se encuentran juntas entre sí. Las tres curvas en cada sistema óptico se encuentran en la misma escala, por lo que en la aberración esférica longitudinal no se genera cambios considerables cuantitativamente.
- iii) La aberración cromática del sistema óptico asimétrico M1 se encuentra en una escala cinco, mientras que en el sistema óptico simétrico M2 está a una escala de dos.
- iv) La distorsión es muy alta y aproximadamente la misma para ambos sistemas ópticos.
- v) El color lateral que representa la separación de diferentes longitudes de onda en el plano imagen se mantiene aproximadamente constante en ambos sistemas ópticos. La longitud del color lateral es de 26 mm (aprox.) en un rango de longitudes de onda de 532 nm a 700 nm. Con este valor se puede estimar la dispersión lineal del monocromador, que será:

$$D_L = \frac{168}{26} = 6,46 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \quad (4.2)$$

En las figuras 4.10 y 4.13 se puede observar que el ancho de los spots del diagrama de manchas de sistema óptico asimétrico M1 son menores que los del sistema simétrico M2. Esto se puede observar con más detalle en las figuras 4.14 y 4.15, y con los datos del cuadro de abajo de estas últimas figuras, y se puede decir que el ancho del spot<sup>5</sup> (mancha) en el sistema óptico simétrico M2 es 1,5 veces (aprox.) mayor que el spot del sistema óptico asimétrico M1.

### 4.1.3 ANÁLISIS DE LA RESOLUCIÓN DEL MONOCROMADOR

Para obtener la resolución del monocromador se realizaron los siguientes pasos:  
 1° Se calcula la mínima variación de longitudes de onda que se puede obtener con esta rejilla de difracción para longitudes de onda que se encuentren en el rango espectral de interés. Para esto usamos la ecuación (1.5) que describe el poder de resolución de la rejilla de difracción.

$$R_p = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = N \cdot m, \quad m = 1$$

Donde:

$$N = \rho \cdot W = 1200 \frac{\text{líneas}}{\text{mm}} \times 58 \text{mm} = 69600 \text{líneas}$$

$$R_p = 69600 \tag{4.3}$$

En la tabla 4.2 se ha calculado “ $\Delta\lambda$ ” para ciertas longitudes de onda.

**Tabla 4.2 Cálculo de “ $\Delta\lambda$ ” para diferentes longitudes de onda.**

	$\lambda(\text{nm})$	$\Delta\lambda (\text{nm})$
<b>1</b>	300	0.00431
<b>2</b>	350	0.00503
<b>3</b>	400	0.00575
<b>4</b>	600	0.00862
<b>5</b>	800	0.01149

De la tabla 4.2 se puede determinar que la rejilla de difracción podría resolver variaciones de longitudes de onda “ $\Delta\lambda$ ” desde 0,004 nm en el rango ultravioleta cercano hasta 0,011 nm en el rango infrarrojo cercano.

<sup>5</sup> El spot (mancha) es la distribución de la luz en el plano imagen (producido por un sistema óptico) perteneciente a un punto del plano objeto a una altura determinada.

2° Analizando el sistema mecánico que hace girar la rejilla de difracción se determina quién limita la resolución del monocromador, la mecánica o la óptica. Para ello se estima (es sólo una aproximación) la mínima variación de longitud de onda que puede realizar el motor a pasos que mueve la rejilla. Se ha determinado la siguiente equivalencia:

$$1\text{nm} \equiv 200\text{pasos} \quad (4.4)$$

Entonces la variación mínima “ $\Delta\lambda$ ” sería la de un paso.

$$1\text{paso} = \Delta\lambda = 0,005\text{nm}$$

De acuerdo a este último resultado, se determina que el sistema mecánico (giro del motor a pasos) está limitado por la óptica (poder de resolución de la rejilla) del monocromador para longitudes de onda mayores a 350 nm, ya que las variaciones  $\Delta\lambda$  son mayores a 0,005 nm. Por lo que en este caso se recomienda utilizar variaciones mayores a 3 pasos en el motor que hace girar la rejilla de difracción, para que no sea limitado por la óptica del monocromador para longitudes de ondas menores a 1000 nm.

3° Otro factor que limita el mínimo valor de “ $\Delta\lambda$ ” para el monocromador, es el ancho mínimo de la rendija de entrada y salida. En este caso el ancho de la rendija puede variar en pasos de 5  $\mu\text{m}$  (según el análisis de la sección 4.1), pero también hay que considerar la mínima intensidad de detección de nuestro fotosensor. De acuerdo a la experimentación realizada con un ancho en la rendija de entrada de 10  $\mu\text{m}$  y de 25  $\mu\text{m}$  en la rendija de salida, se puede observar una respuesta en el fotosensor sin ambigüedad alguna.

Considerando el ancho de la rendija de salida como 25  $\mu\text{m}$  y de acuerdo a la dispersión lineal hallada en el análisis de la simulación, se hallará el ancho de banda (bandpass) para el monocromador de acuerdo a la ecuación (2.6).

Se tiene que:  $D_L = 6,46 \frac{\text{nm}}{\text{mm}}$  ,  $w_E = 10\mu\text{m}$  ,  $W_S = 25\mu\text{m}$

$$\text{BP} = D_L \cdot W_S = 0,16\text{nm} \quad (4.5)$$

De acuerdo al valor del bandpass (BP), se puede decir que el monocromador puede registrar líneas espectrales de luz cuasi-monocromática con anchos mínimos de FWHM de hasta 0,16 nm.

Para estimar la resolución del monocromador usaremos la ecuación (2.7) como sigue:

$$R_S = D_L \cdot W_E = 0,06\text{nm} \quad (4.6)$$

Con este resultado se determina que la mínima variación que puede hacer el motor a pasos para generar esta resolución es de 12 pasos, de acuerdo a la equivalencia obtenida en 4.4.

$$1\text{nm} \equiv 200\text{pasos} , \text{ entonces } 0,06\text{nm} \equiv 12\text{pasos}$$

#### **4.1.4 SISTEMA ÓPTICO DE ACOPLAMIENTO AL MONOCROMADOR H-25**

De acuerdo a la apertura numérica del monocromador H-25 y al ancho de la rendija de entrada se ha adaptado un sistema óptico para su acoplamiento de una fibra óptica.

1° Las características de la fibra óptica utilizada son las siguientes:

Tipo: arreglo de fibras circular – lineal

Rango espectral: UV-visible

Apertura numérica: AN= 25°

Diámetro de la fibra óptica:  $D_f = 200 \mu\text{m}$

2° Las características del monocromador H-25 son:

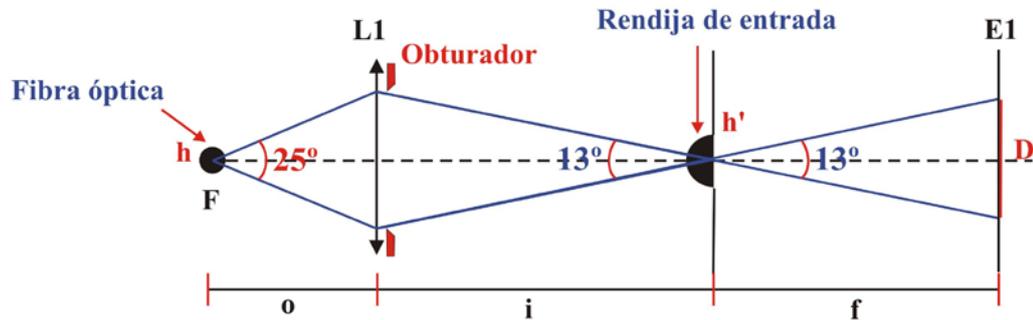
Rango espectral: UV-visible

Apertura numérica: AN= 13°

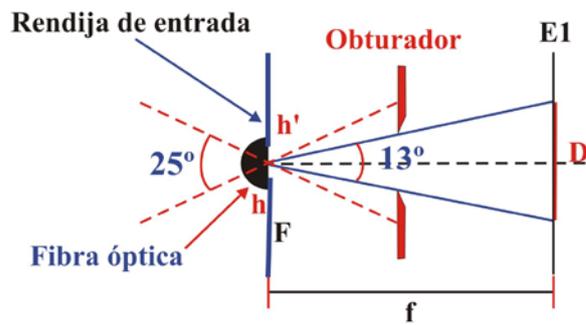
Ancho de la rendija de entrada:  $25 \mu\text{m}$

3° En vista que la rendija de entrada es ocho veces menor que el diámetro se tiene dos alternativas para adaptar la apertura numérica de la fibra al monocromador.

En la figura 4.16 se muestra dos esquemas de los sistemas ópticos de acoplamiento de la apertura numérica de la fibra óptica a la óptica del monocromador.



a) Sistema óptico A1



b) Sistema óptico A2

**Figura 4.16 a) sistema óptico de acoplamiento A1 (lente obturador), b) sistema óptico de acoplamiento A2 (obturador).**

El sistema A1 está constituido por una lente y un obturador espacial, reduce la apertura numérica de la fibra óptica, pero la imagen del diámetro de la fibra se amplificaría tal como se muestra en la relación 4.7 (de acuerdo a la ecuación (2.9)). Lo que limitaría la cantidad de luz a ingresar en el monocromador.

$$M = \frac{AN_F}{AN_I} = \frac{\text{sen}(25^\circ)}{\text{sen}(13^\circ)} \approx 2 \quad (4.7)$$

El sistema A2 constituido por un obturador espacial, que es el más sencillo y es el que se ha elegido. En este sistema se usa un obturador espacial después de la rendija de salida, el cual regula la apertura numérica de la fibra óptica para acoplarla a la A.N. del monocromador.

#### 4.1.5 AUTOMATIZACIÓN DEL MONOCROMADOR JY H-25

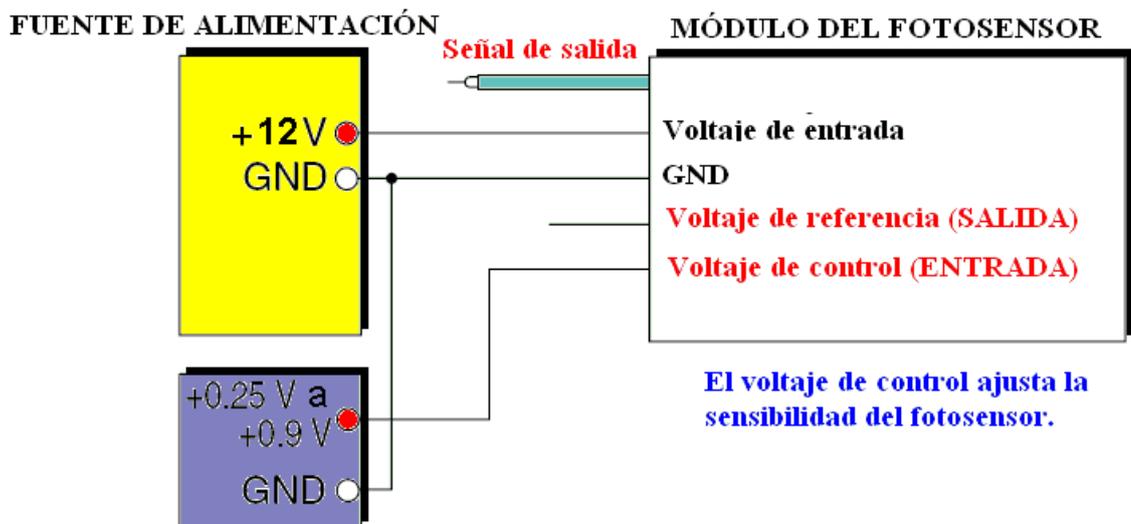
La automatización del monocromador se ha centrado en el control del motor a pasos que gira la rejilla de difracción y en la adquisición de la señal eléctrica de un fotosensor sensible en el rango ultravioleta-visible. A continuación se describen las etapas de la construcción del sistema de automatización.

##### **Etapas I: Construcción de la fuente de alimentación del fotosensor PMT H5783-04**

Se ha diseñado y construido una fuente de alimentación para el funcionamiento del fotosensor PMT H5783-04.

Voltaje de alimentación del fotosensor: 12 V,

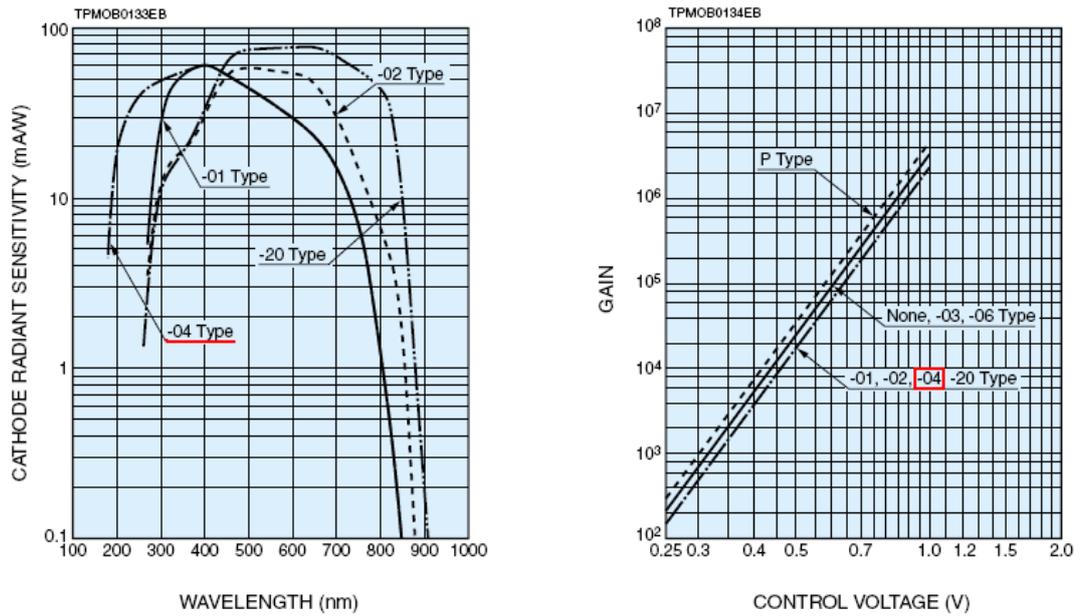
Voltaje de ganancia del fotosensor: 0,5 V



**Figura 4.17 Esquema de la fuente de alimentación del fotosensor PMT H5783-04.**

En la figura 4.17 se muestra el esquema de la fuente de alimentación para el fotosensor PMT H5783-04 con los voltajes de entrada y control de la ganancia.

**PMT H5783-04**



**Figura 4.18 Izquierda: Curva de sensibilidad Vs. longitud de onda del fotosensor, derecha: curva de ganancia (sensibilidad) del fotosensor. Imágenes tomadas de la ficha técnica PMT H5783-04 de HAMAMATSU.**



**Figura 4.19 Foto de la fuente de alimentación para el fotosensor PMT H5783-04**

En la figura 4.18 se muestra la curva de sensibilidad en función de la longitud de onda del fotosensor PMT H5783-04, se observa que es más sensible en el rango de 200 nm a 700 nm, para la luz infrarroja la sensibilidad decae rápidamente. De acuerdo a la curva de ganancia del fotosensor (figura 4.18), se observa que para 0,5V en el voltaje de control se estima un factor de 10<sup>5</sup> de ganancia.

## Etapa II: Construcción de la tarjeta electrónica de control

En la figura 4.20 se muestra el esquemático impreso de la tarjeta de control para el monocromador, diseñado en el programa EAGLE 4.16. Este diseño se ha realizado a doble cara para reducir las dimensiones de la tarjeta.

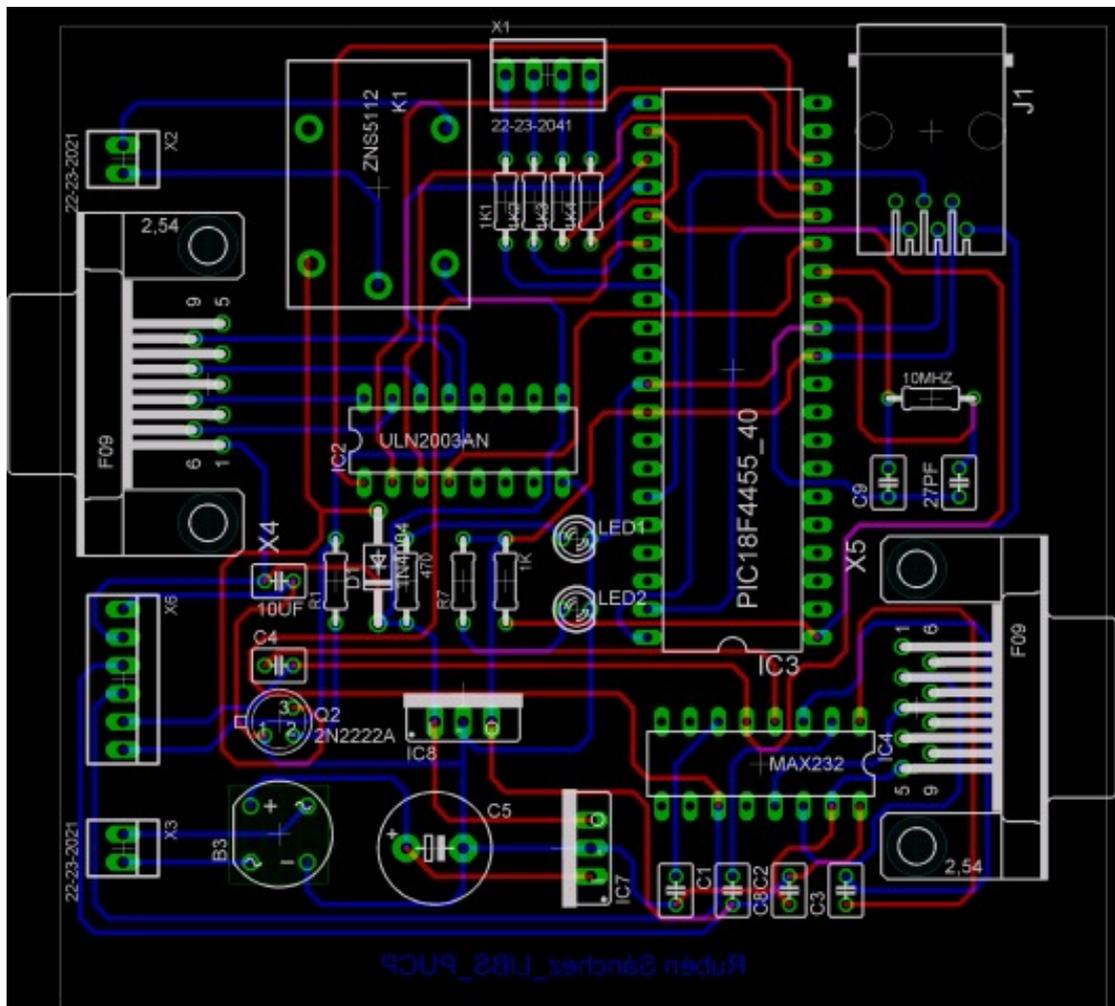


Figura 4.20 Esquemático impreso del circuito de la tarjeta de control para el monocromador JOBIN YVON H-25.

En la figura 4.21 se muestra una foto de la tarjeta de control que se ha construido para el monocromador JOBIN YVON (JY) H-25, los detalles de construcción se muestran en el anexo A de la tesis. Para el control del motor y otros accesorios se ha utilizado un PIC18F452, el cual se ha programado en el programa MLAB IDE V7.50.



**Figura 4.21** Foto de la tarjeta de control para el monocromador **JOBIN YVON H-25**.

### **Etapa III: Programación y ensamblaje de sistema de automatización.**

En esta etapa final se ha realizado un programa en Matlab 7.0 para controlar la tarjeta electrónica ya construida. En este programa el operador puede elegir el rango espectral de barrido del monocromador, el incremento de longitud de onda en el barrido espectral, y configurar el osciloscopio para registrar la señal eléctrica de salida del fotosensor.

El programa diseñado en entorno Matlab 7.0 se llama `JOBINYVONH25.m`, y fue realizado por Sandra Robles en el marco del proyecto DAI-3528. El manual del programa se describe en el anexo B de la presente tesis.

En la figura 4.22 se muestra una foto del sistema de automatización del monocromador **JOBIN YVON H-25**, en esta figura se observa que el sistema esta compuesto por: la tarjeta electrónica de control, monocromador **JY H-25**, fotosensor con su fuente de alimentación, osciloscopio **TDS3014**, y la computadora portátil con el programa `JOBINYVONH25.m`.



**Figura 4.22 Foto del sistema de automatización para el monocromador JY H-25.**

#### **4.1.6 CALIBRACIÓN DEL MONOCROMADOR JOBIN YVON H-25**

Para calibrar el monocromador JOBIN YVON H-25 se ha seguido los siguientes criterios:

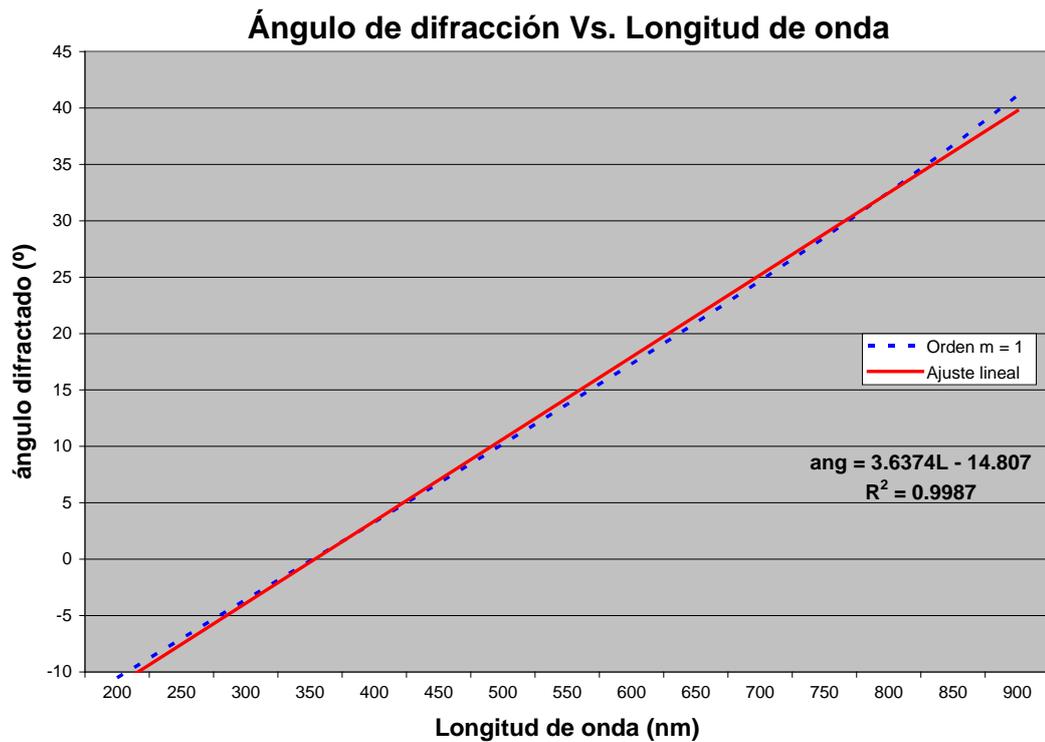
**1. Conocer el cambio de longitud de onda en función del número de pasos** que gira el motor (control de giro de la rejilla de difracción). La relación 4.4, es una aproximación lineal efectiva para resoluciones menores al 0,10 nm.

$$1nm \equiv 200 \text{pasos}$$

La figura 4.23 muestra la relación que existe entre el ángulo de difracción (de orden 1) y la longitud de onda. En este gráfico se observa que el ajuste lineal es muy aproximado a la curva real, obtenida con la ecuación de la rejilla de difracción (1.1).

Las características de la rejilla (densidad  $\rho$ ) son las del monocromador, como también el ángulo de incidencia ( $\alpha$ ) sobre la rejilla.

$$\begin{aligned} \rho &= 1200 \text{líneas/mm} \\ \alpha &= 25^\circ \end{aligned} \tag{4.8}$$



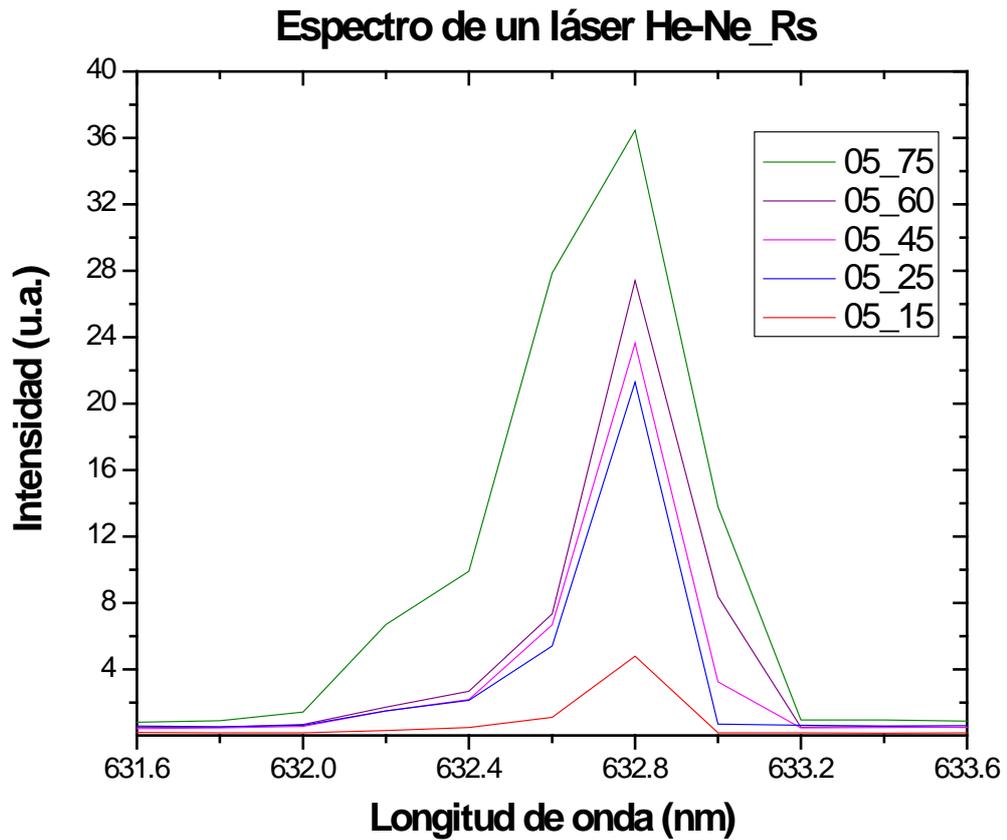
**Figura 4.23** Curva y ajuste lineal del ángulo de difracción en función de la longitud de onda. La densidad de la rejilla de difracción es 1200 líneas/mm y el ángulo incidente es 25°.

**2. Optimizar los anchos de las rendijas de entrada y salida**, de acuerdo a la resolución y cantidad de luz (que ingresa al monocromador) requeridas.

En el gráfico 4.24 se muestra los espectros de un láser He-Ne (632,8 nm) para diferentes anchos de la rendija de salida ( $W_S$ ) del monocromador, manteniendo el ancho de la rendija de entrada ( $W_E$ ) fijo. En la tabla 4.3 se muestran estos datos y el valor del FWHM para cada espectro.

**Tabla 4.3** Datos característicos de los espectros del láser He-Ne para  $W_S$  variable.

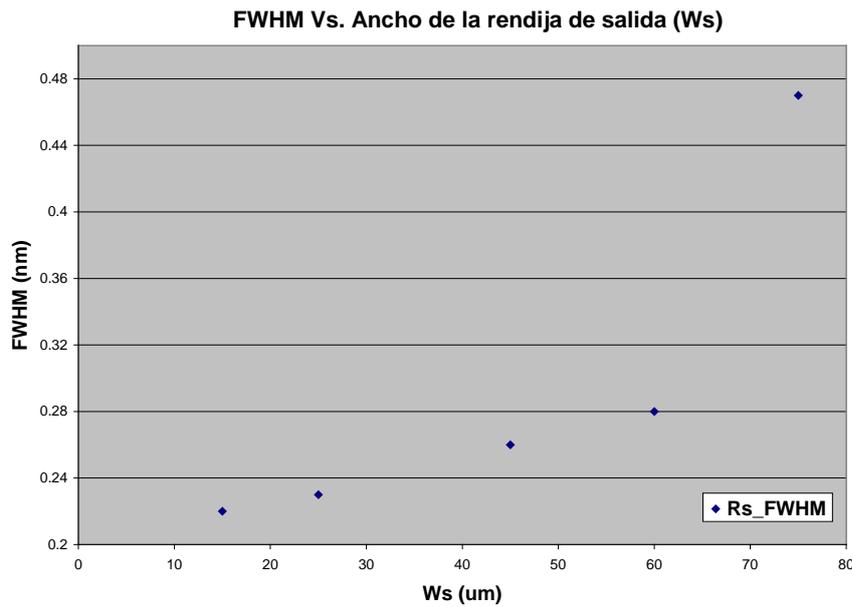
Espectro	$W_E$ ( $\mu\text{m}$ )	$W_S$ ( $\mu\text{m}$ )	FWHM (nm)	Ubicación del pico espectral
05_15	5	15	0,22	632,80 nm
05_25	5	25	0,23	632,80 nm
05_45	5	45	0,26	632,80nm
05_60	5	60	0,28	632,80 nm
05_75	5	75	0,47	632,80 nm



**Figura 4.24** Espectros del láser He-Ne para diferentes anchos de la rendija de salida del monocromador JY H-25.

En la figura 4.25 se observa que el FWHM (ancho a la mitad de la altura máxima del perfil del espectro) aumenta al incrementarse el ancho de la rendija de salida, se puede ver que la relación que hay entre el FWHM y el ancho de la rendija de salida ( $W_s$ ) no es lineal.

En el figura 4.26 se muestra los espectros de un láser He-Ne (632,8 nm) para diferentes anchos de la rendija de entrada ( $W_E$ ) del monocromador, manteniendo el ancho de la rendija de salida ( $W_s$ ) fijo. En la tabla 4.4 se muestran estos datos, junto con el valor del FWHM.



**Figura 4.25** Gráfica del FWHM en función del ancho de la rendija de salida (WS).

En la figura 4.27 se observa que el FWHM (ancho a la mitad de la altura máxima del perfil del espectro) aumenta al incrementarse el ancho de la rendija de salida, se puede ver que la relación que hay entre el FWHM y el ancho de la rendija de salida ( $W_s$ ) es aproximadamente lineal.

**Tabla 4.4** Datos característicos de los espectros del láser He-Ne para  $W_E$  variable.

Espectro	$W_E$ ( $\mu\text{m}$ )	$W_S$ ( $\mu\text{m}$ )	FWHM (nm)	Ubicación del pico espectral
05_10	5	10	0,10	632,80 nm
10_10	10	10	0,14	632,80 nm
15_10	15	10	0,17	632,80 nm
20_27	20	10	0,21	632,80 nm
25_27	25	10	0,26	632,80 nm

Luego de analizar estos espectros se ha elegido operar el monocromador con los siguientes anchos para la rendija de entrada ( $W_E$ ) y salida ( $W_S$ ).

**$W_E = 10 \mu\text{m}$ ,  $W_S = 10 \mu\text{m}$  (Puede cambiar de acuerdo a la resolución y/o cantidad de luz requerida).**

La elección de estos valores se basa a que el perfil de la línea espectral 632,8 nm del láser He-Ne se encuentra definida para ser identificada sin ambigüedad, además el valor de FWHM es menor que los  $W_s > 10 \mu\text{m}$  (alcanzando resoluciones de 0,10 nm).

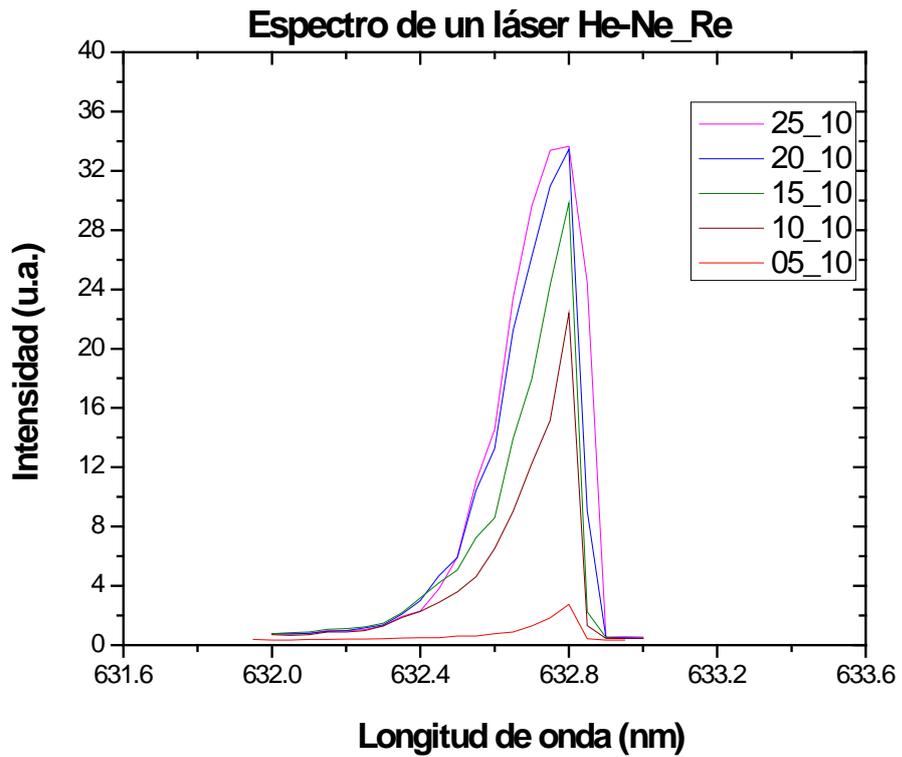


Figura 4.26 Espectros del láser He-Ne para diferentes anchos de la rendija de entrada del monocromador JY H-25.

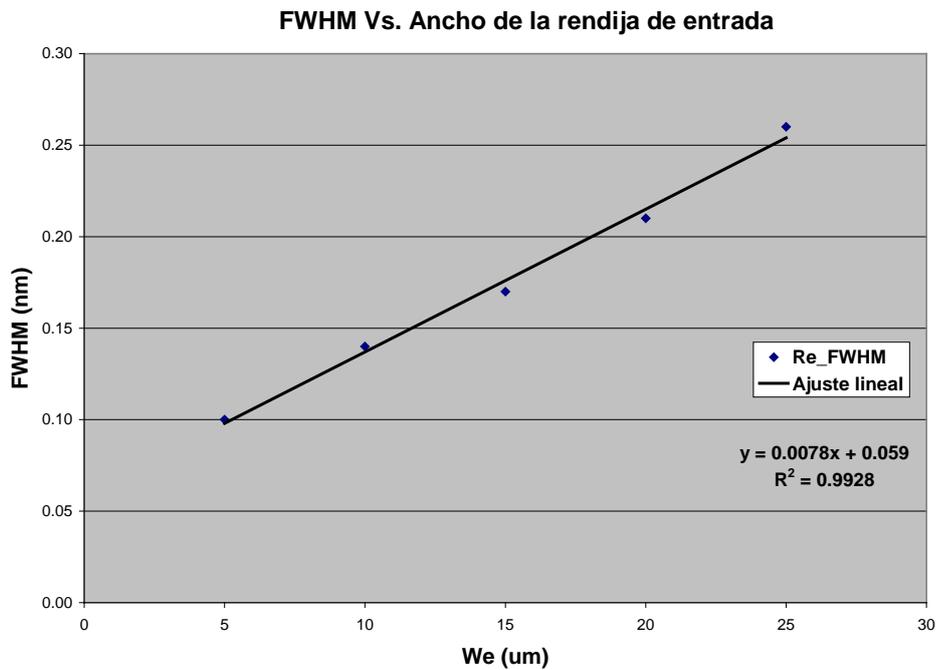
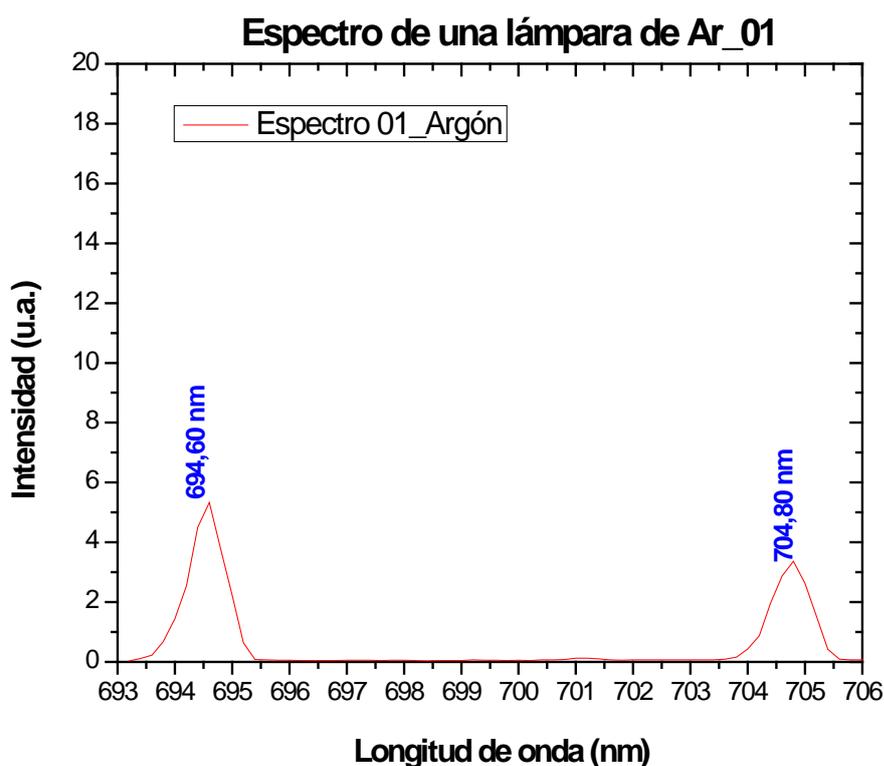


Figura 4.27 Gráfica del FWHM en función del ancho de la rendija de entrada ( $W_E$ ).

De acuerdo a las tabla 4.3 y 4.4 se puede observar que la ubicación del pico espectral del láser He-Ne es el mismo, sin embargo en la figura 4.26 los perfiles de los espectros adquiridos no son simétricos. Este problema puede ser debido a las aberraciones del sistema el cual modifica la forma del spot sobre la rendija de salida, y/o **la forma de ingreso de la luz al monocromador a través de la fibra óptica.**

**3. Tener una fuente de luz patrón,** en este caso se utilizó una lámpara de argón. Los espectros de la lámpara de argón (Ar) se muestran en las figuras 4.28 y 4.29, en cada espectro se encuentran identificados los picos espectrales del argón.



**Figura 4.28 Espectro de la lámpara de argón (Ar\_01) en el rango espectral de 693 nm hasta 706 nm, obtenidos con el monocromador JY H-25.**

Los espectros de argón Ar\_01 y Ar\_02 se han registrado en pasos de longitud de onda de 0,20 nm, y los anchos de la rendija de entrada y salida han sido de 25  $\mu\text{m}$  ambos.

En la tabla 4.4 se muestran las líneas espectrales del argón de acuerdo a la base del NIST<sup>6</sup> y los obtenidos experimentalmente con el monocromador JOBIN YVON

<sup>6</sup> El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) es un organismo federal de tecnología que desarrolla y promueve la medición, normas, y la tecnología.

(JY) H-25. En esta tabla también se calcula el espaciamento entre las líneas atómicas ( $\Delta\lambda$ ) y se puede observar que el espaciamento entre las líneas atómicas del NIST es muy similar (en los tres casos que se muestra en la tabla 4.4) a las obtenidas con el monocromador JY H-25, y con diferencias entre ambos menores a 0,05 nm.

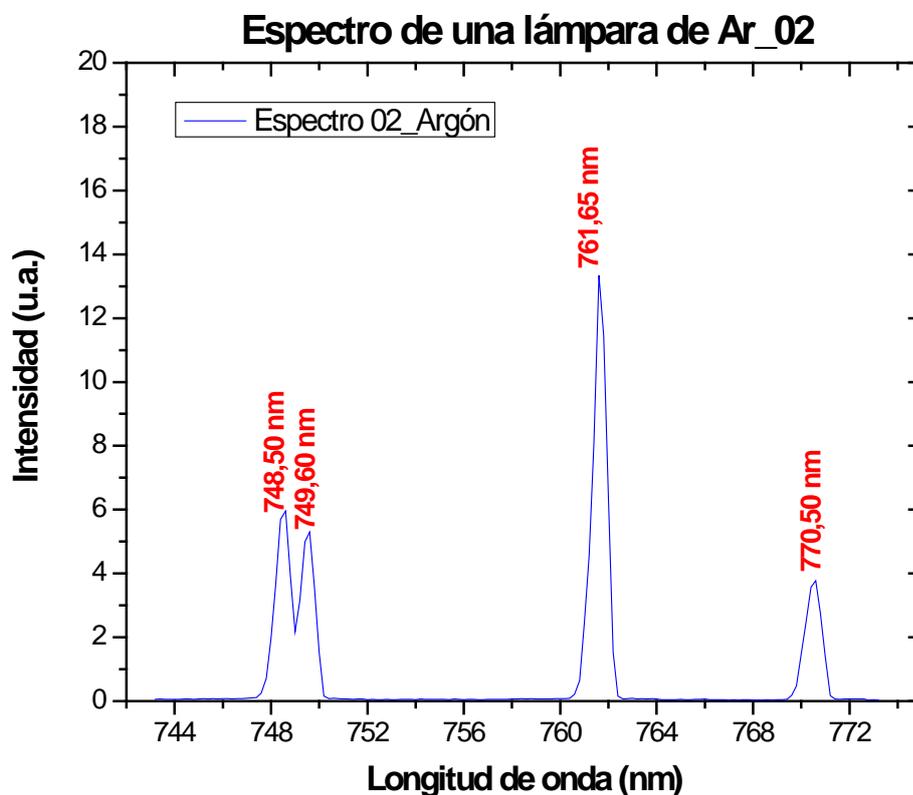


Figura 4.29 Espectro de la lámpara de argón (Ar\_02) en el rango espectral de 744 nm hasta 772 nm, obtenidos con el monocromador JY H-25.

Tabla 4.5 Datos característicos de los espectros de la lámpara de Ar.

	Líneas atómicas del Argón (nm)		$\Delta\lambda$ (nm)	
	Base de datos NIST	Monocromador JY H-25	NIST	JY H-25
1	696,54	694,60	10,18	10,20
2	706,72	704,80		
3	750,38	748,50	1,08	1,10
4	751,46	749,60		
5	763,51	761,65	8,90	8,85
6	772,37	770,50		
7	772,42			

De la tabla 4.5 se puede observar que existe un corrimiento de todo el espectro obtenido con el monocromador, que es en promedio 2,0 nm.

Con este resultado se modificará la relación utilizada en el programa “JOBINYVONH25.m” que existe entre la posición del motor (que soporta la rejilla de difracción) y la longitud de onda, haciendo un corrimiento de 200 pasos para realizar el corrimiento de 2 nm (ver la equivalencia 4.4) en el registro de los espectros con el monocromador.

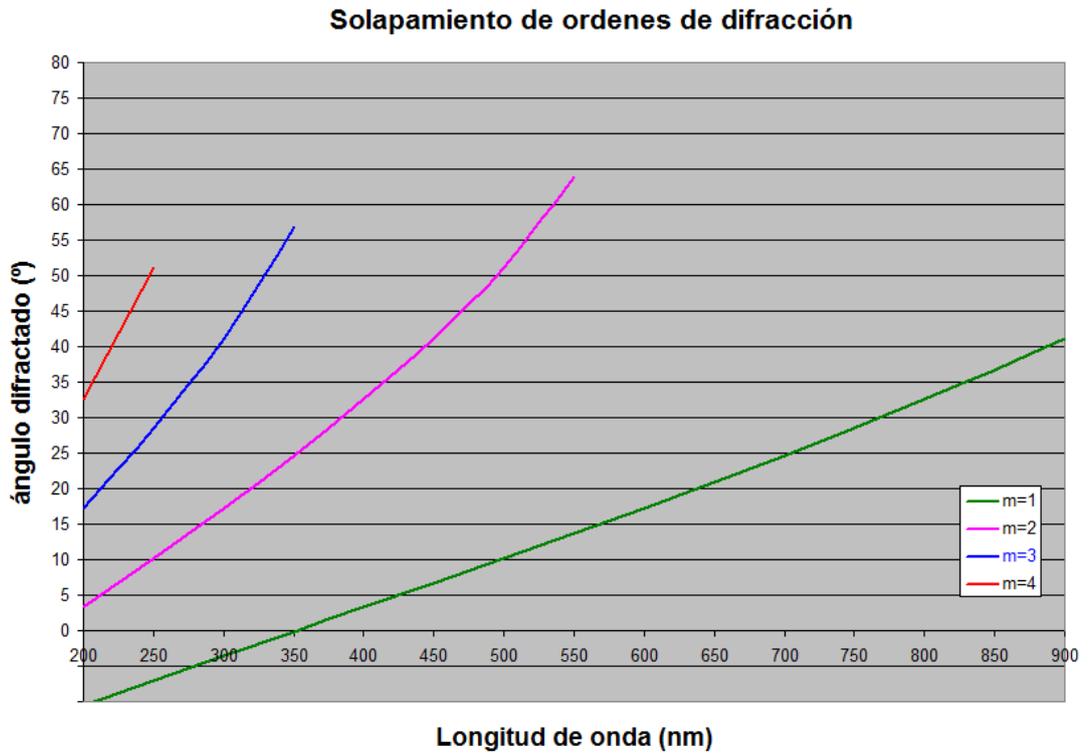
#### **4.1.7 PROBLEMAS DE INTERFERENCIA EN EL MONOCROMADOR JY H-25**

Los problemas frecuentes al registrar un falso patrón de luz en el monocromador son tres: luz parásita, solapamiento de órdenes de difracción superiores y superposición del orden cero, y el orden de difracción simétrico (de signo contrario) al que se utiliza.

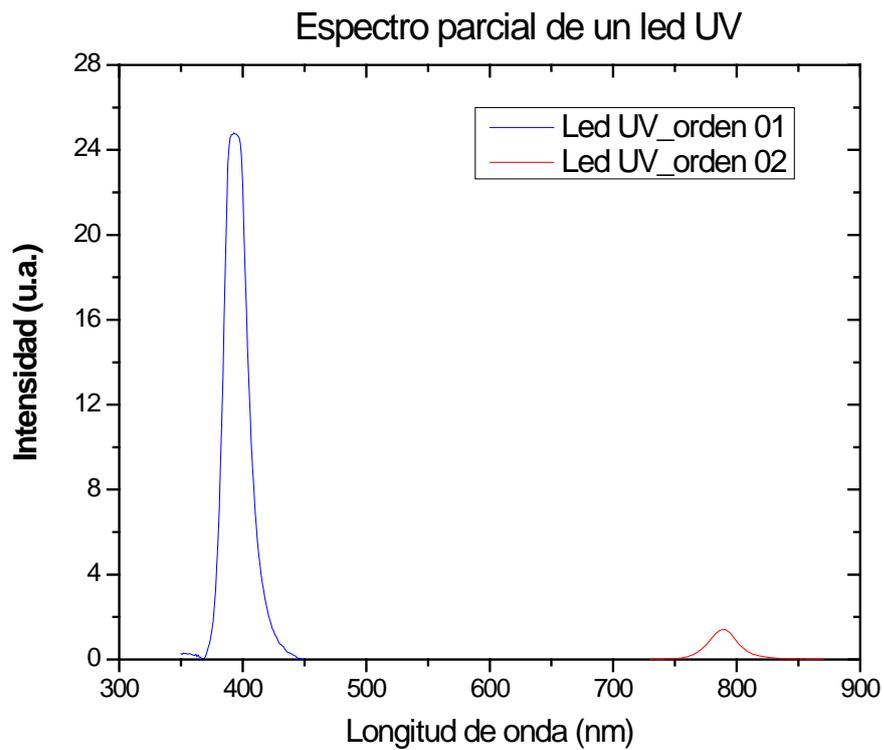
##### **4.1.7.1 SOLAPAMIENTO DE ÓRDENES DE DIFRACCIÓN**

En la figura 4.30 se puede observar el solapamiento de la luz difractada del orden 2 con el orden 1 en el rango de 400 nm a 800 nm. Este solapamiento de órdenes tiene que considerarse al momento de realizar alguna medida en este rango (en la mayoría de casos). El solapamiento del orden 1 con órdenes superiores a 2 no son de consideración ya sus intensidades son pequeñas en comparación al orden 2.

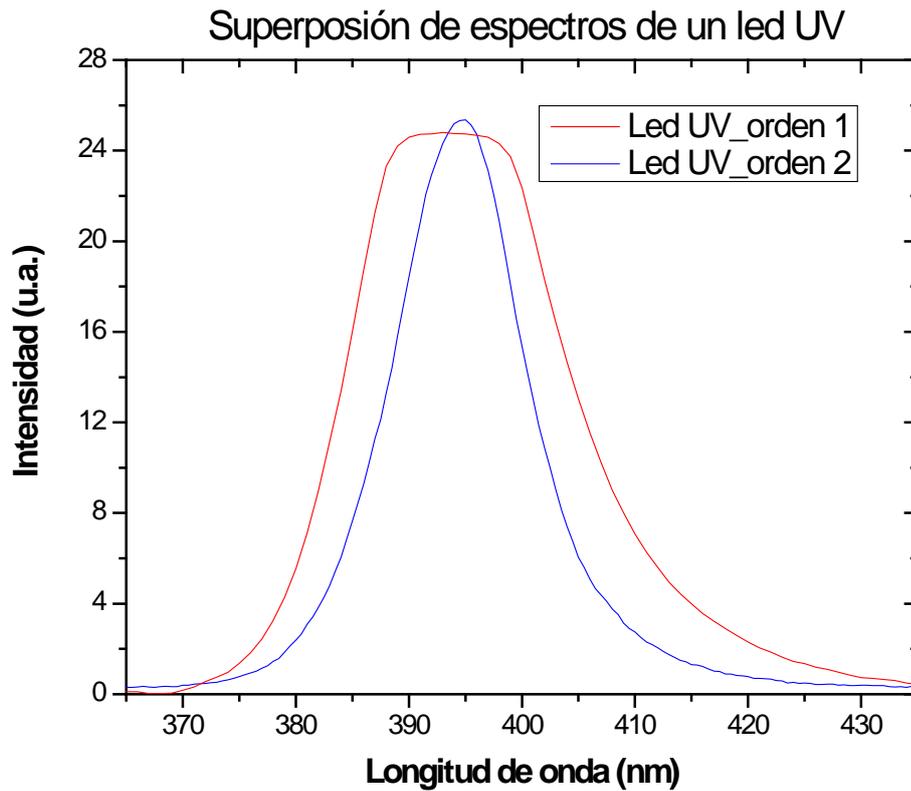
Para corroborar este posible solapamiento en el monocromador JY H-25 se ha registrado el espectro de un led ultravioleta (UV) cercano que emite alrededor de los 394 nm. En el gráfico 4.31 se muestra el espectro del led en el rango de 350 nm a 850 nm y se observa una respuesta en el rango de 750 nm a 800nm, que no es característico de la luz de led aparentemente. En el gráfico 4.32 se superponen los espectros azul y rojo (los mismos del gráfico 4.31), para ello los datos de longitud de onda del espectro rojo se reducen a la mitad (posible orden de difracción 2) y su intensidad es amplificadas. La superposición de los espectros azul y rojo de la figura 4.32 muestran similitud, por lo que se concluye que el espectro rojo es perteneciente a la luz dispersada del segundo orden de difracción y no al espectro característico de la luz del led UV.



**Figura 4.30 Solapamiento de la dispersión de la luz para diferentes órdenes de difracción en una rejilla de 1200 líneas / mm del monocromador JY H-25.**



**Figura 4.31 Espectro de un led UV con el monocromador JY H-25.**

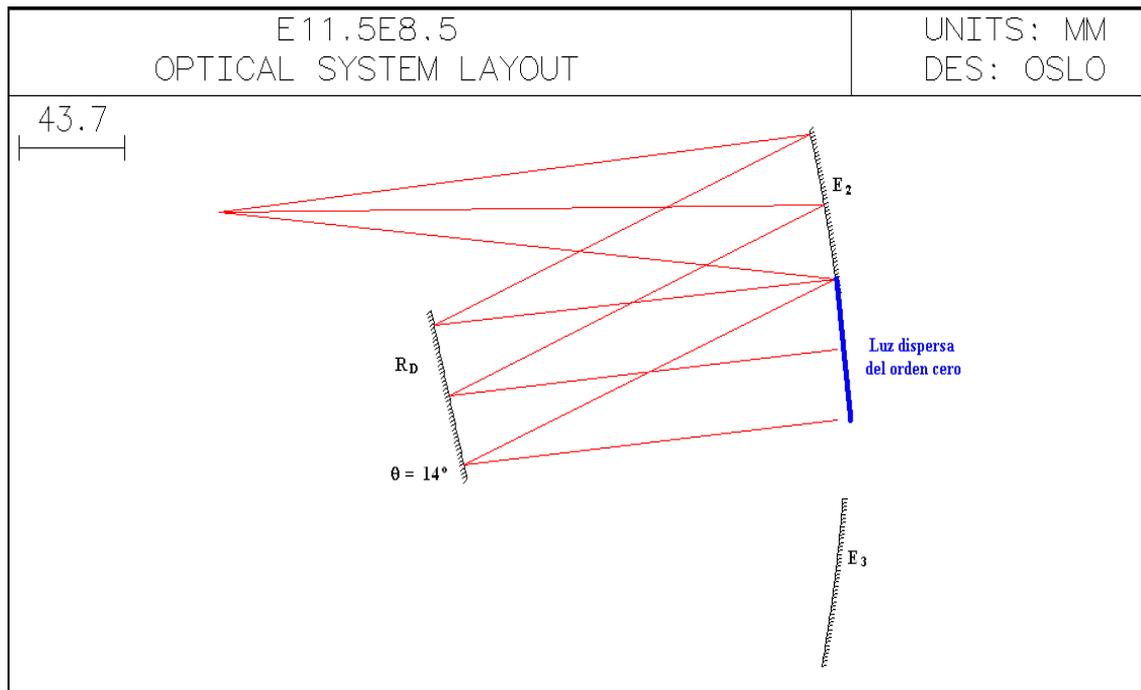


**Figura 4.32 Superposición de los espectros del led UV en los órdenes de difracción 1 y 2.**

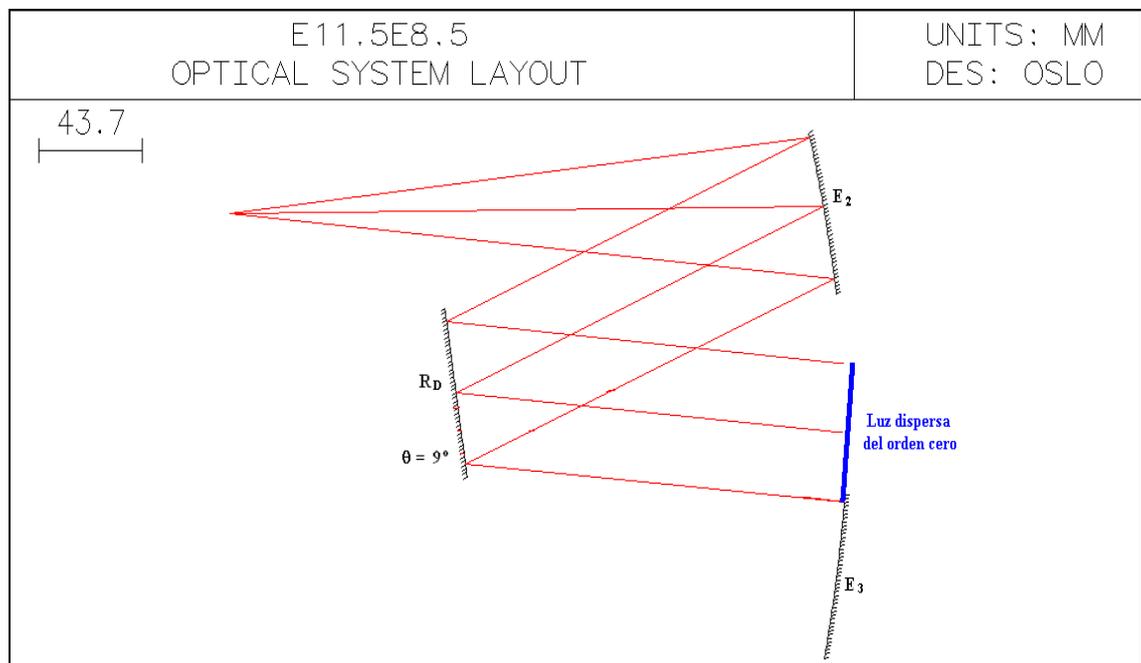
#### **4.1.7.2 SUPERPOSICIÓN DE LOS ÓRDENES DE DIFRACCIÓN “0” Y “-1”**

Para registrar la luz en el monocromador JY H-25 de acuerdo al orden de difracción uno, en un rango espectral de 300 nm a 900 nm se gira la rejilla entre las posiciones de  $6^\circ$  (300 nm) a  $18^\circ$  (900 nm) respecto a un corte vertical del sistema óptico de la figura 4.8. En cierto tramo del rango espectral existe un reingreso no deseado de la luz dispersa del orden de difracción “0” (cero) y “-1”, el cual es detallado a continuación.

i) En la figura 4.33.a se observa que cuando la posición de la rejilla de difracción es mayor a  $14^\circ$ , la luz dispersa del orden cero reingresa al sistema óptico del monocromador a través del espejo  $E_2$ , y esto puede causar una falsa señal en el detector.



(a)

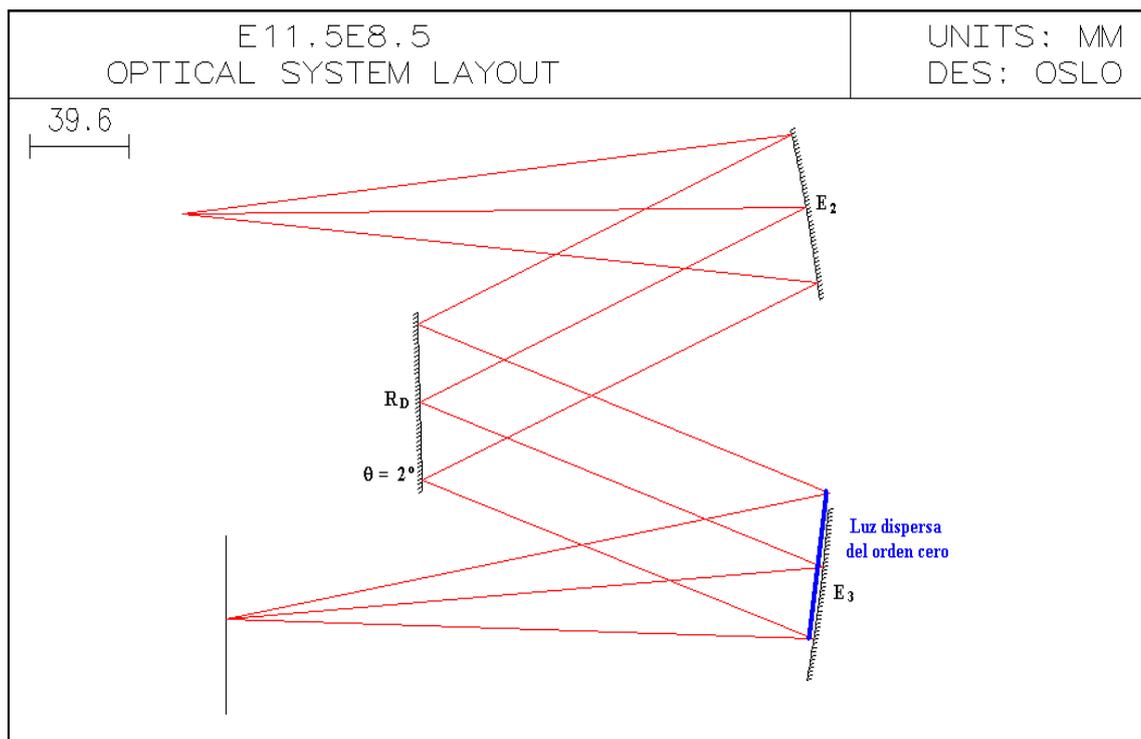


(b)

**Figura 4.33 Superposición del orden cero al reingresar la luz (a) en el espejo colimador E2, y (b) en el espejo de enfoque E3, del monocromador JY H-25.**

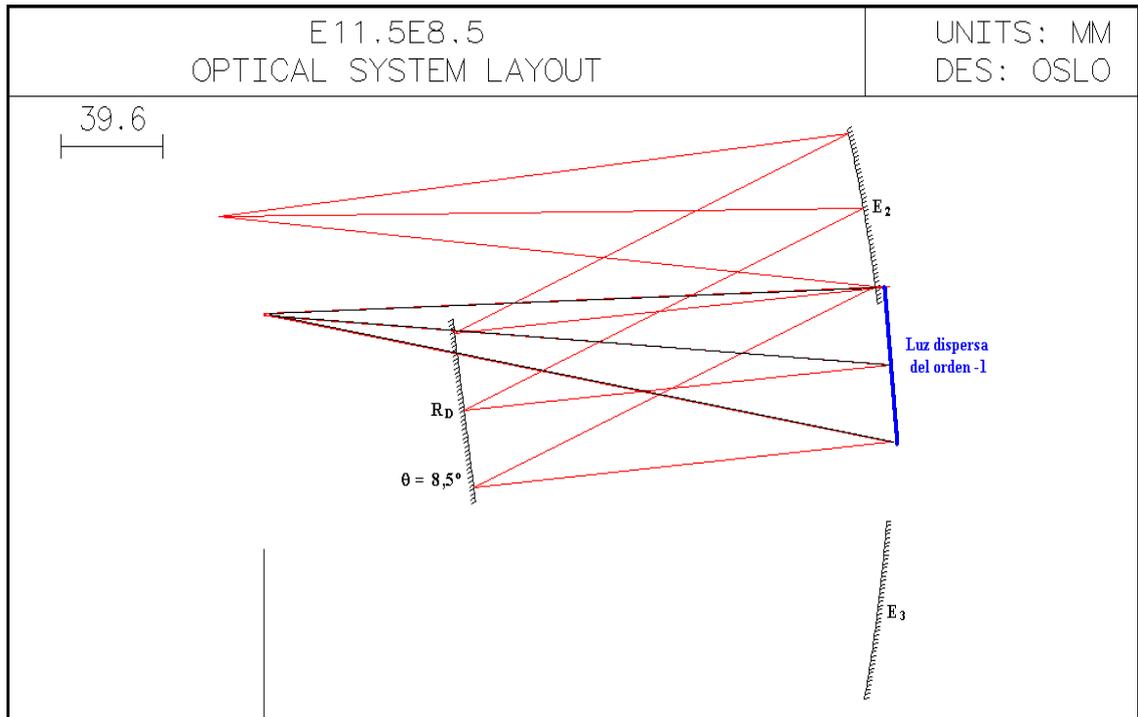
ii) En la figura 4.33.b se observa que cuando la posición de la rejilla de difracción es menor a  $9^\circ$ , la luz dispersa del orden cero reingresa al sistema óptico del monocromador

a través del espejo E<sub>3</sub>. Pero de acuerdo a la figura 4.34 se puede observar que para posiciones angulares menores a 2° en la rejilla se registrará una falsa señal en el detector. De acuerdo a nuestro rango espectral de detección del monocromador que se encuentra entre 300 nm (6°) a 900 nm (18°), se concluye que para posiciones angulares entre 6° a 9° no se tendrá una falsa detección. De acuerdo al análisis de las figuras 4.33 y 4.34 se tendrá cuidado al registrar el espectro de la luz de interés cuando la posición de la rejilla esté entre 14° a 18°, lo que equivale al rango espectral entre 650 nm y 850 nm.

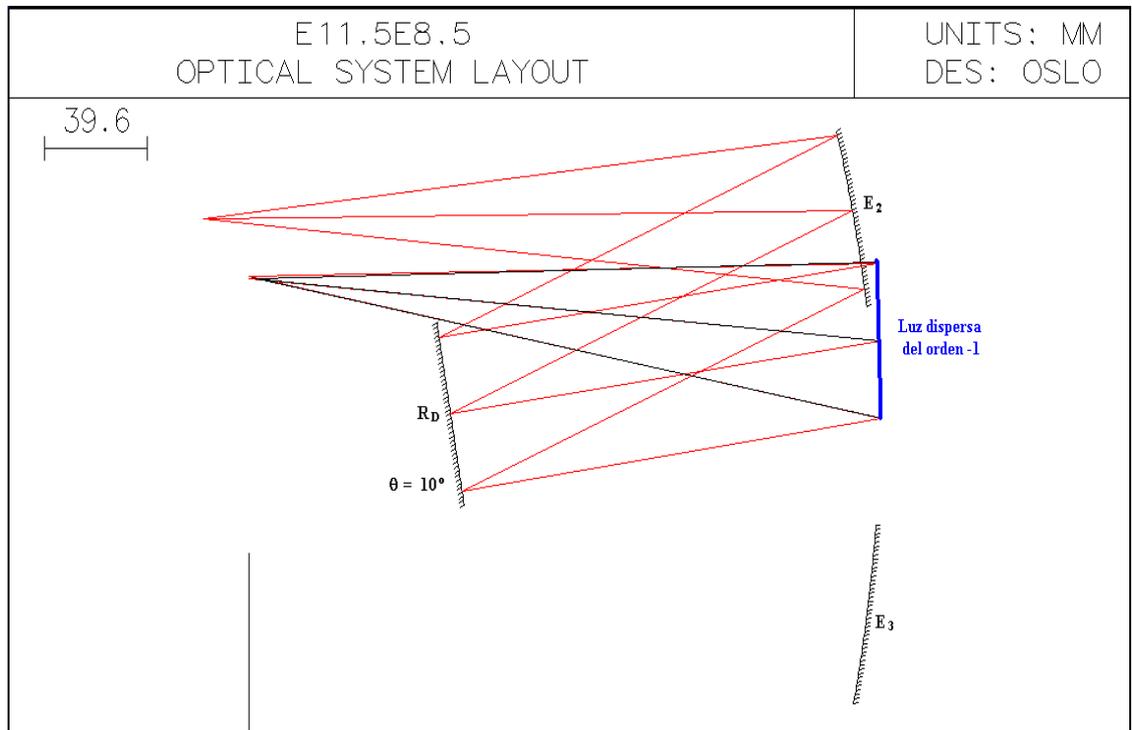


**Figura 4.34 Ingreso al detector de la luz dispersada del orden cero cuando la rejilla se encuentra girada en la posición de 2° en el monocromador JY H-25.**

ii) En la figura 4.35.a se observa que cuando la posición de la rejilla de difracción es mayor a 8.5°, la luz dispersa del orden “-1” reingresa al sistema óptico del monocromador a través del espejo E<sub>2</sub>, iluminando la rejilla de difracción. Este reingreso de luz se da hasta que la posición de la rejilla es de 10°, tal como se muestra en la figura 4.35.b. Este reingreso produce una falsa señal en el detector en el rango espectral entre 310 nm a 450 nm (aproximadamente), por lo cual se tiene que tener cuidado al interpretar el espectro en este rango de longitudes de onda.



**(a)**



**(b)**

**Figura 4.35 Superposición del orden -1 al reingresar la luz (a) en el espejo colimador E<sub>2</sub>, y (b) en el espejo de enfoque E<sub>3</sub>, del monocromador JY H-25.**

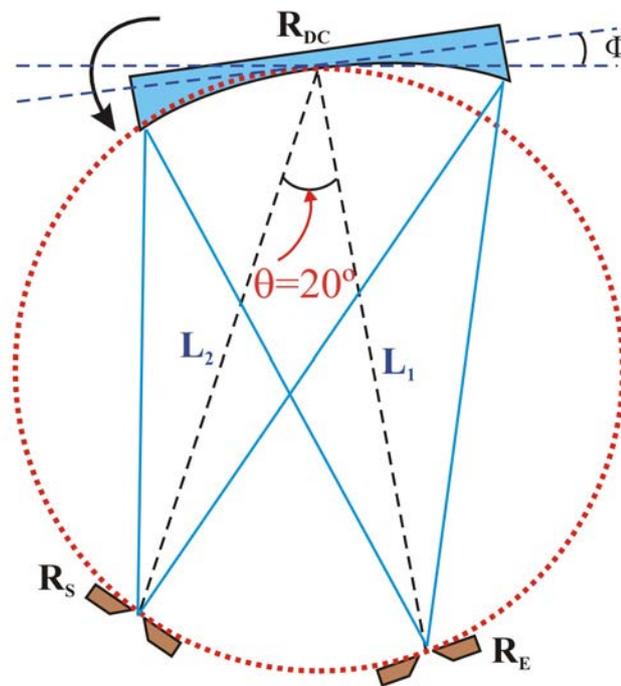
## 4.2 SIMULACIÓN DE UN MONOCROMADOR MC-PHERSON MODEL 272 (MONTAJE SEYA-NAMIOKA)

En la figura 4.36 se describe el sistema óptico del monocromador Mc-Pherson 272, cuyos parámetros físicos son los siguientes:

$R_E$ : rendija de entrada de ancho variable

$R_S$ : rendija de salida de ancho variable

$R_{DC}$ : rejilla de difracción cóncava con una densidad lineal de  $\rho=1140$  líneas/mm, un diámetro  $D=100$  mm, y un radio de curvatura  $R=200$  mm.



**Figura 4.36** Esquema del monocromador Mc-Pherson 272 visto desde arriba.

Donde:  $L_1 = 190$  mm y  $L_2$  depende del rango espectral de funcionamiento del monocromador. Además:

$W_E$ : ancho de la rendija de entrada.

$W_S$ : ancho de la rendija de salida.

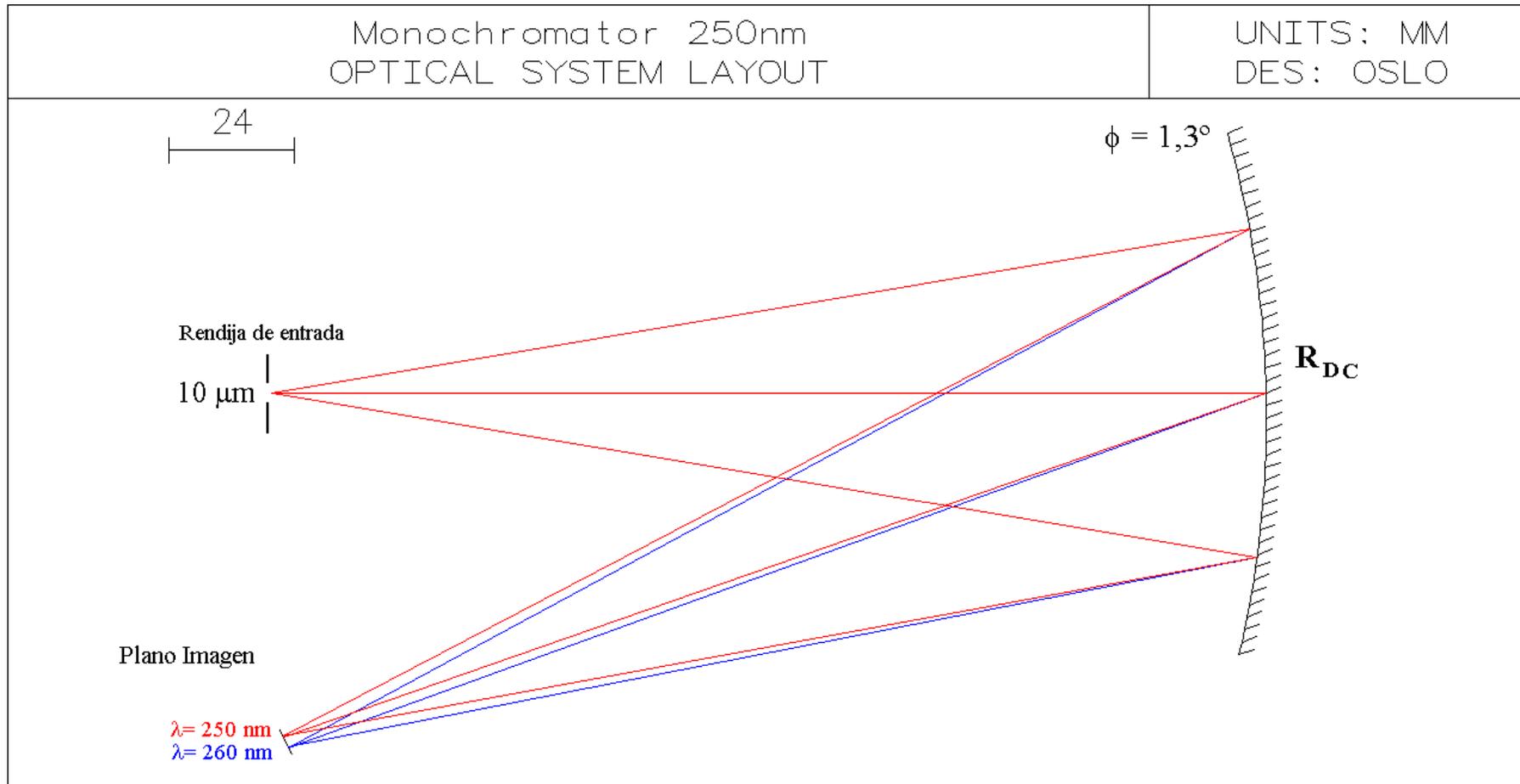
En la simulación que se plantea, se asume un ancho de la rendija de entrada de  $10 \mu\text{m}$  y se presentan tres casos para analizar con el mismo ángulo  $\theta = 20^\circ$  comprendido entre la rendija de entrada la rejilla de difracción y la rendija de salida (ver figura 4.36).

Caso A: Luz ultravioleta (UV cercano) con  $\lambda = 250$  nm

Caso B: Luz visible  $\lambda = 400$  nm

Caso C: Luz infrarroja (IR)  $\lambda = 1000$  nm

**CASO A: Luz ultravioleta (UV cercano) con  $\lambda = 250 \text{ nm}$**



**Figura 4.37 Trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso A: luz ultravioleta con  $\lambda = 250 \text{ nm}$ .**

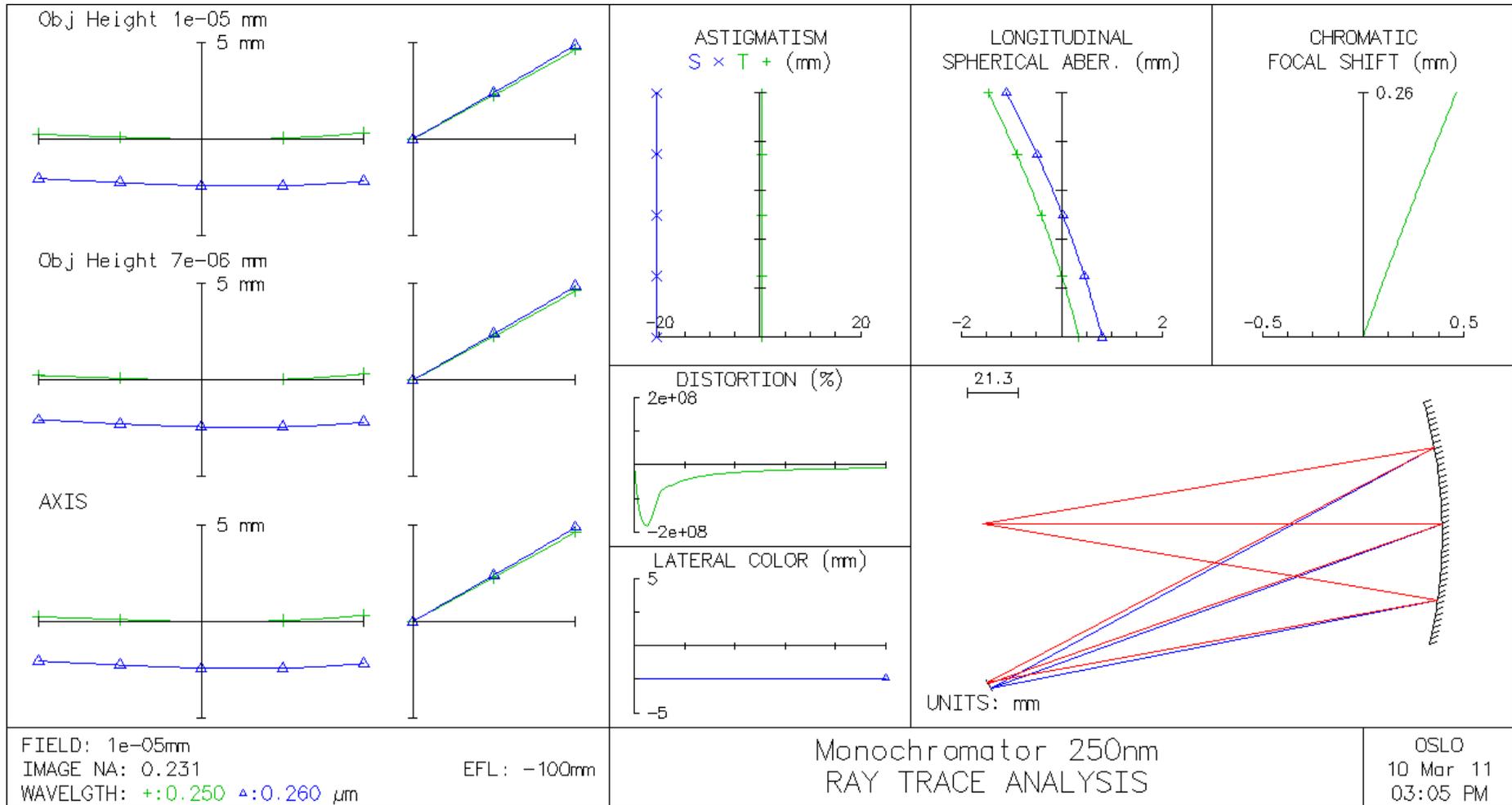
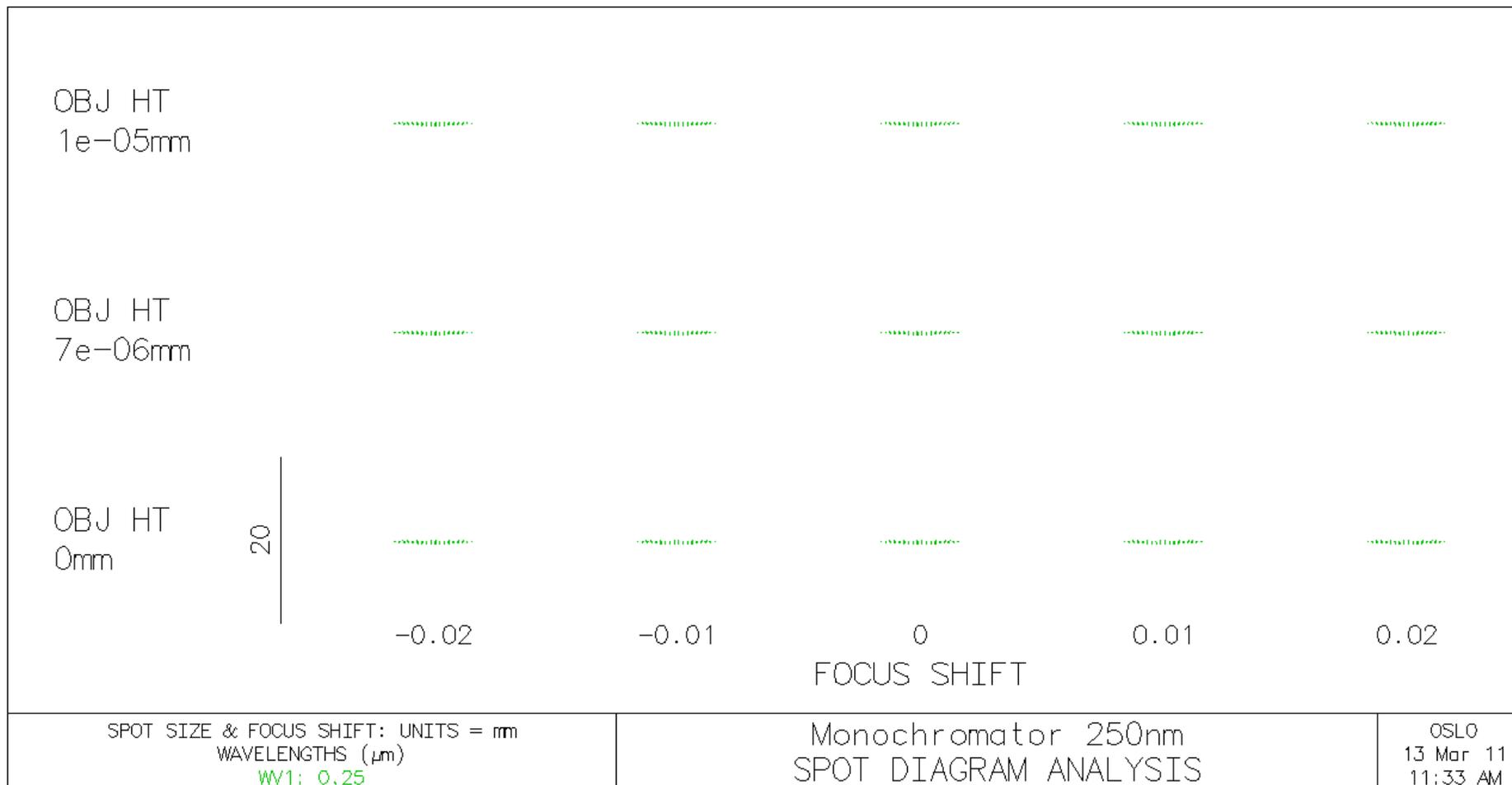
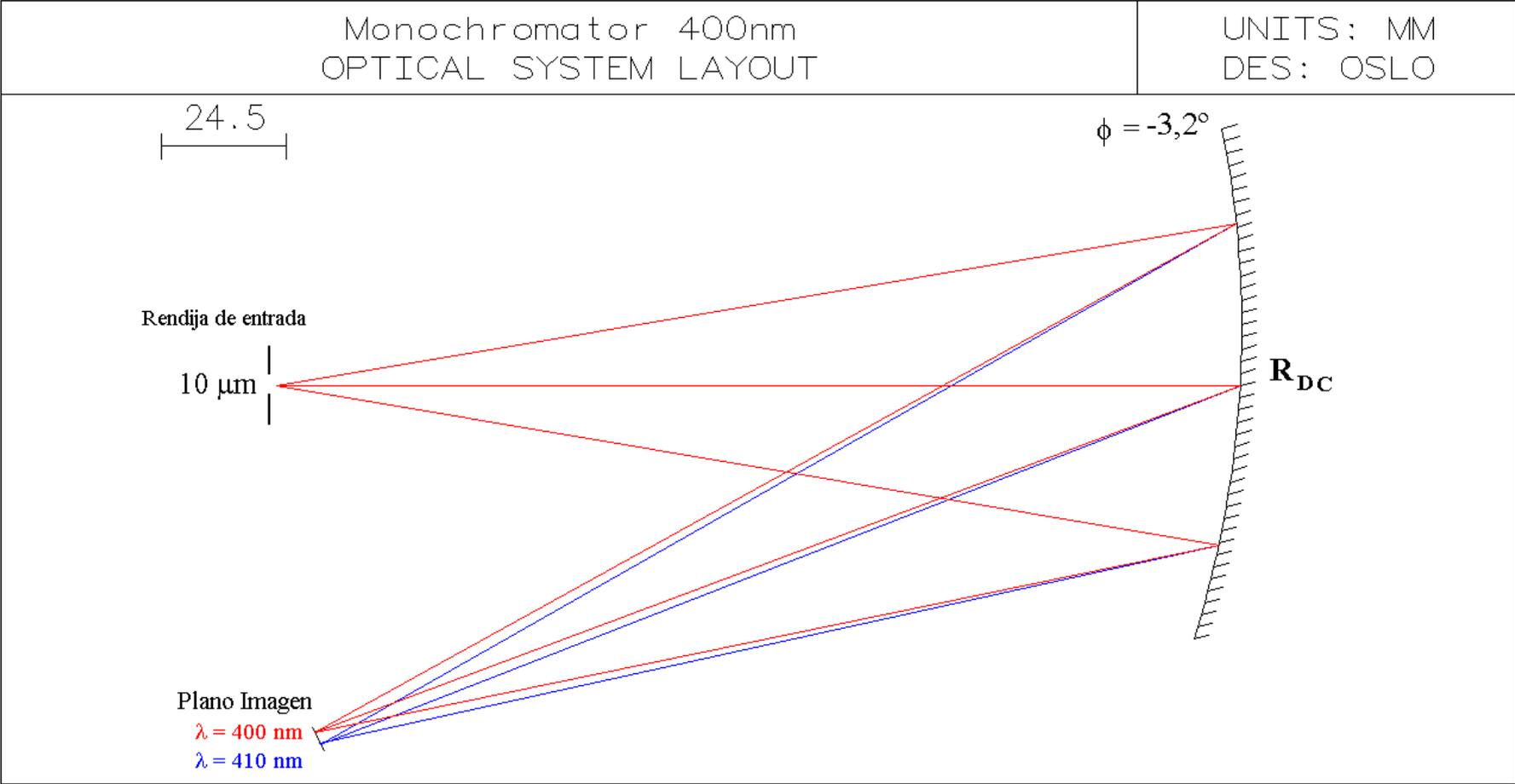


Figura 4.38 Análisis del trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso A: luz ultravioleta con  $\lambda = 250$  nm.



**Figura 4.39** Análisis del diagrama de manchas (spot) para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso A: luz UV con  $\lambda = 250$  nm.

**CASO B: Luz visible  $\lambda = 400 \text{ nm}$**



**Figura 4.40 Trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso B: luz visible  $\lambda = 400 \text{ nm}$ .**

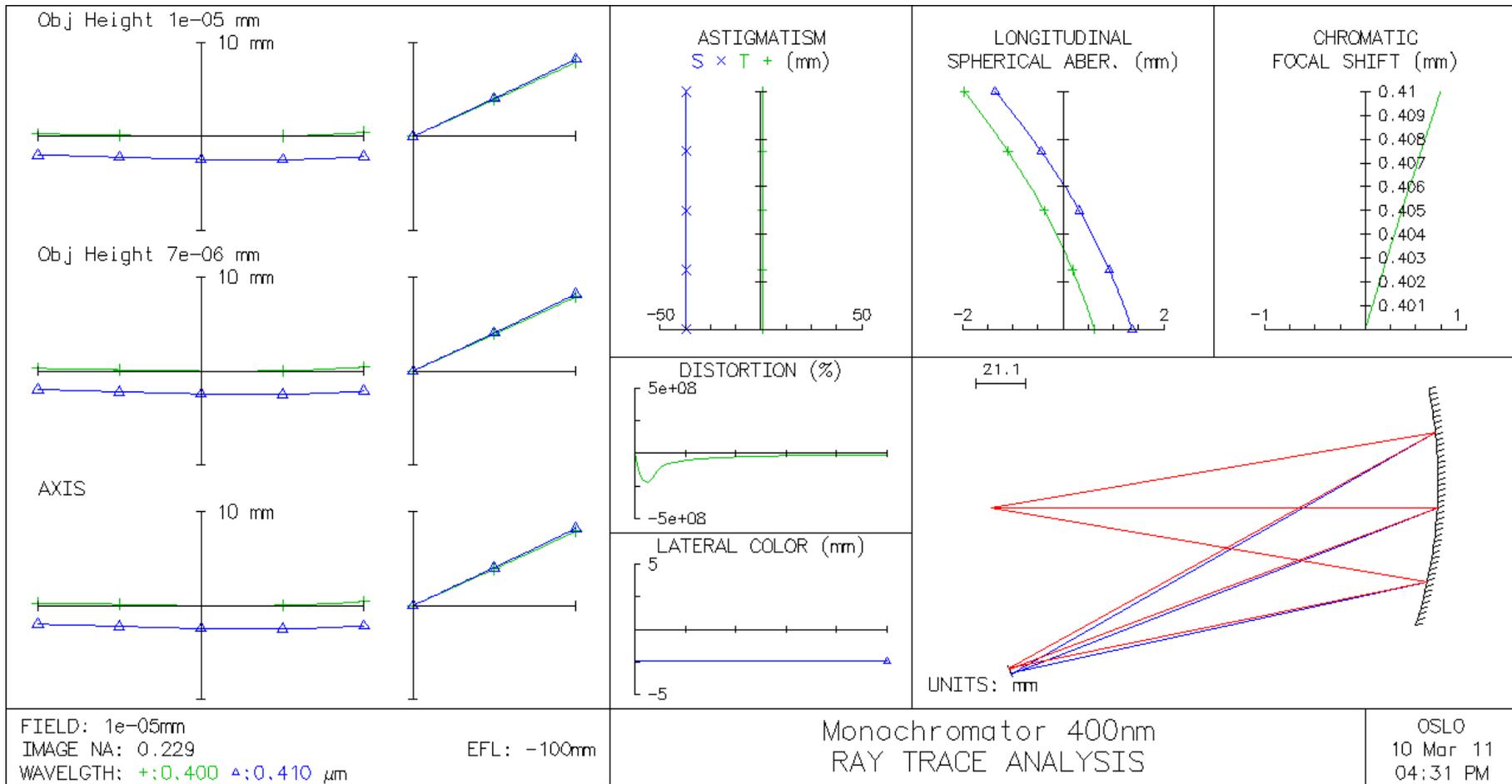


Figura 4.41 Análisis del trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso B: luz visible  $\lambda = 400$  nm.

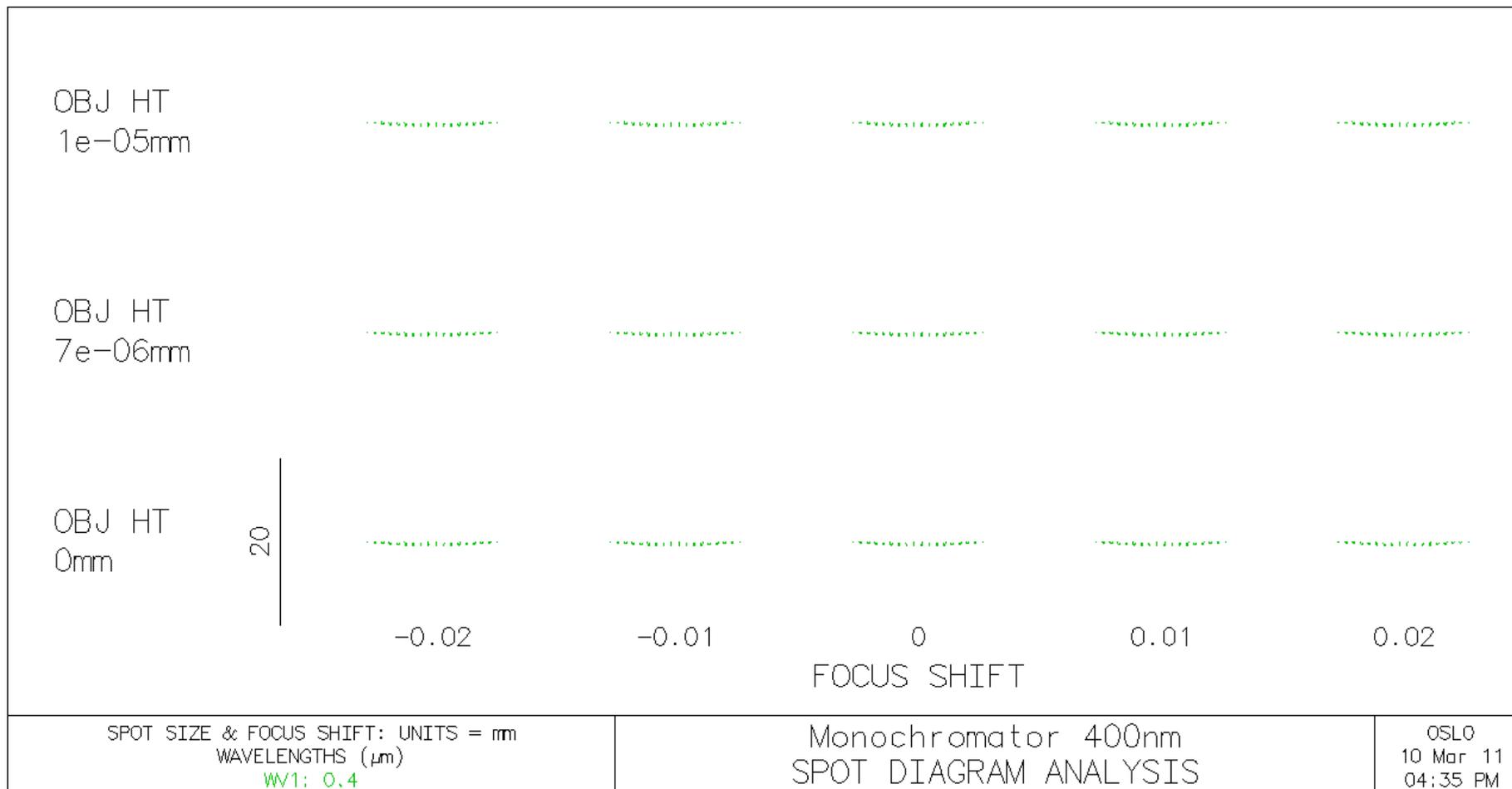
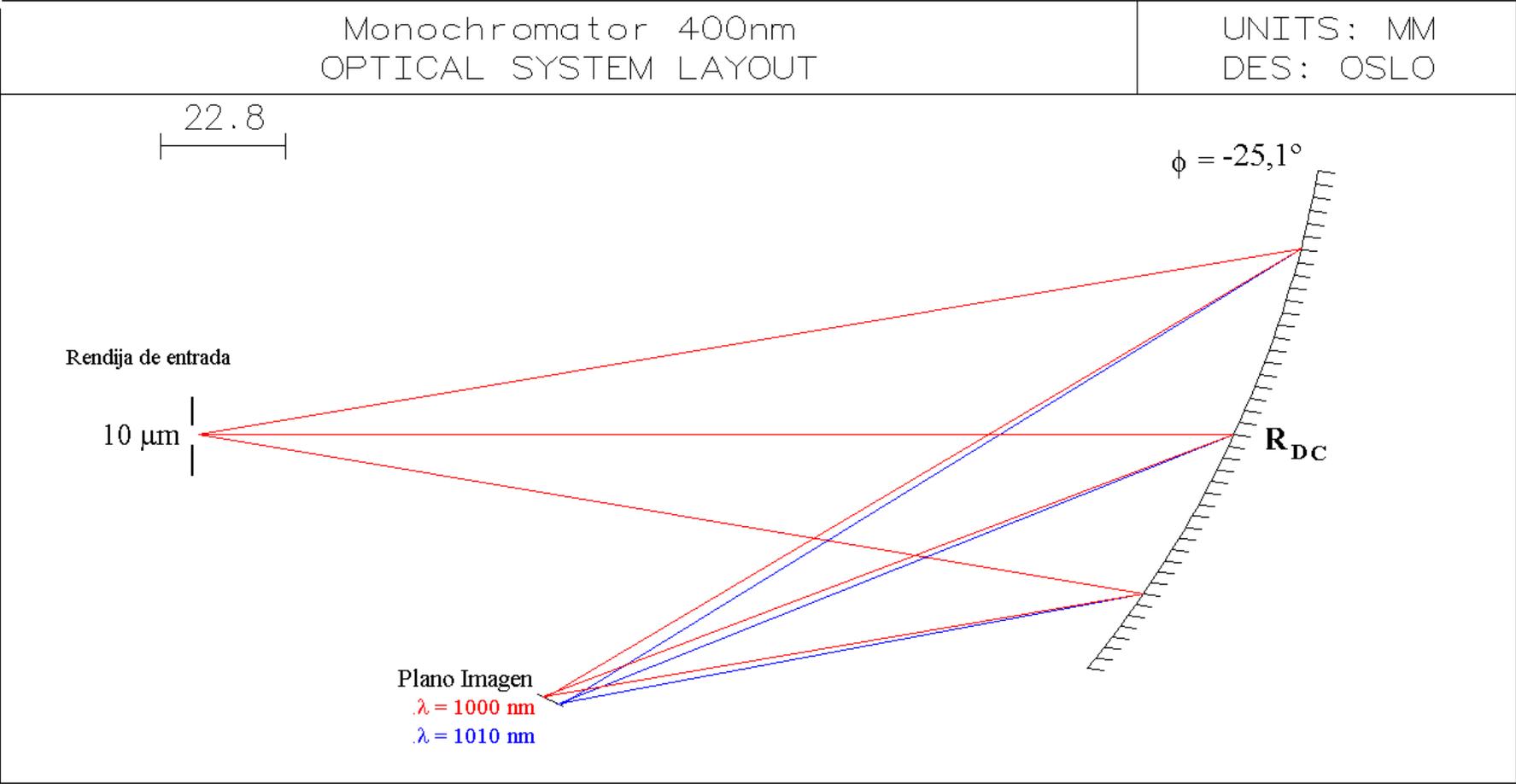


Figura 4.42 Análisis del diagrama de manchas (spot) para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso B: luz visible  $\lambda = 400$  nm.

**CASO C: Luz infrarroja (IR)  $\lambda = 1000 \text{ nm}$**



**Figura 4.43 Trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso C: luz IR  $\lambda = 1000 \text{ nm}$ .**

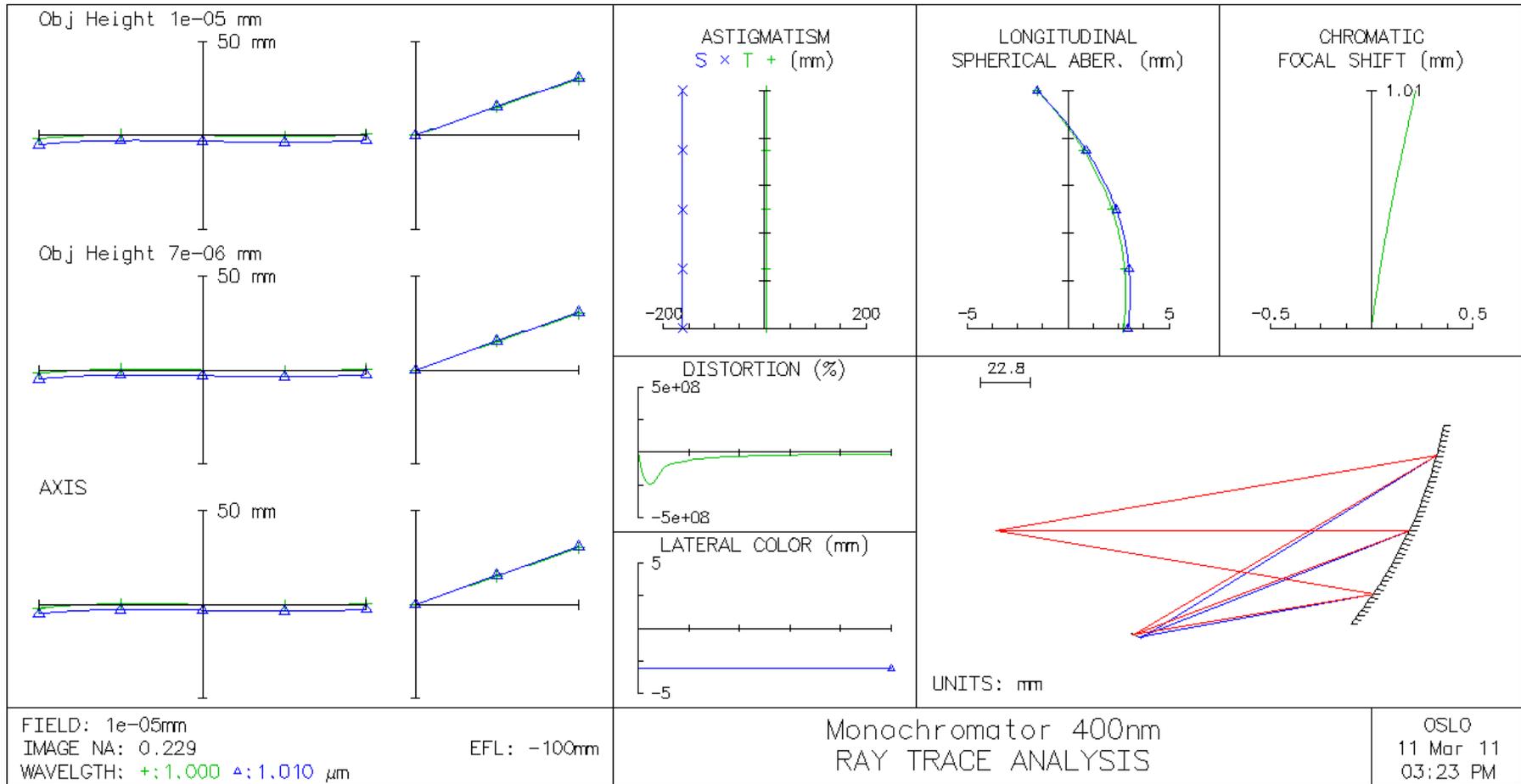
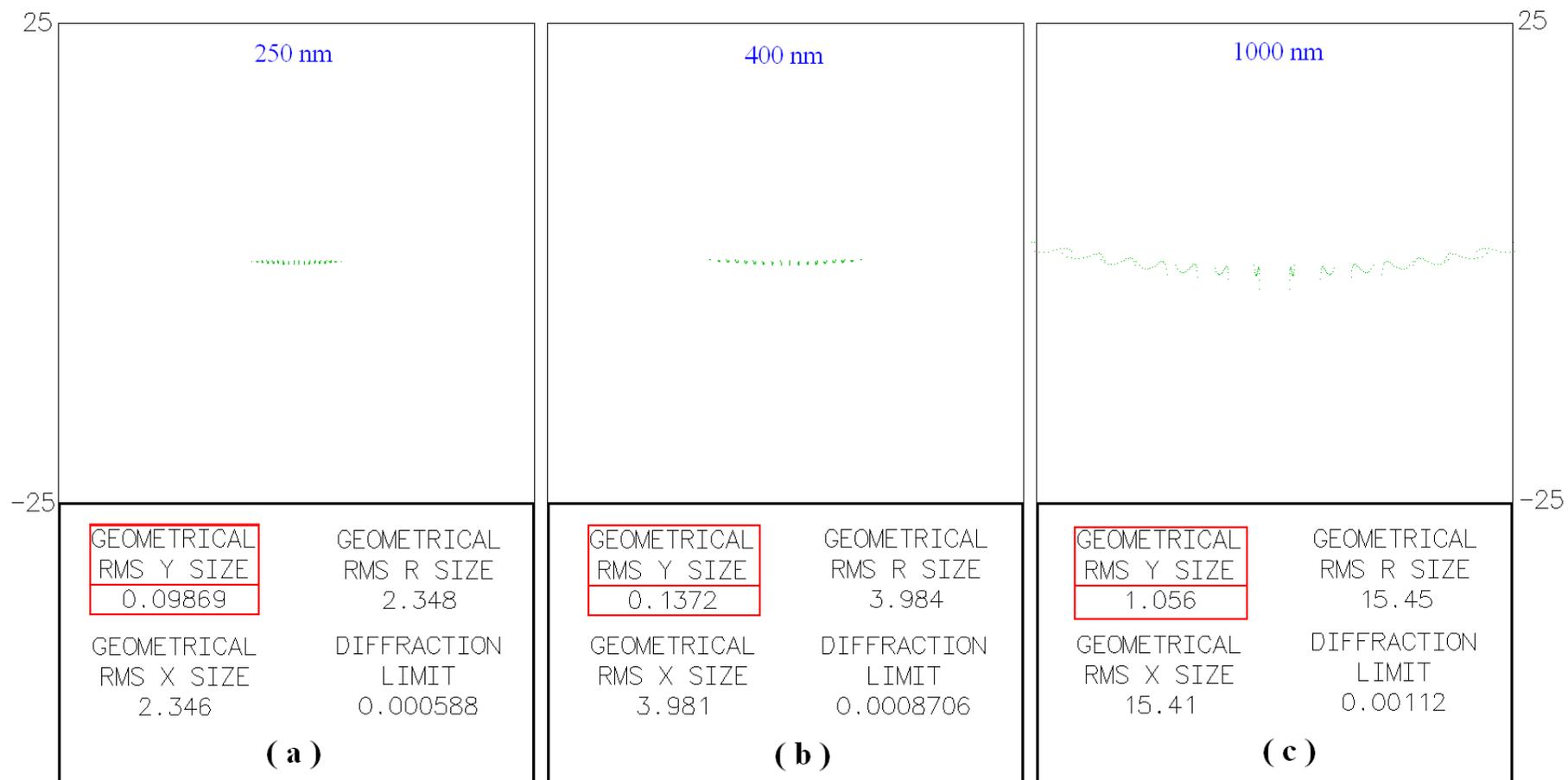


Figura 4.44 Análisis del trazo de rayos para el monocromador Mc-Pherson 272 en el caso C: luz IR  $\lambda = 1000$  nm.



**Figura 4.45** Análisis de las dimensiones del diagrama de manchas (spot) para el monocromador Mc-Pherson 272.

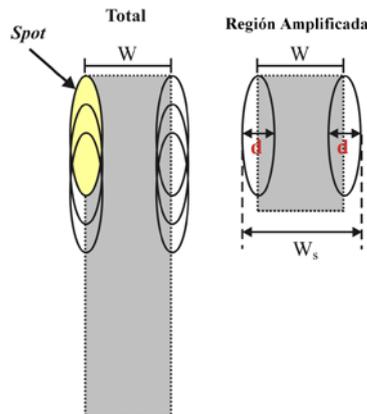
(a) Caso A: luz ultravioleta con  $\lambda = 250$  nm; (b) Caso B: luz visible  $\lambda = 400$  nm; (c) Caso C: luz IR  $\lambda = 1000$  nm.

**Tabla 4.6 Comparación de las aberraciones en cada uno de los sistemas ópticos del monocromador Mc-Pherson.**

	ABERRACIONES				
	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	Astigmatismo transversal (mm)	Astigmatismo sagital (mm)	Aberración esférica longitudinal máxima (mm)
<b>Caso A</b>	190.0	191.5	0	20	2
<b>Caso B</b>	190.0	177.8	0	50	2
<b>Caso C</b>	190.0	93.0	0	160	3

### Cálculo del ancho de la imagen de la rendija de entrada

Se sabe que el “diagrama de manchas” es la representación de un punto objeto sobre el plano imagen para el sistema óptico que se está analizando. En nuestro caso nos interesa conocer el ancho de la imagen de la rendija ( $W_s$ ). Este puede ser estimado como el ancho de la rendija multiplicado por la amplificación ideal del sistema óptico, más el ancho del spot (obtenido del diagrama de manchas (spot)); tal como se muestra en la ecuación 4.9. En la figura 4.46 se muestra un diagrama que estima el ancho de la imagen de la rendija, y



**Figure 4.46 Imagen ideal de la rendija superpuesta con la imagen de los puntos del borde de la rendija (spots).**

Ancho de la rendija =  $10\mu\text{m}$

$W$  = ancho de la rendija x amplificación ideal del sistema óptico

$d$ : el valor RMS del ancho del spot

$$W_s = W + d \quad (4.9)$$

### Cálculo de la resolución del monocromador MC-Pherson modelo 272

La resolución del monocromador ( $R_s$ ) lo hemos definido como el ancho de la imagen de la rendija ( $W_s$ ) multiplicado por la inversa de la dispersión lineal ( $D_L$ ), tal como se muestra en la ecuación 4.10.

$$R_s = W_s \cdot D_{-L} \quad (4.10)$$

**Tabla 4.7 Datos de los tamaños del spot de cada sistema óptico del monocromador Mc-Pherson y sus respectivas resoluciones ópticas.**

	Dispersión lineal DL (nm/mm)	RMS de la longitud del spot en el eje Y (mm)	Resolución óptica (nm)
<b>Caso A</b>	4.0	0.0987	0.43
<b>Caso B</b>	4.0	0.1372	0.59
<b>Caso C</b>	3.3	1.0560	3.52

#### 4.2.1 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ÓPTICOS A, B Y C

1. En los gráficos 4.37, 4.40 y 4.43, así como en la tabla 4.6 se observa una disminución de la longitud entre la rejilla de difracción y el plano imagen ( $L_2$ ). La luz infrarroja enfoca sobre el plano imagen a casi la mitad de longitud de la luz ultravioleta. Por lo que este monocromador puede ser usado en diferentes rangos espectrales modificando la posición y orientación de la rendija de salida que se encuentra en el plano imagen.

2. El tamaño del color lateral da a conocer la longitud en milímetros del espectro de luz que se proyecta sobre el plano imagen. La longitud del color lateral para cada caso que proyecta un espectro de luz de 10 nm de ancho espectral es como sigue:

Color lateral del caso A = 2,5 mm

Color lateral del caso B = 2,5 mm

Color lateral del caso C = 3,0 mm

Se observa que el color lateral casi se mantiene en el rango UV (250 nm) al visible (400 nm).

- 3.** Los sistemas ópticos A, B y C han sido optimizados haciendo el valor del astigmatismo transversal casi cero.
  
- 4.** En la tabla 4.6 se observa que el astigmatismo sagital crece cuando la longitud de onda es mayor, mientras que la aberración esférica máxima para cada sistema es casi la misma.
  
- 5.** En la tabla 4.7 se observa que el ancho RMS del spot en el eje Y (paralelo a la rendija de entrada) crece para el sistema óptico con longitud de onda mayor. El ancho RMS del spot para una línea espectral en el infrarrojo (1000 nm) es 10 veces mayor que el de una línea espectral del UV (250 nm). Pues la imagen de la rendija de entrada se encuentra desenfocada.
  
- 6.** En la tabla 4.7 se observa que la resolución óptica del monocromador en el ultravioleta y en el visible es cercana a 0,5 nm; y esta disminuye en el infrarrojo en casi 7 veces.
  
- 7.** En la figura 4.45 se observa que la forma del spot pasa de una forma casi lineal (luz ultravioleta) a una forma de curvatura pronunciada (luz infrarroja). Es así que cuando el monocromador se utiliza en el infrarrojo, se debe adicionar alguna óptica antes de la rendija de salida para que la luz enfoque adecuadamente sobre el detector de luz.

# CAPITULO 5

## DISEÑOS ÓPTICOS PARA UN ESPECTROFOTÓMETRO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO

Un espectrofotómetro es un instrumento necesario en el Laboratorio de Óptica de la Universidad Nacional de Ingeniería para medir espectros de transmitancia y absorbancia de materiales fotosensibles y poder optimizar su elaboración. Ante esta necesidad, se propone dos formas de diseños para construir un espectrofotómetro.

### 5.1. SISTEMA 1: DISEÑO DE ESPECTROFOTÓMETRO CON UN MONOCROMADOR CZERNY-TURNER

Este diseño es el más clásico, consta de un monocromador Czerny-Turner y un sistema óptico para dirigir el haz de luz cuasi-monocromático proveniente del monocromador hacia la muestra en estudio. Se ha propuesto un monocromador de 0.25 nm de resolución alrededor de 633 nm, cuyo montaje se muestra en la figura 5.1. El rango espectral de aplicación que se propone está entre 400 nm a 800 nm.

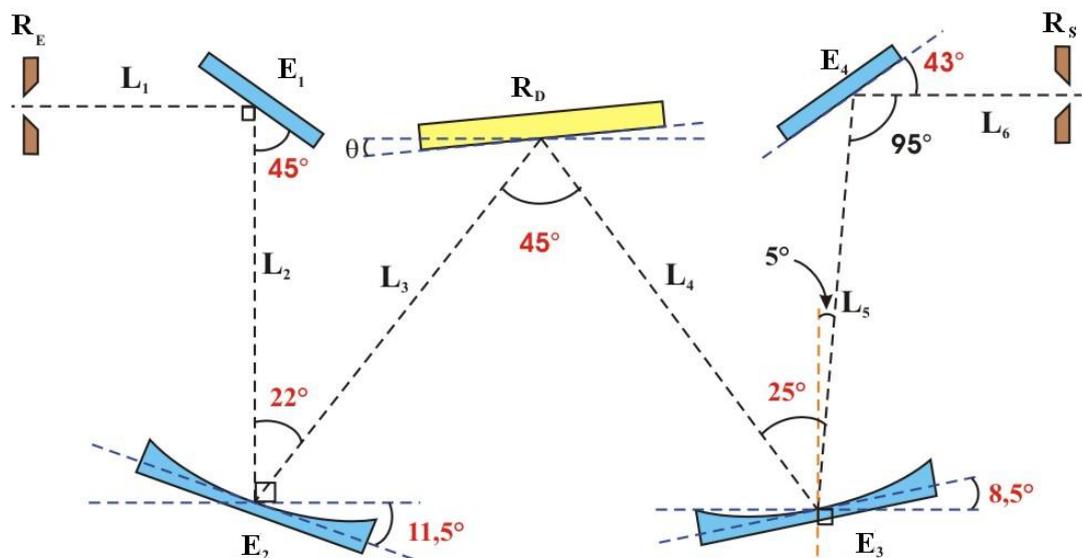


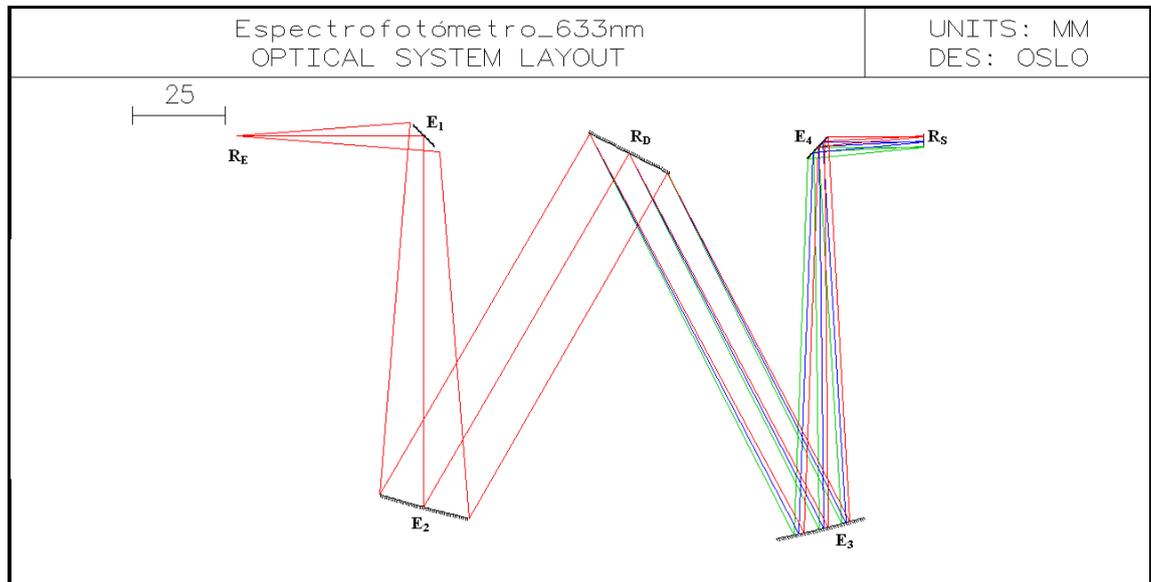
Figura 5.1 Montaje de un monocromador Czerny-Turner para un espectrofotómetro en el rango espectral de 400 nm a 800 nm.

La descripción de los elementos del monocromador se da a conocer en tabla 5.1.

**Tabla 5.1. Descripción de los parámetros físicos del monocromador Czerny-Turner.**

R <sub>E</sub>	rendija de entrada de 10 μm
R <sub>S</sub>	rendija de salida de 10 μm
E <sub>1</sub> , E <sub>4</sub>	Espejos planos circulares de 10 mm de diámetro
E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	Espejos cóncavos de 150 mm de distancia focal y 25 mm de diámetro
L <sub>1</sub>	50 mm
L <sub>2</sub>	100 mm
L <sub>3</sub>	110 mm
L <sub>4</sub>	110 mm
L <sub>5</sub>	100 mm
L <sub>6</sub>	30 mm
R <sub>D</sub>	Rejilla de difracción de 1200 líneas por mm

En la figura 5.2 se muestra la simulación de rayos de luz del sistema óptico del monocromador, donde la rejilla está orientada de tal forma que el espectro de luz proyectado sobre la rendija de salida se encuentre alrededor de 633 nm.

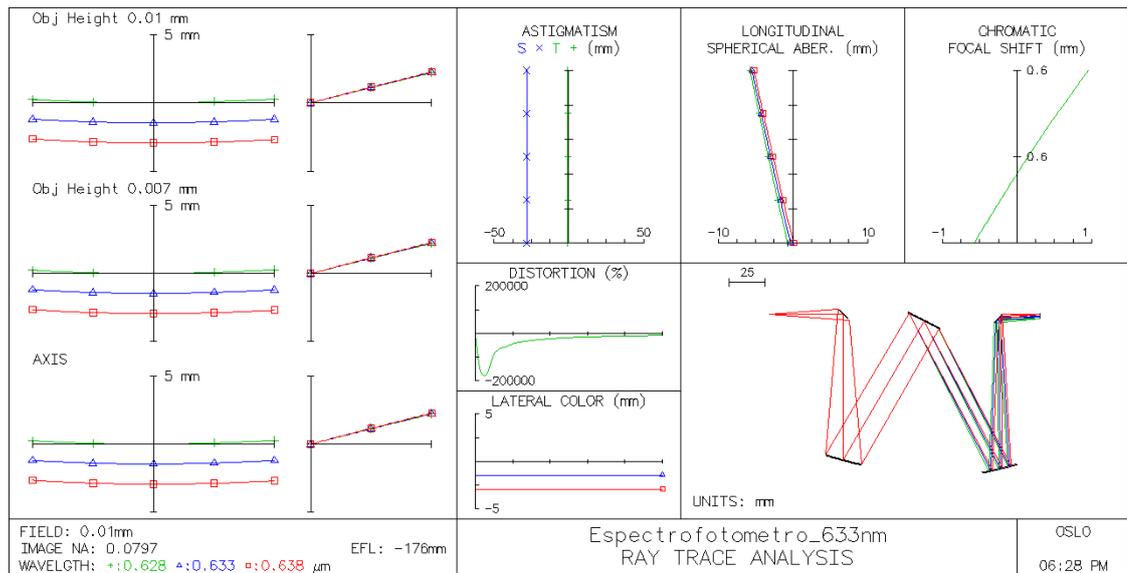


**Figura 5.2 Trazo de rayos del sistema óptico del monocromador Czerny-Turner para un espectrofotómetro en el rango espectral 400 nm a 800 nm.**

En la figura 5.3 se observa el análisis del trazo de rayos del sistema óptico mostrado en la figura 5.2. El color lateral<sup>7</sup> obtenido es de 2.95 mm contenidos en 10 nm

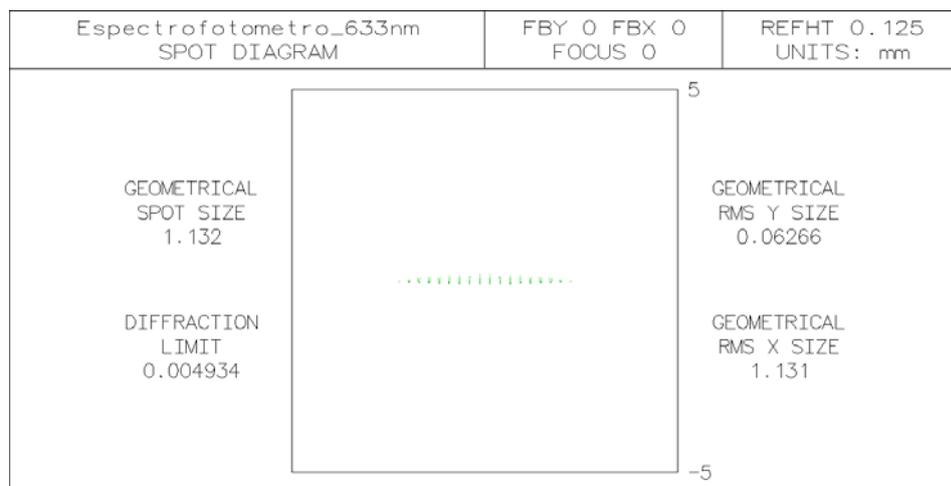
<sup>7</sup> Color lateral: en este caso representa la longitud del espectro de luz sobre el plano imagen.

alrededor de la longitud de onda central de 633 nm. Con este valor se ha obtenido la inversa de la dispersión lineal, que es igual a 3.39 nm/mm



**Figura 5.3** Análisis del trazo de rayos del sistema óptico del monocromador Czerny-Turner para un espectrofotómetro en el rango espectral 400 nm a 800 nm.

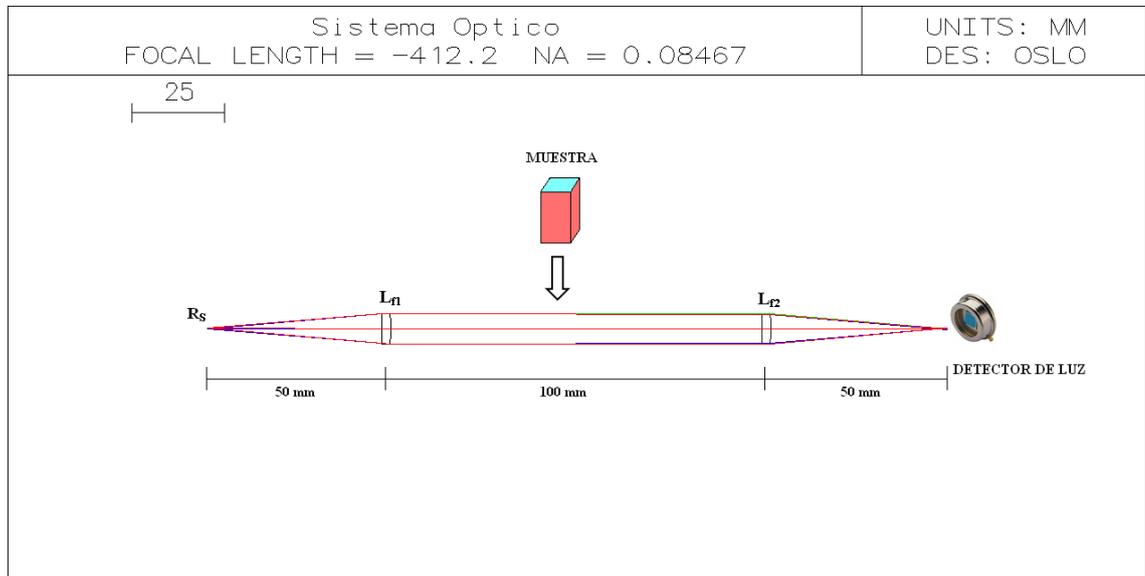
En la figura 5.4 se muestra el diagrama de manchas (spot) para la longitud de onda de 633 nm, donde el ancho RMS<sup>8</sup> en el eje Y del spot es de 62.66 μm. Usando las ecuaciones 4.9 y 4.10 se obtiene que el valor de la resolución óptica del monocromador es de 0.25 nm.



**Figura 5.4** Análisis del diagrama de manchas (spot) en escala 5 (amplificado) del sistema óptico del monocromador Czerny-Turner.

<sup>8</sup> RMS: **valor cuadrático medio** (del inglés *root mean square*), es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable.

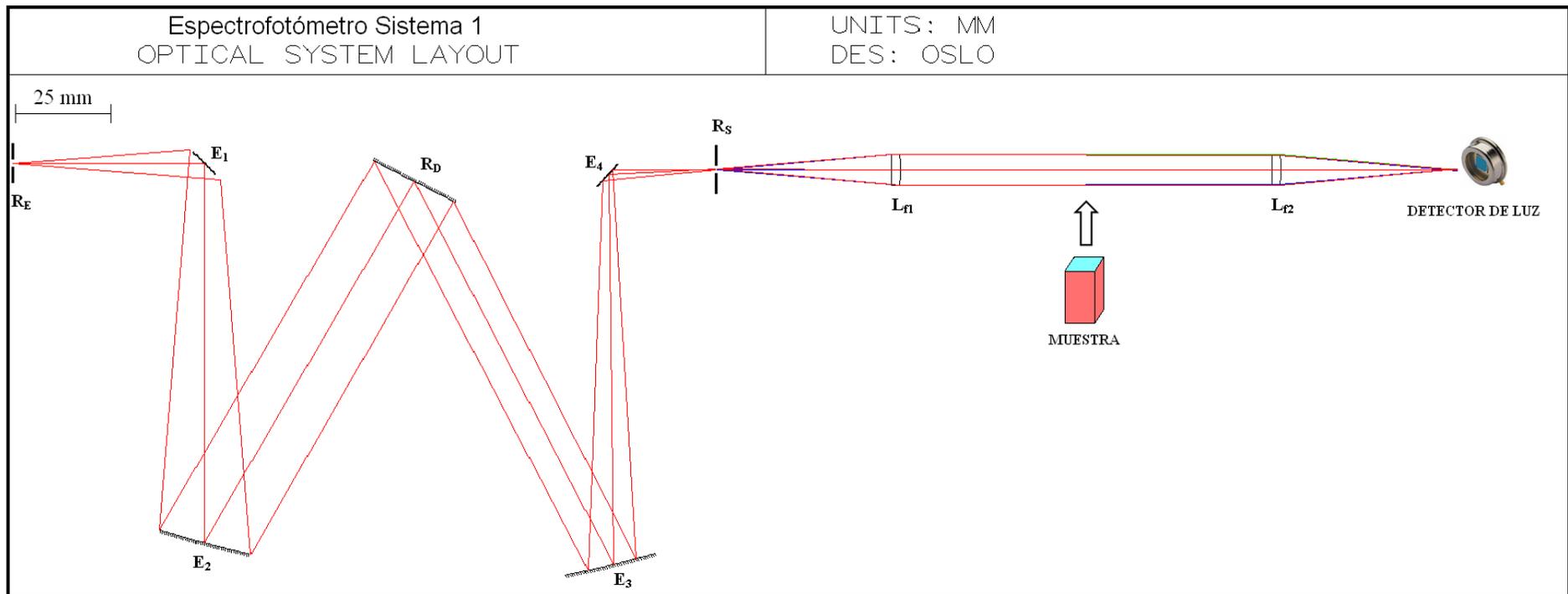
Para completar la propuesta de diseño del espectrofotómetro, se ha simulado un sistema óptico colimador para proyectar el haz de luz cuasi-monocromático a través de la muestra en estudio. Además es necesario introducir una óptica para colectar la luz proveniente de la muestra hacia el detector de luz. En la figura 5.5 se muestra el sistema óptico completo, las dimensiones de la óptica usada son similares a la de los espejos planos E<sub>1</sub> y E<sub>4</sub>.



**Figura 5.5 Sistema óptico para proyectar la luz del monocromador hacia la muestra en estudio y colectar la luz que atraviesa esta hacia el detector de luz.**

Donde  $L_{f1}$  y  $L_{f2}$  son lentes plano convexas con 50 mm de distancia focal y 10 mm de diámetro.

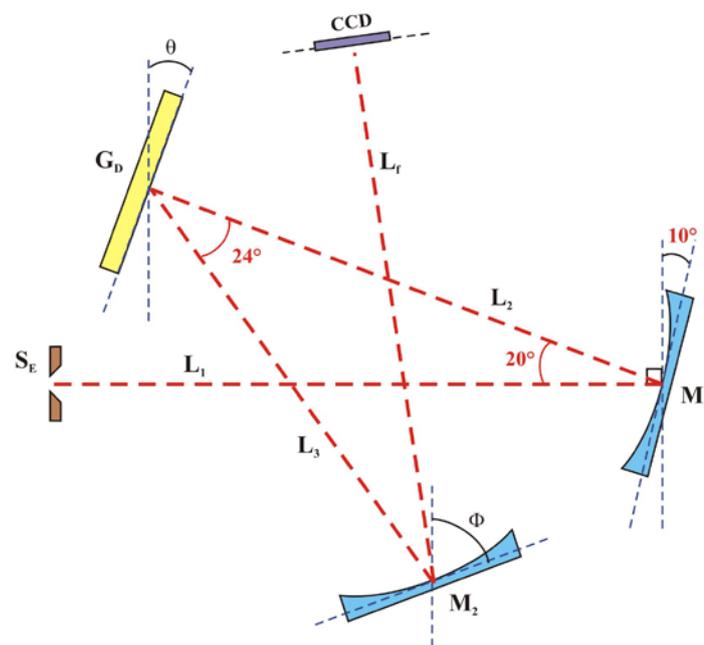
En la figura 5.6 se muestra al sistema óptico completo del espectrofotómetro en base a un monocromador Czerny-Turner. Este equipo podría analizar muestras de espesores menores a 100 mm en el rango espectral de 400 nm a 800 nm con una resolución óptica alrededor de 0.25 nm.



**Figura 5.6 Sistema óptico de un espectrofotómetro en base a un monocromador para el rango espectral visible entre 400 nm a 800 nm.**

## 5.2. SISTEMA 2: DISEÑO DE UN SISTEMA ÓPTICO PARA MEDIR TRANSMITANCIA Y ABSORBANCIA CON UN ESPECTRÓMETRO CZERNY-TURNER CRUZADO

En esta sección se propone el diseño de un espectrómetro Czerny-Turner cruzado para medir la transmitancia y absorbancia de los materiales fotosensibles. El sistema óptico que se propone para este espectrómetro se muestra en la figura 5.7. La resolución óptica es de 0.12 nm alrededor de 633 nm y tiene un rango espectral entre 400 nm a 600 nm.



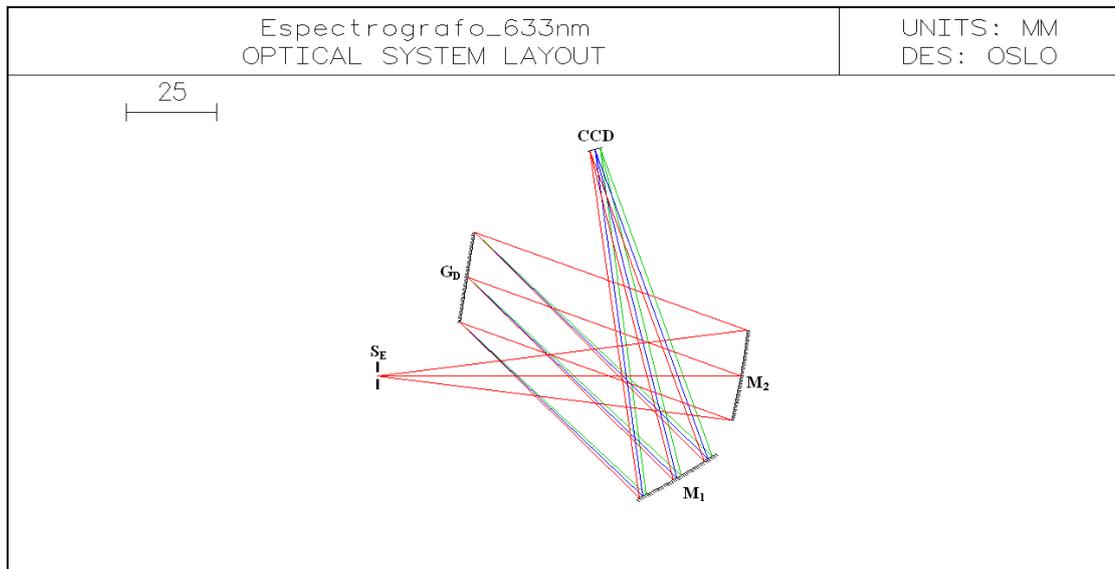
**Figura 5.7** Montaje de un espectrómetro Czerny-Turner cruzado para medir transmitancia y absorbancia en el rango espectral de 400 nm a 600 nm.

La descripción de los elementos del espectrómetro se da a conocer en tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Descripción de los parámetros físicos del espectrómetro Czerny Turner.

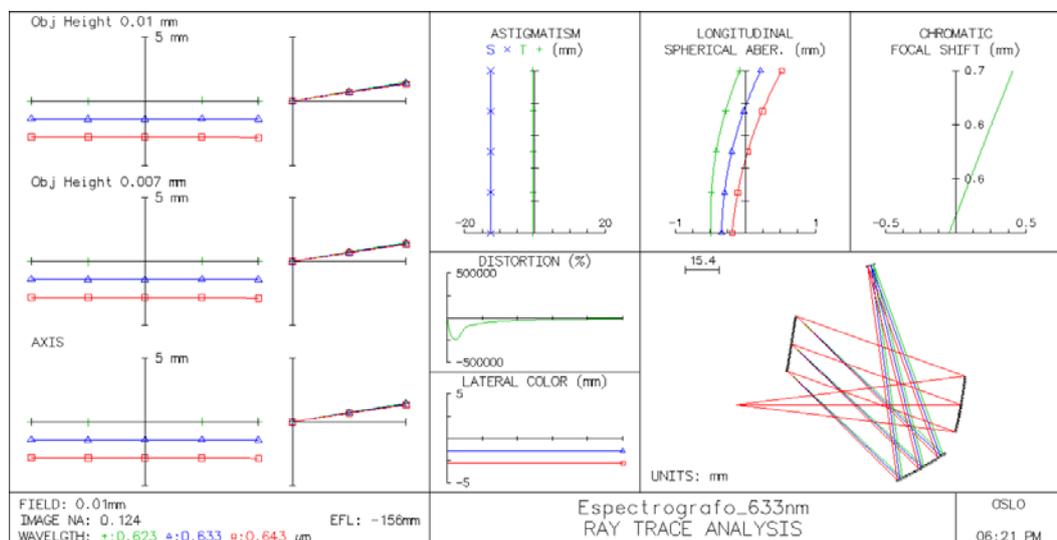
$S_E$	rendija de entrada de 10 $\mu\text{m}$
CCD	Detector de luz CCD lineal de 29 mm de longitud
$M_1, M_2$	Espejos cóncavos de 100 mm de distancia focal y 25 mm de diámetro
$L_2, L_3$	80 mm
$L_1$	100 mm
$L_f$	Longitud de enfoque al CCD lineal = 90 mm
$G_D$	Rejilla de difracción de 1200 líneas por mm

En la figura 5.8 se muestra la simulación del sistema óptico del espectrómetro, donde la rejilla está orientada de tal forma que el espectro de luz proyectado sobre el CCD se encuentre alrededor de 633 nm.



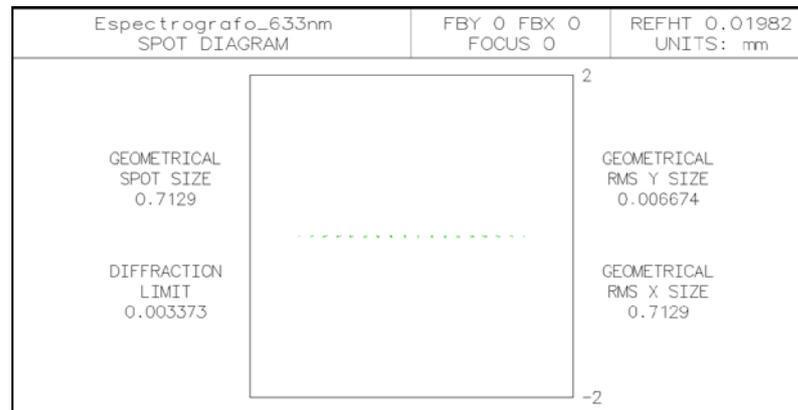
**Figura 5.8 Trazo de rayos del sistema óptico del espectrómetro Czerny-Turner cruzado para medir transmitancia y absorbancia.**

En la figura 5.9 se observa el análisis del trazo de rayos del sistema óptico mostrado en la figura 5.8. El color lateral obtenido es de 2.82 mm contenidos en 20 nm alrededor de la longitud de onda central de 633 nm. Con este valor se ha obtenido la inversa de la dispersión lineal, que es igual a 7.09 nm/mm.



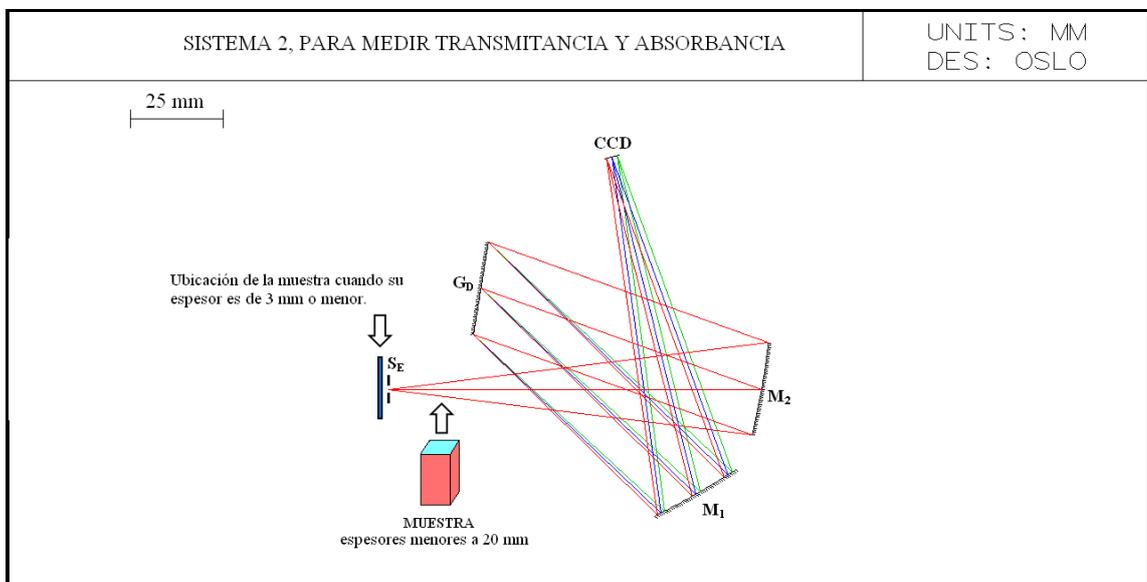
**Figura 5.9 Análisis del trazo de rayos del sistema óptico del espectrómetro Czerny-Turner cruzado alrededor de la longitud de onda central de 633 nm.**

En la figura 5.10 se muestra el diagrama de manchas (spot) para 633 nm, donde el ancho RMS en el eje Y del spot es de 6,67  $\mu\text{m}$ . Usando las ecuaciones 4.9 y 4.10 se obtiene que el valor de la resolución óptica del monocromador es de 0.12 nm.



**Figura 5.10 Análisis del diagrama de manchas (spot) en escala 2 (amplificado) del sistema óptico del espectrómetro Czerny-Turner.**

En la figura 5.11 se muestra al sistema óptico completo del espectrómetro y la ubicación de la muestra para medir sus respectivos espectros de transmitancia y absorbancia en el rango espectral de 400 nm a 600 nm. Este equipo podría analizar muestras de espesores menores a 20 mm y puede ser ubicado entre la rendija de entrada y el espejo  $M_1$ . Debido a que las muestras fotosensibles a estudiar tienen espesores entre 2 mm a 3 mm, estas pueden ser ubicadas justo antes de la rendija de entrada del espectrómetro.



**Figura 5.11 Sistema óptico de un espectrómetro para medir transmitancia y absorbancia en el rango espectral visible entre 400 nm a 600 nm.**

### 5.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS 1 y 2

En la tabla 5.3 se muestran las ventajas y desventajas del sistema 1 y 2 para medir espectros de transmitancia y absorbancia.

**Tabla 5.3. Ventajas y desventajas entre los sistemas 1 y 2.**

	<b>SISTEMA 1: ESPECTROFOTÓMETRO</b>	<b>SISTEMA 2: ESPECTRÓMETRO PARA MEDIR TRANSMITANCIA Y ABSORBANCIA</b>
<b>VENTAJAS</b>	Se pueden analizar muestras de espesores mayores que el sistema 2 (hasta casi 25 mm de espesor).	Tiene una resolución óptica (0,12 nm) mayor al sistema 1.
	Se pueden obtener espectros en un rango espectral (400 nm a 800 nm) mayor al que presenta el sistema 2.	El registro de los espectros es instantáneo, pues no requiere mover la rejilla de difracción.
	Mayor uniformidad en la resolución a lo largo del rango espectral.	La construcción de este equipo requiere de menor número de elementos ópticos, que lo hace menos costoso.
	Puede ser más sensible de acuerdo al detector de luz que se utilice.	Es adecuado para medir los espectros de transmitancia y absorbancia de las muestras fotosensibles que se estudia en el laboratorio de óptica por tener espesores pequeños.
<b>DESVENTAJAS</b>	Tiene una resolución óptica (0,25 nm) menor al sistema 2.	Su rango espectral de detección (de 400 nm a 600 nm) es menor que el sistema 1.
	Requiere un mayor tiempo para adquirir el espectro de transmitancia o absorbancia, pues la rejilla debe moverse para el registro de cada longitud de onda.	Se pueden analizar muestras de espesores (hasta 3 mm) menores que el sistema 1.
	Requiere de mayor número de elementos ópticos para su construcción.	

#### 5.4. IMPLEMENTACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO CZERNY-TURNER CRUZADO A PARTIR DEL SISTEMA ÓPTICO 2

En base al sistema óptico 2 se ha implementado un espectrómetro Czerny-Turner cruzado con las siguientes características ópticas:

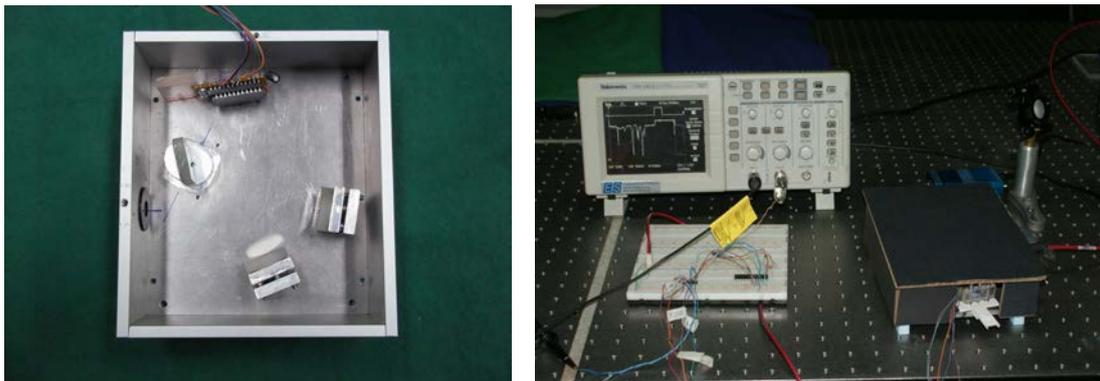
<b>Características físicas</b>	
Dimensiones:	162 mm x 142 mm x 50 mm
Masa	500 gramos
<b>Detector óptico</b>	
Tipo	CCD lineal de silicio Sony ILX526A
Rango espectral del sensor	200-1100 nm
Número de píxeles	3000 píxeles
Tamaño de cada píxel	7 $\mu$ m X 200 $\mu$ m
<b>Características ópticas</b>	
Diseño	Sistema simétrico Czerny-Turner cruzado
f-número	f/4
Tamaño de la óptica	25 mm (referencia: diámetro de los espejos)
Longitud focal	100 mm
Ancho de la rendija de entrada	20 $\mu$ m
Rejilla de difracción	600 líneas / mm (Blaze= 500 nm)
Fibra óptica	600 $\mu$ m de diámetro / 0.37 de apertura numérica
Rango espectral del espectrómetro	370 nm - 700 nm
Resolución óptica	$\sim$ 0.3 - 0.5 nm
Señal / ruido	100:1 (registrada con la señal máxima)

En la figura 5.12 se muestran fotos de algunos elementos mecánicos y ópticos que son parte del espectrómetro implementado. Mientras que en la figura 5.13 se muestran fotos del espectrómetro Czerny-Turner que se ha implementado.

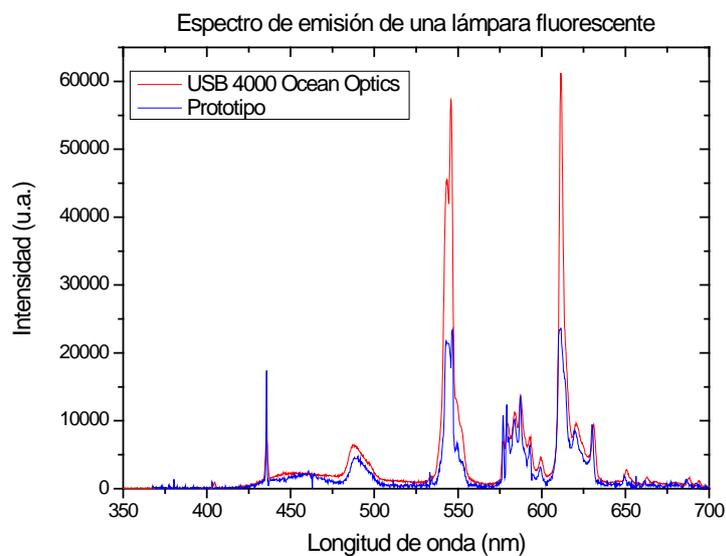
Luego de implementar el espectrómetro, se ha procedido a calibrarlo en base al registro de algunos espectros de fuentes conocidas. En la figura 5.14 se muestra el espectro de una fuente de luz de un fluorescente registrado con el espectrómetro implementado y con un espectrómetro calibrado desde fábrica, este último es un espectrómetro USB 4000 de la empresa Ocean Optics.



**Figura 5.12.** Fotos de los elementos mecánicos y un espejo que son parte del espectrómetro.



**Figura 5.13.** Izquierda: espectrómetro Czerny-Turner implementado, derecha: registro de la luz de un fluorescente con el espectrómetro.



**Figura 5.14.** Espectros de luz de un fluorescente registrados con el espectrómetro implementado (curva azul) y con un espectrómetro USB 40000 (curva roja).

En la tabla 5.4 se muestra un listado aproximado de los elementos necesarios para construir el espectrómetro. Los precios son referenciales al año 2012, sin recargo por importación y sin el costo por desaduanaje.

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio ( nuevos soles)</b>
Rendija de entrada	1	235
Espejo cóncavo	2	260
Rejilla de difracción	1	255
Fibra óptica	1	230
CCD lineal	1	50
Otros elementos y conectores	varios	300
Elementos electrónicos	varios	50
Piezas de aluminio	varios	100
Maquinado de las piezas de aluminio	varios	200
<b>TOTAL</b>		<b>1680</b>

El precio de un espectrómetro USB 4000 de Ocean Optics es de 7500 nuevos soles sin gastos de importación ni desaduanaje. El espectrómetro USB 4000 tiene similares características ópticas, pero tiene una electrónica más desarrollada; tiene su propio programa de control en entorno Windows.



La preparación de estas emulsiones de gelatina dicromatada se obtuvieron bajo una temperatura promedio de 20°C y una humedad menor a 60 %.

La gelatina dicromatada, fue preparada, en un vaso combinando, en primera instancia, agua destilada y gelatina comercial incolora en una proporción 100:10 en peso. Utilizando una parrilla eléctrica con agitador magnético se calienta primero el agua hasta alcanzar una temperatura aproximada de 70°C, a continuación se agrega poco a poco la gelatina hasta que este disuelta por completo durante un tiempo aproximado de 30 minutos. Luego de disolver la gelatina, se añade el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en una concentración equivalente al 0.9% del peso total de la mezcla anterior, se continua con la mezcla durante 10 minutos más y finalmente se retira el vaso con la mezcla del agitador magnético. En la figura 1 se muestran algunas fotos del proceso de preparación.

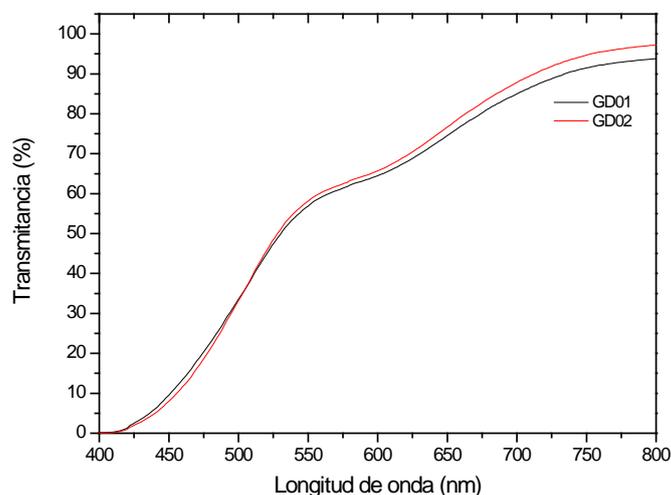


**Figura 6.2 Emulsiones de gelatina dicromatada elaboradas en el Laboratorio de Óptica.**

Para la elaboración de placas fotosensibles, la gelatina dicromatada aún líquida se extiende uniformemente sobre substratos de vidrio de 5cm de lado y 2 mm de espesor. Los substratos se colocaron sobre una mesa previamente nivelada. Luego se dejan secar las muestras por evaporación del agua durante un período de 12 horas antes de ser expuestas (Figura 6.2). El grosor de las películas sobre los substratos varía desde 50  $\mu\text{m}$  a 90  $\mu\text{m}$ .

## 6.2 MEDIDAS DE TRANSMITANCIA Y ABSORBANCIA EN EMULSIONES DE GELATINA DICROMATADA

Para optimizar la elaboración de las emulsiones fotosensibles se realizaron pruebas de transmitancia y absorbancia de las muestras antes de realizar el registro holográfico.



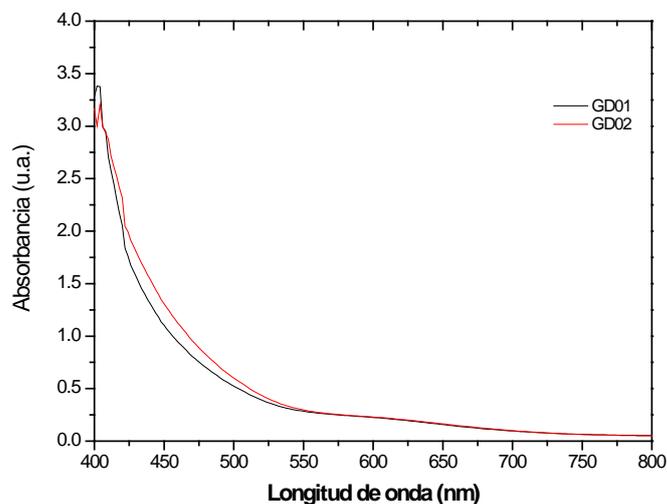
**Figura 6.3 Espectros de transmitancia de emulsiones de gelatina dicromatada usando el monocromador Czerny-Turner Jobin-Yvon H-25.**

En la figura 6.3 se muestran los espectros de transmitancia de las emulsiones fotosensibles, usando el monocromador Czerny –Turner que se automatizó y se describió en el Capítulo 4 de esta tesis. Las emulsiones fueron ubicadas en la rendija de salida para registrar los espectros de transmitancia.

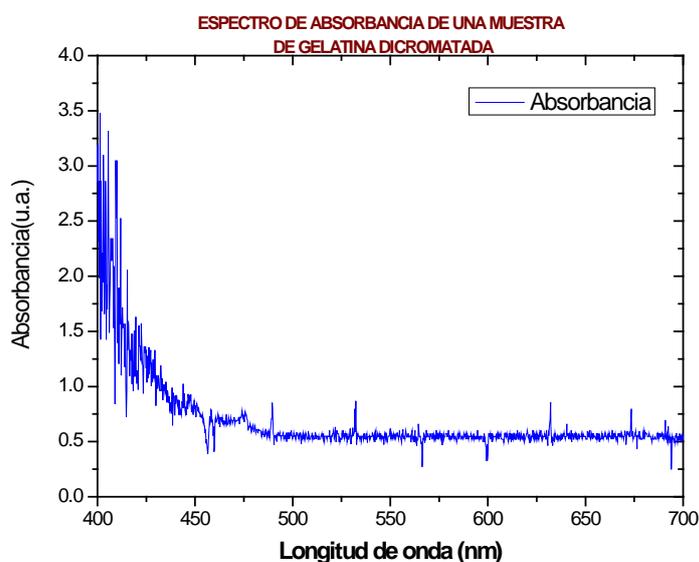
En los espectros de transmitancia se puede observar que la emulsión fotosensible transmite al 50% para longitudes mayores a 500 nm, siendo casi 100% transparente para longitudes de onda en el infrarrojo cercano.

En la figura 6.4 se muestran los espectros de absorbancia de las emulsiones fotosensibles, usando el mismo monocromador Czerny –Turner que se utilizó para obtener los espectros de transmitancia.

En los espectros de absorbancia se puede observar que la emulsión es fotosensible en el rango ultravioleta (UV) y visible azul. La ligera diferencia de los espectros de transmitancia y absorbancia entre las dos muestras en estudio, puede estar relacionada con la elaboración de estas (niveles de concentración, condiciones ambientales, entre otras). Este estudio corresponderá a un próximo trabajo de investigación del grupo de óptica.



**Figura 6.4** Espectros de absorbancia de emulsiones de gelatina dicromatada usando el monocromador Czerny-Turner Jobin-Yvon H-25.



**Figura 6.5** Espectro de absorbancia de una emulsión de gelatina dicromatada usando el espectrómetro Czerny-Turner cruzado que se ha implementado.

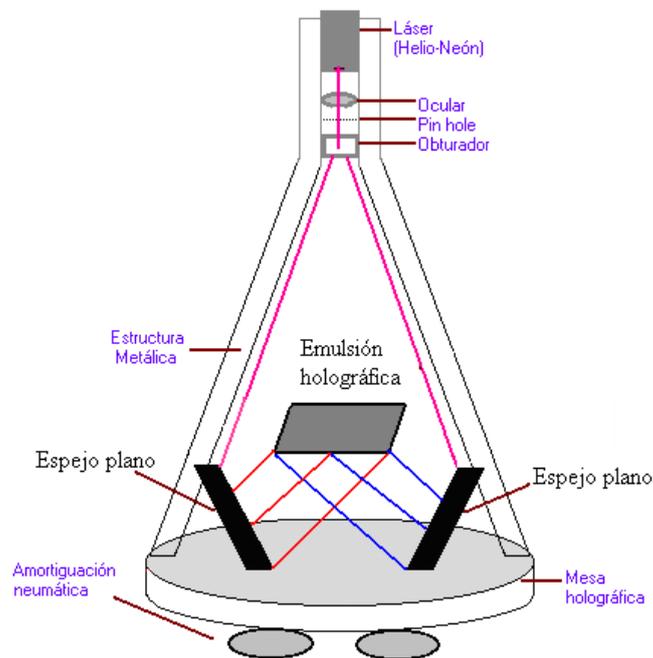
En la figura 6.5 se muestra el espectro de absorción de la muestra de gelatina dicromatada GD1 usando el espectrómetro Czerny-Turner que se ha implementado y que se describe en el capítulo 5 de la tesis. Este espectro es de forma similar al espectro de absorbancia obtenido con el monocromador Czerny-Turner que se presenta en la figura 6.4. Este resultado es establecido en el rango espectral de 400 nm a 700 nm.

### 6.3 GRABADO DE REJILLAS HOLOGRÁFICAS SOBRE EMULSIONES DE GELATINA DICROMATADA

Para el grabado de rejillas holográficas se utilizó dos sistemas de interferencia óptica que se describen a continuación:

#### 6.3.1 Equipo holográfico de geometría vertical

En el Laboratorio de Óptica de la Universidad Nacional de Ingeniería se ha construido un equipo holográfico de geometría vertical, el cual se describe en la figura 6.6.



**Figura 6.6 Esquema del equipo holográfico de geometría vertical del laboratorio de Óptica de la UNI.**

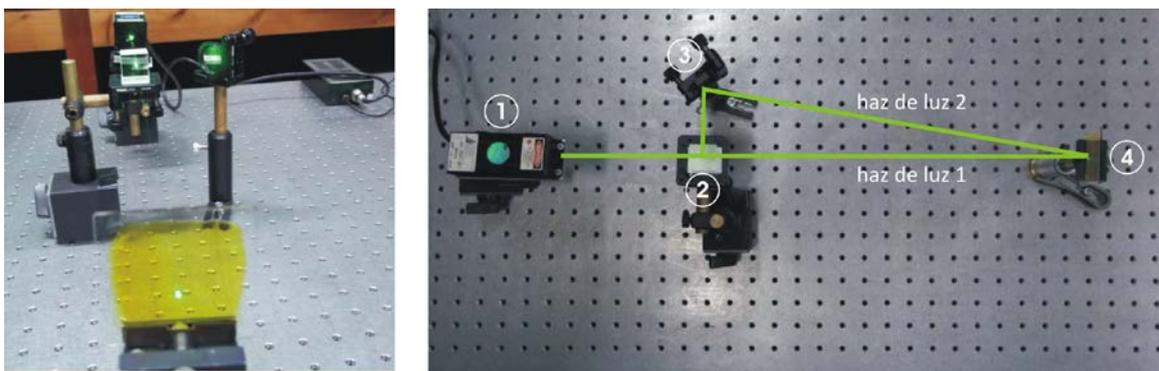
La parte superior del portamuestra (donde se coloca la emulsión) se encuentra cubierta, de tal forma que sólo se registra la interferencia de los haces de luz que reflejan en los espejos planos (parte inferior del portamuestra).

A continuación se describen los elementos del equipo holográfico de geometría vertical.

- 1. Banco óptico:** el banco óptico consta de una mesa circular de 18 cm de radio de acero inoxidable y de 50Kg de peso. Sobre esta mesa se ha montado un juego de postes de amortiguación neumática y una estructura metálica de 1,8 m de alto; sobre esta última se dispone la mayoría de los elementos ópticos del equipo.
- 2. Láser:** el láser empleado es de Helio- Neón marca “ Metrologic ” de 8 mW de potencia; lo cual posibilita irradiancias netas sobre las emulsiones, con máximo del orden de  $0,1 \text{ W/m}^2$ . Este láser se dispuso en la parte superior de la estructura metálica, apuntando al centro de la mesa de acero.
- 3. Filtro espacial:** este filtro está constituido de un objetivo de microscopio y de un orificio “pin hole”, el cual se ajusta por debajo de la cavidad de salida del láser, de tal manera que la mesa queda iluminada homogéneamente.
- 4. Obturador:** el equipo posee un obturador fotográfico que permite seleccionar lapsos de tiempo del orden de minutos. La posición del obturador se encuentra a una altura intermedia entre la mesa de acero y el filtro espacial.
- 5. Espejos planos:** Está formado por dos espejos elaborados en el mismo laboratorio de óptica (por el método de evaporación al vacío).
- 6. Porta muestra:** se tienen diferentes portamuestras de bronce y material acrílico, apropiados por su versatilidad y facilidad de manejo para la realización de diversos tipos de holografía. Este se encuentra fijo sobre la mesa de acero y la estructura metálica.

### 6.3.2 Equipo de interferencia con luz verde (532 nm) para emulsiones fotosensibles

El Laboratorio de Óptica de la PUCP cuenta con un equipo de interferencia con un láser verde (532 nm), el cual se describe en la figura 6.7.



**Figura 6.7** Esquema del equipo de interferencia con luz láser verde (532 nm) usado en la PUCP.

Los elementos del equipo que se describen a continuación:

**1. Láser Nd:YVO<sub>4</sub>:** este es un láser continuo de estado sólido que emite luz de 532 nm. Este láser tiene una potencia de 12 mW.

**2. Divisor de haz:** está formado por dos prismas con caras pulidas. Su función es dividir el haz de luz incidente en dos haces que viajan perpendicularmente entre sí, y con la misma potencia.

**3. Espejo:** su función en este arreglo es desviar uno de los haces del divisor de haz para hacerlo interferir con el otro haz que atraviesa el divisor de haz.

**4. Portamuestra:** Sobre este se fijan las emulsiones fotosensibles para grabar la interferencia de los dos haces de luz láser verde (532 nm).

**Nota:** También se realizó el mismo montaje experimental con un láser azul (473 nm) de 30 mW de potencia.

### **6.3.3 Tiempo de exposición a los sistemas de interferencia óptica**

Para el equipo holográfico de geometría vertical se expuso la muestra previamente calentada a 50 °C por tiempos de dos horas a tres horas. Mientras que para el equipo de interferencia con luz verde (532 nm / 12 mW) se expuso la muestra previamente calentada a 50°C por tiempos de 15 minutos, 10 minutos y 5 minutos. También se utilizó un sistema de interferencia con un láser azul (473 nm/ 30 mW), cuyos tiempos de exposición fueron: 2 s, 5 s, 10 s, hasta algunos minutos.

### **6.4 REVELADO DE LAS EMULSIONES DE GELATINA DICROMATADA**

Luego de exponer las emulsiones se procedió de inmediato al proceso de revelado. Este proceso consistió en introducir la emulsión de gelatina dicromatada (previamente expuesta al sistema de interferencia óptica) en un recipiente que contenía alcohol iso-propílico al 50 % por 5 minutos agitándose continuamente. Seguidamente se introdujo el sustrato en un recipiente el cual contenía alcohol iso-propílico al 100% por 2 minutos agitándose continuamente.

Una vez retirado el sustrato del recipiente con alcohol seguimos con el proceso de secar el sustrato con aire caliente producto de una secadora de cabello, situada a 15cm del sustrato durante un tiempo de 5 minutos. En ambientes muy húmedos la gelatina absorbe agua del medio, por lo que el registro holográfico después del secado es sellado con una capa de esmalte traslúcido.

Luego de ser grabadas las rejillas de difracción se ha medido el número de líneas y una primera aproximación de sus eficiencias para dos de las mejores rejillas. El montaje experimental se muestra en la figura 6.8. Los resultados son:

***Rejilla de difracción grabada con un láser verde de 532 nm y de 12 mW de potencia.***

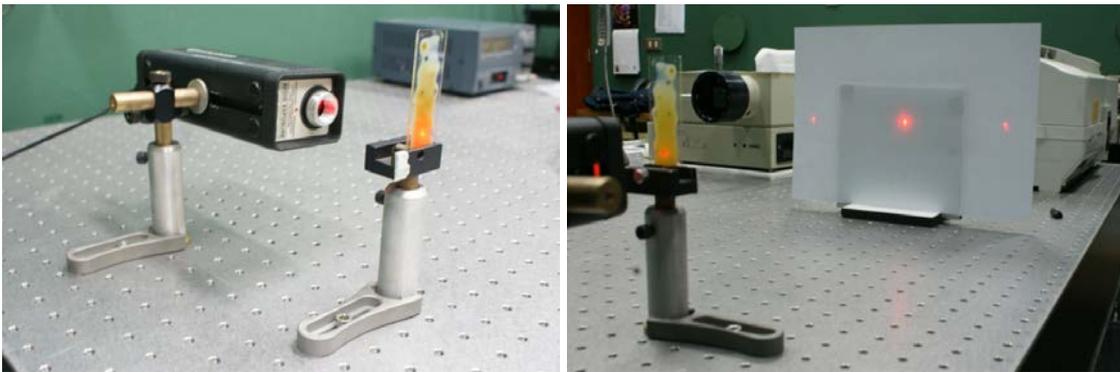
Número de líneas por milímetro = 450

Eficiencia = 0,7 (siendo 1 el valor máximo de eficiencia)

***Rejilla de difracción grabada con un láser verde de 473 nm y de 30 mW de potencia.***

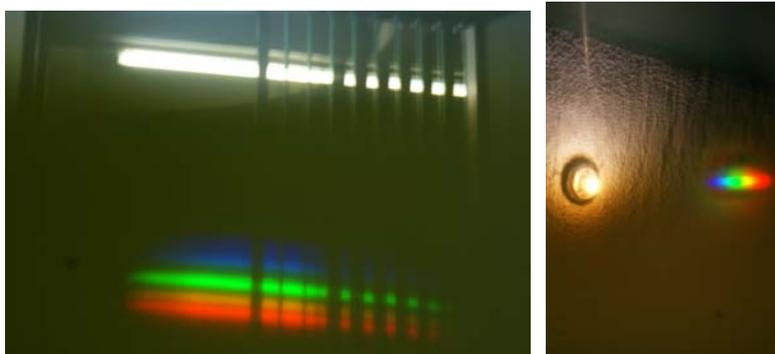
Número de líneas por milímetro = 450

Eficiencia = 0,6 (siendo 1 el valor máximo de eficiencia)

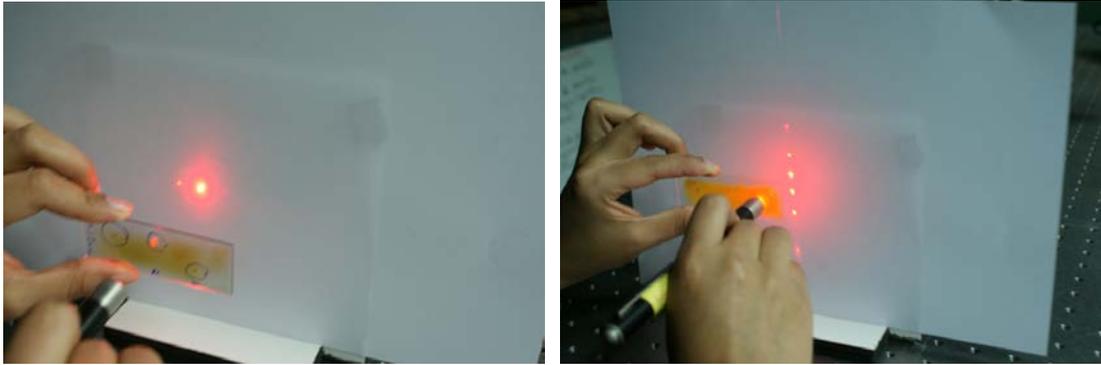


**Figura 6.8 Fotos del montaje experimental para medir el número de líneas en las rejillas de difracción grabadas y la eficiencia.**

En la figura 6.9 se muestran el espectro de luz de un fluorescente que se observa a través de las rejillas de difracción que se han grabado. En la figura 6.10 se observa el patrón de difracción que se obtiene con las rejillas grabadas usando un láser rojo (633 nm).



**Figura 6.9 Fotos de los espectros de luz de un fluorescente y un foco incandescente, obtenidas con las rejillas de difracción grabadas.**



**Figura 6.10** Fotos de los órdenes de difracción de luz roja de 650 nm al atravesar las rejillas de difracción grabadas. Izquierda: grabadas con luz verde de 532nm, derecha: grabadas con luz azul de 473nm.

# CAPITULO 7

## CONCLUSIONES

### 7.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE TESIS

1. Se ha estudiado el monocromador JOBIN YVON H-25 de tipo Czerny-Turner, describiendo con detalle su funcionamiento. Así también se ha automatizado el monocromador JOBIN YVON H-25 para registrar espectros de transmitancia o ser adaptado para otro tema de espectroscopia de futuras tesis.
2. En base a la simulación óptica del monocromador JOBIN YVON H-25 se ha podido registrar la superposición de los órdenes de difracción: “0” con “-1” (entre 300 nm a 350 nm), y “1” con “2” (entre 400 nm a 800 nm cuando ingresa luz ultravioleta o luz visible con longitudes de onda menores a 450 nm). Además con la simulación óptica es posible estudiar la mayoría de problemas de luz parásita (no deseada) que hay en la cavidad del monocromador.
3. De acuerdo a la simulación realizada para el monocromador Mc-Pherson 272 de configuración tipo Seya-Namioka en diferentes rangos espectrales (250 nm, 400 nm, y 1000 nm), se ha determinado que las características de su resolución óptica (0.5 nm) se mantienen para el rango de 250 nm a 400 nm. Mientras que a longitudes de onda mayores a 400 nm la longitud de enfoque se reduce considerablemente, por lo que se sugiere modificar la posición de la rendija de salida para su adecuado funcionamiento.
4. Otro parámetro importante obtenido de la simulación del monocromador Mc-Pherson 272 (configuración Seya-Namioka) es la longitud del astigmatismo sagital, que crece en función de la longitud de onda. Para longitudes de onda en el rojo visible e infrarrojo cercano el tamaño del astigmatismo sagital es mayor a 5cm, y el espectro de luz se expande a lo largo de la rendija de salida. Se recomienda usar una óptica adicional antes de la rendija de salida para concentrar el espectro de luz a un tamaño menor que la rendija. Caso contrario, una fracción del espectro de luz no atravesará la rendija de salida y se perderá por completo.

5. Haciendo uso de la simulación óptica se ha diseñado un espectrofotómetro en base a un monocromador Czerny –Turner, y se ha adaptado un espectrómetro para medir espectros de transmitancia y absorbancia (mismas funciones que un espectrofotómetro). Al evaluar estos dos sistemas se ha visto una mayor ventaja en el diseño del espectrómetro para medir los espectros de transmitancia en muestras de emulsiones fotosensibles, por la rapidez de medición, por tener resolución óptica menor a 0,5 nm y el menor número de elementos ópticos en su construcción. Siendo el rango espectral de 400 nm a 600 nm.
6. El diseño del espectrofotómetro en base a un monocromador Czerny –Turner, sería una mejor opción para muestras de espesores mayores a 3 mm y cuando se requiera analizar rangos espectrales mayores (por ejemplo: 400 nm a 800 nm).
7. Con la simulación óptica se puede diseñar monocromadores y espectrómetros para una aplicación espectroscópica requerida. Obteniéndose parámetros físicos muy importantes para su construcción, como: la resolución óptica, la dispersión lineal, el astigmatismo sagital, distancia de enfoque, entre otros.
8. Se han registrado espectros de absorbancia y transmitancia utilizando el monocromador JOBIN YVON H-25 (configuración Czerny-Turner) para dos muestras de emulsión de gelatina dicromatada (preparadas en el laboratorio de óptica). Las muestras son 50% transparentes para longitudes mayores a 500 nm, y casi 100% transparente para longitudes de onda en el infrarrojo cercano. Mientras que las curvas de absorbancia indican que la emulsión de gelatina dicromatada es fotosensible en el rango ultravioleta (UV) y visible azul.
9. Se han grabado rejillas holográficas sobre gelatina dicromatada en el Laboratorio de Óptica usando dos sistemas de registro de interferencia de luz, uno para luz roja (632,8 nm), y otro para luz verde (532 nm) y azul (473 nm). Siendo el mejor registro de rejillas holográficas en el rango de luz visible azul y que concuerda con los resultados de su espectro de absorbancia medido.

## 7.2 RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

1. Para el mejor uso de los monocromadores JOBIN YVON H-25 (configuración Czerny-Turner) y Mc-Pherson 272 (configuración Seya-Namioka), se recomienda revisar esta tesis para su mejor uso y posibles modificaciones de adaptación en un rango espectral de trabajo diferente al que se encuentra actualmente.
2. En base a las simulaciones ópticas descritas en el capítulo 4 de esta tesis, se implementara en un futuro trabajo el espectrofotómetro para medir espectros de transmitancia y absorbancia que necesita el Laboratorio de Óptica de la Universidad Nacional de Ingeniería.
3. En los espectros de transmitancia y absorbancia registrados para las emulsiones de gelatina dicromatada se observa una ligera diferencia entre las dos muestras en estudio. Esta diferencia puede estar relacionada con la elaboración de las muestras (niveles de concentración, condiciones ambientales, entre otras). Este estudio corresponderá a un próximo trabajo de investigación del grupo de óptica.
4. En base a esta tesis se puede proponer un taller o adherir temas de laboratorio en algún curso de la Escuela profesional de Física, para la capacitación de alumnos de pregrado en temas de instrumentación espectroscópica.
5. En un futuro trabajo se propone el grabado y caracterización de rejillas holográficas en emulsiones de gelatina dicromatada con otras longitudes de onda, es especial con luz ultravioleta.
6. La parte electrónica del espectrómetro Czerny-Turner que se ha implementado, puede ser mejorada, diseñando una tarjeta electrónica para la adquisición de datos del CCD lineal sin el uso de un osciloscopio. Este trabajo puede ser desarrollado por algún alumno que lleve el curso Tópicos de Investigación.
7. En vista que el espectrómetro Czerny-Turner implementado se quedará en la Facultad de Ciencias de la UNI (bajo la responsabilidad de la Profesora Carmen Eyzaguirre) por un periodo de un ciclo académico, se sugiere que algún alumno de realice un trabajo de tesis; implementando un equipo de espectroscopia de fluorescencia aplicado a la agricultura o control de calidad de alimentos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hutley, M.C.; **Diffraction gratings** Academic Press, **1982**
  
- [2] Kingslake, R. **Applied Optics and Optical Engineering -Volumen V**. Editorial: Academic Press, Inc. **1969**.
  
- [3] Ostrovskaya, G.V. and Ostrovsky, Y. I., **Técnica y práctica de espectroscopia**, MIR, **1979**.
  
- [4] Lerner, J.M. and Thevenon, A.; **The Optics of Spectroscopy - A Tutorial** Jobin-Yvon, **1988**.
  
- [5] Skoog, D.A., **Análisis instrumental**. Editorial McGraw-Hill, **1994**.
  
- [6] Valera, A.; Eyzaguirre, C.; **Óptica Física**. Editorial Hozlo S.R.L., **1997**.
  
- [7] Loewen, E. G. and Popov E.; **Diffraction Gratings and Applications**, Marcel Dekker, Inc., **1997**.
  
- [8] Smith, W. J., **Modern optical engineering: the design of optical systems**. Editorial: McGraw Hill, **2000**.
  
- [9] Hecht, E.; **Óptica** 3ra Edición Addison Wesley, **2000**.
  
- [10] Palmer, C.; Loewen, E.; **Diffraction Grating Handbook**, Newport Corporation sixth edition, **2005**.
  
- [11] James, J. F., **Spectrograph design fundamentals**, Cambridge University, **2007**.

- [12] Laserna, J.; **Calibración de los espectrómetros Ocean Optics, modelo HR 2000**; Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga.
- [13] **Manual OSLO EDU 6.1** Optics Software for Layout and Optimization.  
The OSLO software and Optics Reference are Copyright © 2001 by Lambda Research Corporation.
- [14] **Datasheet del Zilog Z8** Encore XP F08XA series. High-Performance 8-Bit Microcontrollers, Microchip Technology Inc. **2002**.
- [15] **Web de ANDOR Technology** <http://www.andor.com/spectrographs/>
- [16] **Web de EKSPLA** <http://www.ekspla.com/en>
- [17] **web Compañía Ocean Optics**  
<http://www.oceanoptics.com/>

## **PUBLICACIONES**

- [18] N. C. Das; **Aberration properties of a Czerny-Turner spectrograph using plane-holographic diffraction grating**; Applied Optics Vol. 30, No. 25, September **1991**.
- [19] A. Thévenon, J. Flamand, J.P. Laude, B. Touzet; **Aberration-corrected plane gratings**; SPIE Vol. 815 (**1987**).
- [20] William G. Fastie , **Image Forming Properties of the Ebert Monochromator**, J. Opt. Soc. Am. 42, 9 (647-51) **1952**.

# ANEXO A

## CONSTRUCCIÓN DE LA TARJETA ELECTRÓNICA DE CONTROL PARA EL MONOCROMADOR JOBIN YVON H25

En la figura A.1 se muestra una foto de la tarjeta de control que se ha construido para el monocromador JOBIN YVON (JY) H-25, los detalles de construcción se muestran en las figuras A.2 y A.3. Para el control del motor y otros accesorios se ha utilizado un PIC18F452, el cual se ha programado en el programa MLAB IDE V7.50.



**Figura A.1 Foto de la tarjeta de control para el monocromador JOBIN YVON H-25.**

En la figura A.2 se muestra el **esquemático electrónico** de la tarjeta de control para el monocromador, diseñado en el programa EAGLE 4.16.

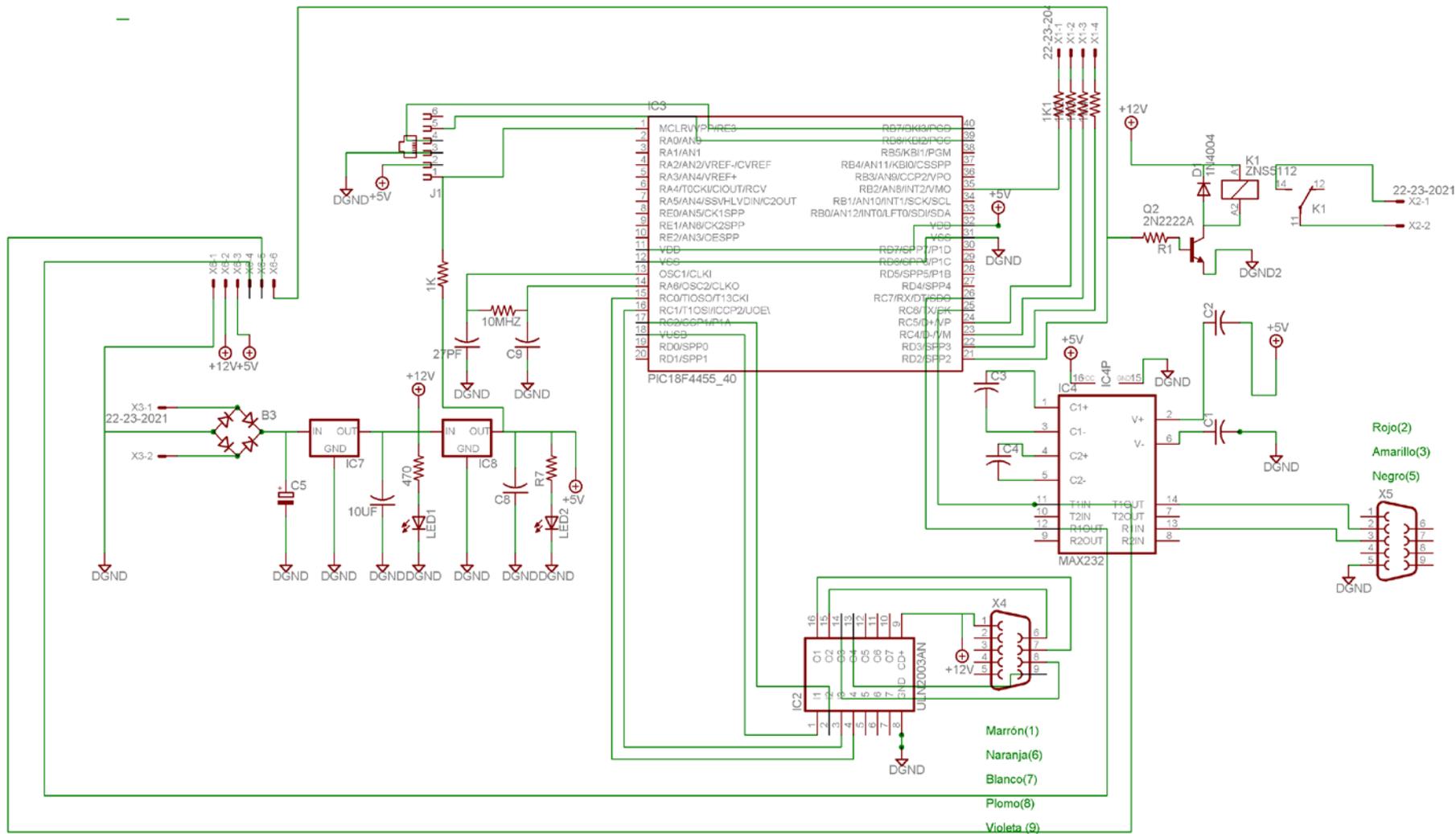
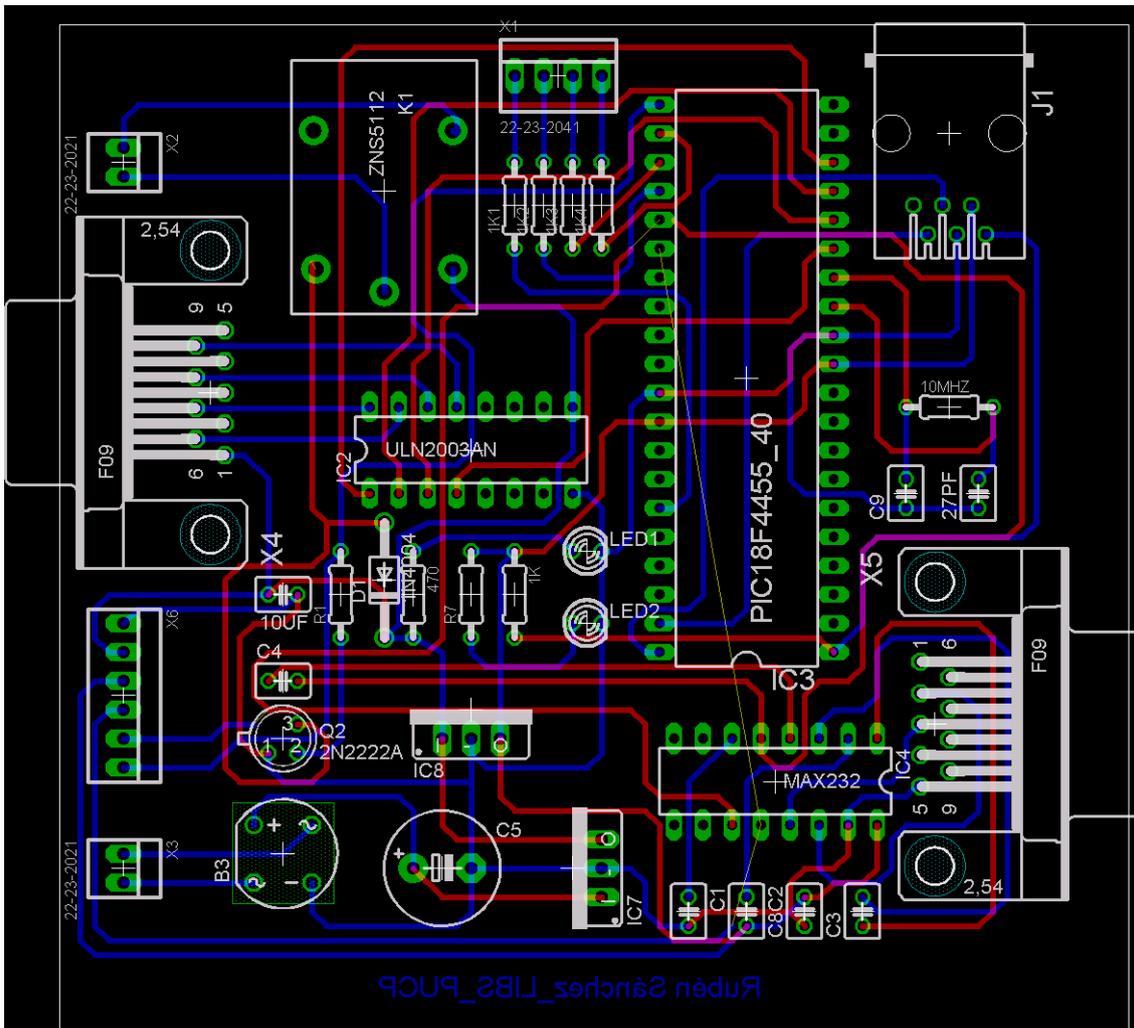


Figura A.2. Esquemático electrónico del circuito de la tarjeta de control para el monochromador JOBIN YVON H-25.

En la figura A.3 se muestra el **esquemático impreso** de la tarjeta de control para el monocromador, diseñado en el programa EAGLE 4.16. Este diseño se ha realizado a doble cara para reducir las dimensiones de la tarjeta.



**Figura A.3.** Esquemático del circuito impreso de la tarjeta de control para el monocromador JOBIN YVON H-25.

Lista de componentes electrónicos para la tarjeta electrónica de control para el Monocromador JOBIN YVON H25.

<b>1</b>	Un PIC 18F4455
<b>2</b>	Un ULN2003
<b>3</b>	Un Max232
<b>4</b>	Un conector RJ12 hembra para placa
<b>5</b>	2 conector RJ12
<b>6</b>	Un oscilador de 10MHz
<b>7</b>	4 condensadores de 27pF
<b>8</b>	2 conectores DB9 hembra
<b>9</b>	2 conectores DB9 macho
<b>10</b>	5 condensadores de 1uF de 25V o 50V
<b>11</b>	Dos regulador de voltaje 7812
<b>12</b>	Dos regulador de voltaje 7805
<b>13</b>	4 Chapas para los reguladores de voltaje
<b>14</b>	Dos condensadores de 3200uF
<b>15</b>	2 molex de 2 pines
<b>16</b>	1 molex de 4 pines
<b>17</b>	bornera de 6 pines
<b>18</b>	bornera de 4 pines
<b>19</b>	Un transistor 2222A
<b>20</b>	2 condensadores de 10uF 25V
<b>21</b>	2 resistencias de 470
<b>22</b>	6 resistencias de 1K
<b>23</b>	1 diodo 1N4004
<b>24</b>	Un relay de 12 V
<b>25</b>	Un conector BNC chasis

**CÓDIGO DEL PROGRAMA ASSEMBLER EN MLAB IDE V7.50, USADO PARA EL CONTROL DEL MOTOR EN EL MOCROMADOR JOBIN YVON H25 (Realizado por el Ing. Rafael Coello).**

```
list      p=18F452
#include   "p18f452.inc"
```

CONFIG OSC=HSPLL, WDT=OFF,DEBUG = OFF,BOR = OFF,PWRT = ON,STVR = ON,LVP = OFF

```
base_var    equ    0x00

ram1        equ    base_var+0x00
ram2        equ    base_var+0x01
ram3        equ    base_var+0x02
flag        equ    base_var+0x03

pos_actual  equ    base_var+0x07
pasos_h     equ    base_var+0x08
pasos_l     equ    base_var+0x09

caracter    equ    base_var+0x0a
cont_serial equ    base_var+0x0b
salto_aux   equ    base_var+0x0c
ser_state   equ    base_var+0x0d
aux         equ    base_var+0x0e

retardo     equ    base_var+0x0f

#define      FORWARD      flag,0
#define      LASER_F      flag,1
#define      BACKWARD     flag,7
#define      ORDEN        flag,4

#define      LASER        PORTD,0

    org      0x000
    goto    main

    org      0x008
    goto    inte

    org      0x020
main:
    call    init
```

```

        clrf    pos_actual

q1:
    btfss    ORDEN
    goto    q1
    bcf      ORDEN
    btfsc    FORWARD
    goto    zona_avanzar
    btfsc    BACKWARD
    goto    zona_retroceder
    btfsc    LASER_F
    goto    zona_laser
    goto    q1

zona_laser:
    bcf      LASER_F
    bsf      LASER
    movlw   .200
    movwf   retardo
    call    delay
    bcf      LASER
    movlw   'F'
    movwf   caracter
    call    send_char

    goto    q1

zona_avanzar:
    bcf      FORWARD
    call    avanzar_motor
    movlw   'F'
    movwf   caracter
    call    send_char

    goto    q1

zona_retroceder:
    bcf      BACKWARD
    call    retroceder_motor
    movlw   'F'
    movwf   caracter
    call    send_char

    goto    q1

inte:
    movlw   HIGH (rrr0+2)
    movwf   PCLATH

```

```

    rlnsf ser_state,W
    rlnsf WREG,W
    movwf salto_aux
    addlw LOW (rrr0+2)
    btfsc STATUS,C
    incf PCLATH,F
    movf salto_aux,W
rrr0
    addwf PCL,F
    goto SER0
    goto SER1
    goto SER2

```

SER0:

```

    movf RCREG,W
    movwf aux
    xorlw 'A'
    btfsc STATUS,Z
    goto ava_01
    movf aux,W
    xorlw 'a'
    btfsc STATUS,Z
    goto ava_01
    movf aux,W
    xorlw 'R'
    btfsc STATUS,Z
    goto ret_01
    movf aux,W
    xorlw 'r'
    btfsc STATUS,Z
    goto ret_01
    movf aux,W
    xorlw 'l'
    btfsc STATUS,Z
    goto las_01
    movf aux,W
    xorlw 'L'
    btfsc STATUS,Z
    goto las_01
    goto exit

```

las\_01:

```

    bsf     LASER_F
    bsf     ORDEN
    goto  exit

```

ava\_01:

```

    bsf          FORWARD
    incf  ser_state,F
    goto  exit

ret_01:
    bsf          BACKWARD
    incf  ser_state,F
    goto  exit

SER1:
    movf  RCREG,W
    movwf pasos_l
    incf  ser_state,F
    goto  exit

SER2:
    movf  RCREG,W
    movwf pasos_h
    bsf          ORDEN
    clrf  ser_state
    goto  exit

exit:
    retfie

retroceder_motor
    incf  pasos_h,F
    clrf  TBLPTRU
    movlw HIGH TABLA
    movwf TBLPTRH
rm_01:
    movlw LOW TABLA
    movwf TBLPTRL

    incf  pos_actual,W
    andlw 0x07
    movwf pos_actual
    addwf TBLPTRL
    TBLRD*
    movf  TABLAT,W
    movwf LATC
    movlw 0x04
    movwf retardo
    call  delay

    decfsz pasos_l,F
    goto  rm_01
    decfsz pasos_h,F

```

```

goto    rm_01

return

avanzar_motor:
    incf    pasos_h,F
    clrf    TBLPTRU
    movlw  HIGH TABLA
    movwf  TBLPTRH
am_01:
    movlw  LOW TABLA
    movwf  TBLPTRL

    decf    pos_actual,W
    andlw  0x07
    movwf  pos_actual
    addwf  TBLPTRL
    TBLRD*
    movf   TABLAT,W
    movwf  LATC
    movlw  0x04
    movwf  retardo
    call   delay
    decfsz pasos_l,F
    goto  am_01
    decfsz pasos_h,F
    goto  am_01

return

send_char:
    movf   caracter,W
    movwf  TXREG
    nop
ss1
    btfss  PIR1,TXIF
    goto  ss1
ss2
    btfss  TXSTA,TRMT
    goto  ss2
    nop

return

init:
    clrf   LATC
    clrf   LATD

```

```

movlw b'10010000'
movwf TRISC
clrf   TRISD

bcf          TXSTA,BRGH
movlw .32
movwf SPBRG
bcf          TXSTA,SYNC
bsf          TXSTA,TXEN
bsf          PIE1,RCIE

bsf          RCSTA,CREN
bsf          RCSTA,SPEN

bsf          INTCON,PEIE
bsf          INTCON,GIE

clrf  ser_state
clrf  flag

return

```

delay:

```

call  delay_base
decfsz retardo,F
goto  delay

return

```

delay\_base:

```

movlw 0x08
movwf ram2
12:clrf ram1
11:decfsz ram1,F
goto 11
decfsz ram2,F
goto 12

return

```

TABLA:

```

db          0x07,0x06,0x0e,0x0a,0x0b,0x09,0x0d,0x05

```

end

# ANEXO B

## MANUAL DE CONTROL DEL MONOCROMADOR JOBINYVONH25

Antes de proceder con las especificaciones del programa para controlar el monocromador, encienda el osciloscopio y la tarjeta electrónica de control (enchufar a 220V AC).

1. Abrir el programa Matlab R2006a.

2. Ingresar a la siguiente dirección que se encuentra en el escritorio:

C:\Documents and settings\Administrador\Escritorio\JOBINYVONH25\_GPIB (ver figura B.1)

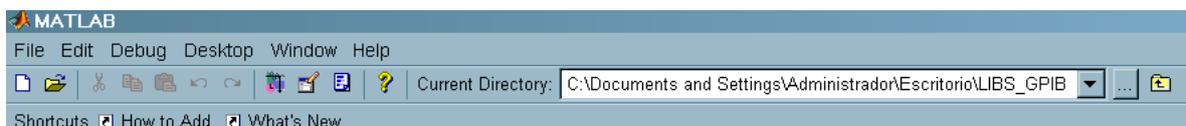


Figura B.1. Ubicación de la carpeta del programa JOBINYVONH25.m

3. En la carpeta JOBINYVONH25\_GPIB seleccionar y abrir el archivo JOBINYVONH25.m (ver figura B.2)

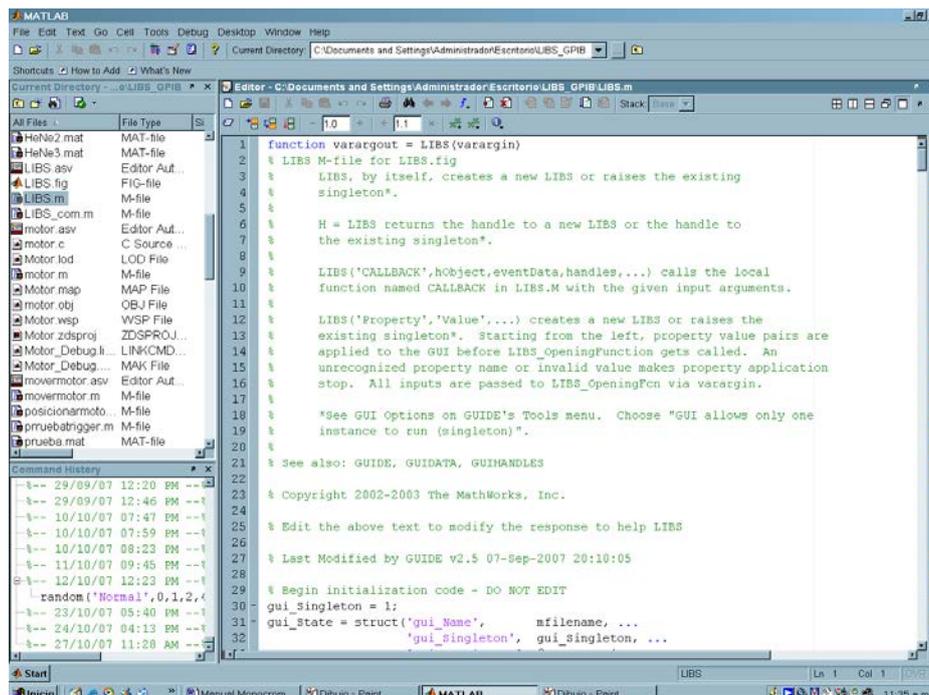
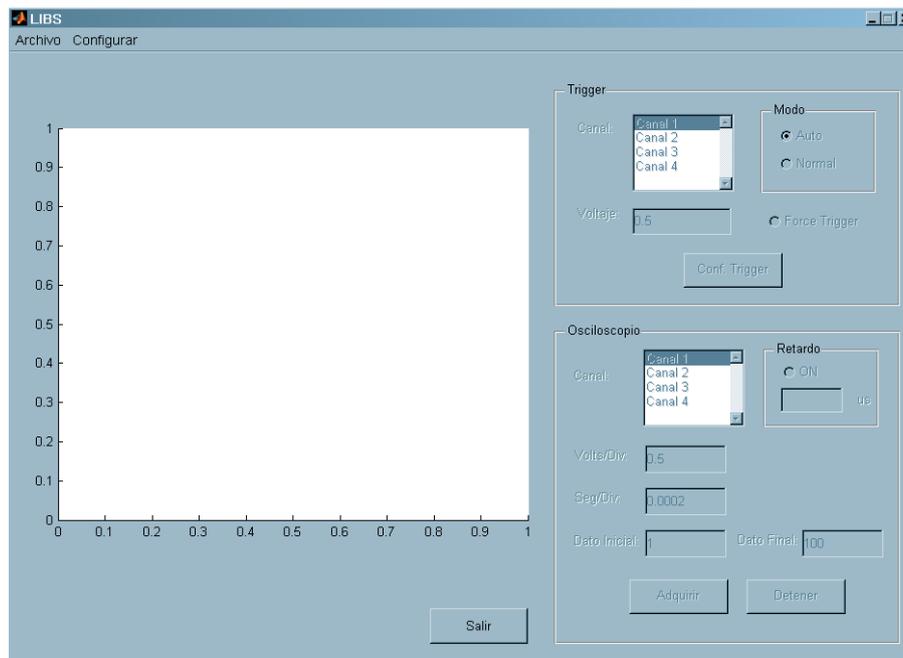


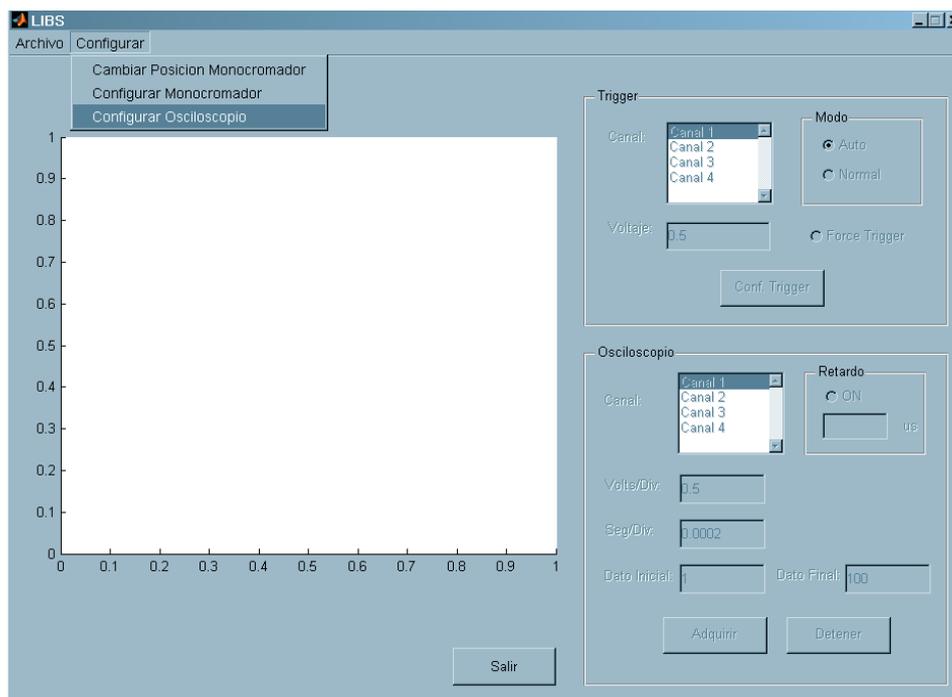
Figura B.2. Vista del programa JOBINYVONH25.m

4. Ejecutar el programa JOBINYVONH25.m. Luego se generará la siguiente ventana. (ver figura B.3)



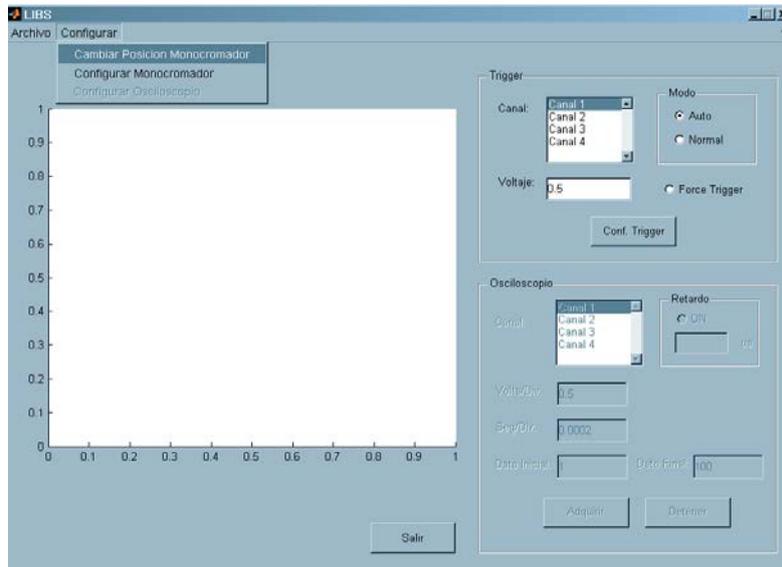
**Figura B.3. Ventana principal del programa JOBINYVONH25.m**

5. Seleccionar y ejecutar “configurar osciloscopio”. Este paso permitirá luego configurar los parámetros deseados del osciloscopio. (ver figura B.4)



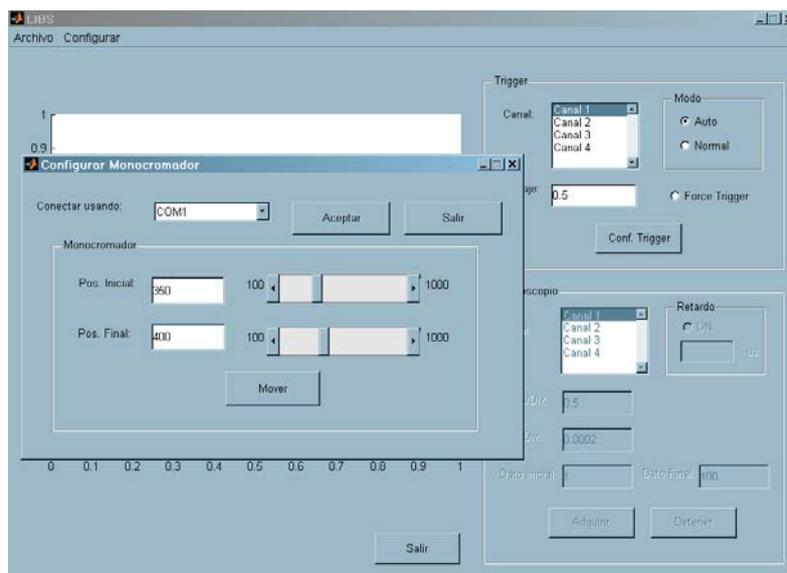
**Figura B.4. Configurando el modo osciloscopio en la ventana principal del programa JOBINYVONH25.m**

6. Seleccionar y ejecutar “cambiar posición monocromador”. Este paso es para posicionar el monocromador en la longitud de onda (“Posición inicial”) requerida antes de una toma de datos. (ver figura B.5)



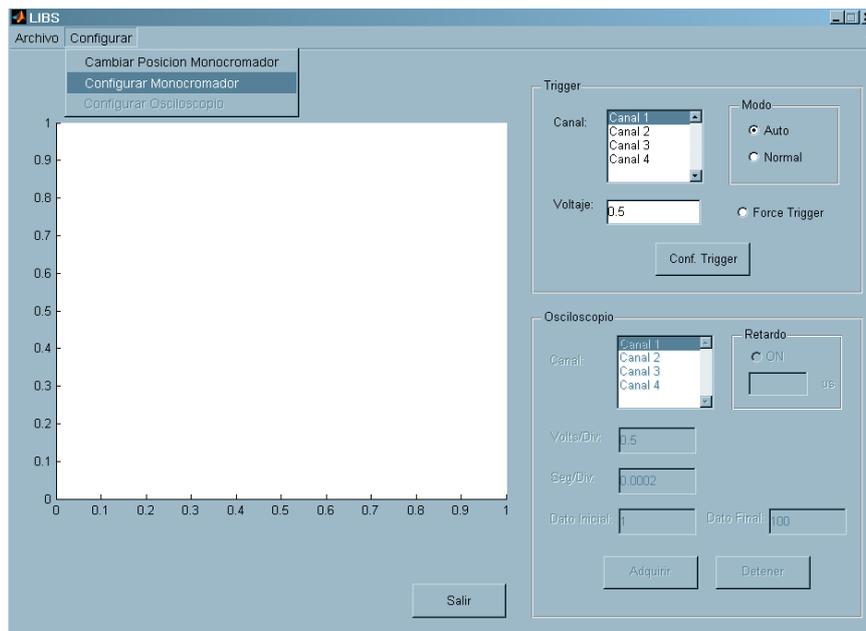
**Figura B.5. Abriendo la ventana de configuración de la nueva la posición de longitud de onda del monocromador en la ventana principal del programa JOBINYVONH25.m**

Haga clic en “aceptar” y luego indica la posición inicial (actual) del monocromador y la posición final a la que se desea llevar. Las medidas se dan en manómetros. Después haga clic en “Mover”. (ver figura B.6)



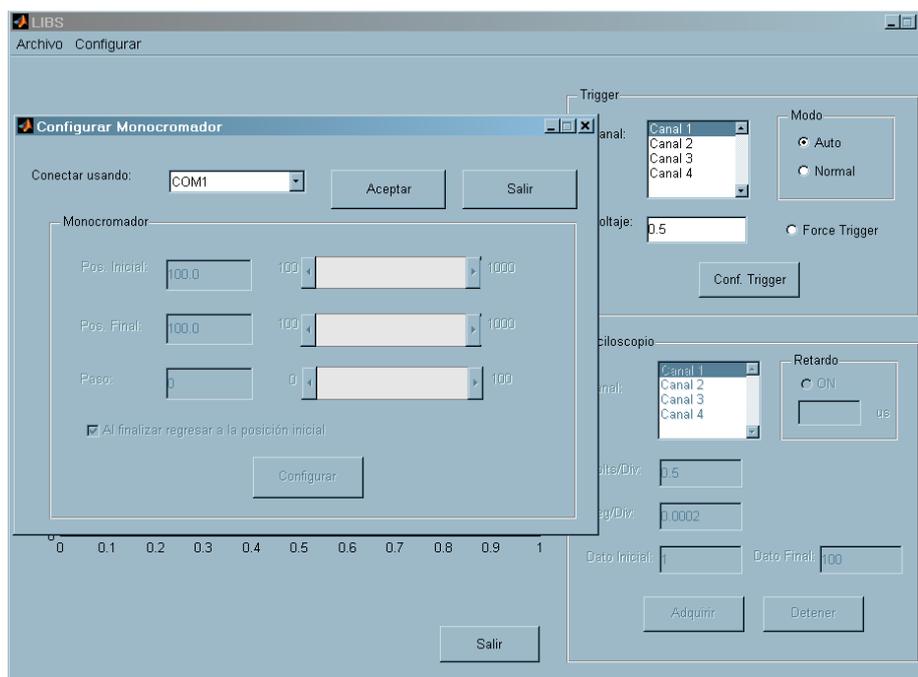
**Figura B.6. Configurando la nueva la posición de longitud de onda del monocromador en la ventana principal del programa JOBINYVONH25.m**

7. Seleccionar y ejecutar “configurar monocromador”. (ver figura B.7)



**Figura B.7. Abriendo la ventana de configuración para la adquisición de datos con el monocromador, en la ventana principal del programa JOBINYVONH25.m**

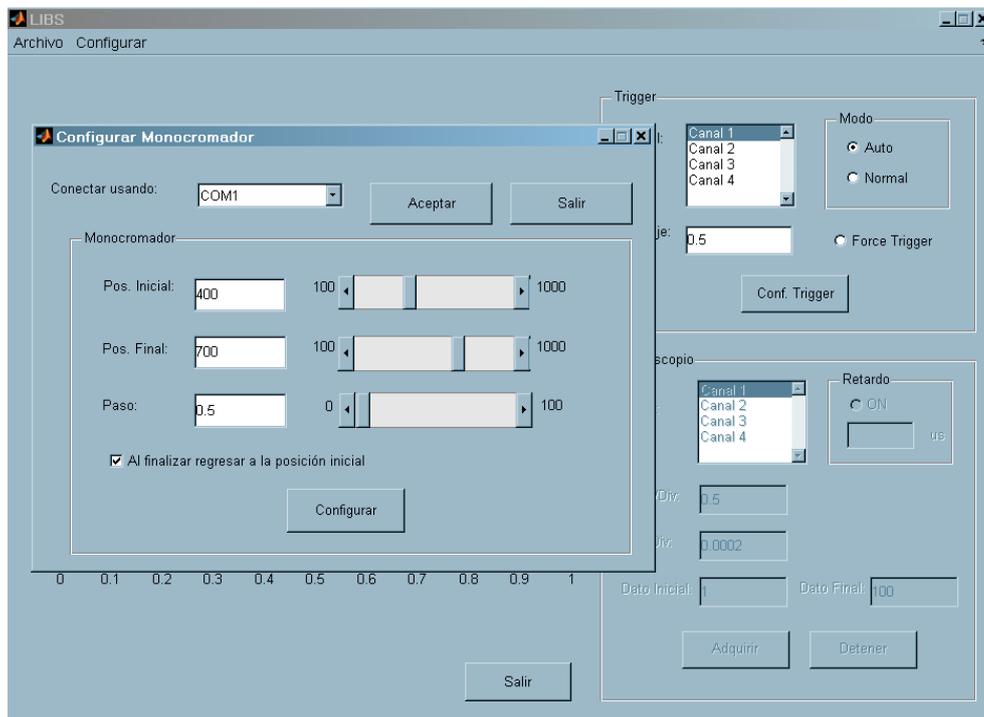
Luego selecciona el canal serial de comunicación con la tarjeta electrónica de control del monocromador. Ahora haga clic en aceptar. (ver figura B.8)



**Figura B.8. Vista de la ventana de configuración del monocromador, en la ventana principal del programa JOBINYVONH25.m**

8. Ahora seleccione e ingrese la “posición inicial” (en la que se encuentra el monocromador) y la “posición final” del rango espectral que se desea estudiar en la muestra. Después seleccione e ingrese el ancho del paso que se desea muestrear para barrer el rango espectral anteriormente seleccionado.

Si desea seguir tomando datos en este rango luego de la primera adquisición seleccione “Al finalizar regresar a la posición inicial”. (ver figura B.9)



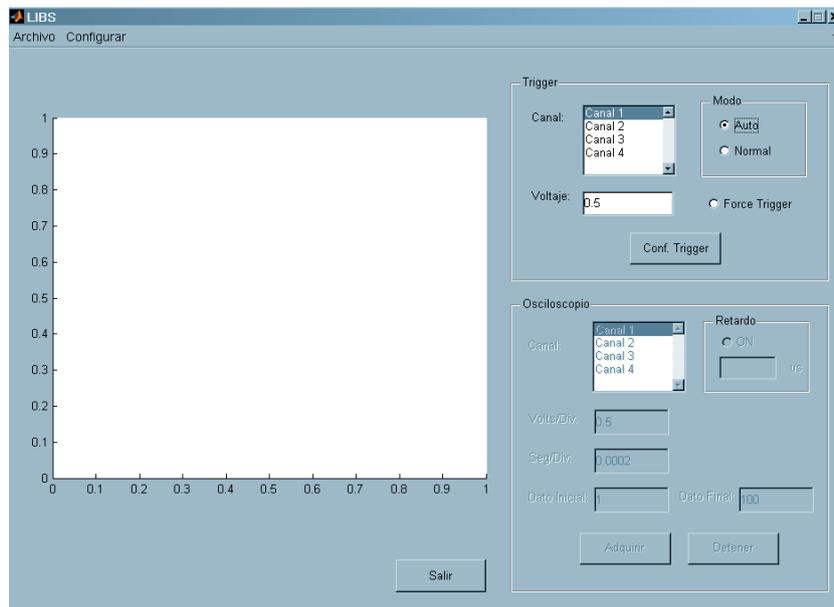
**Figura B.9. Vista de la ventana de configuración del monocromador seleccionando regresar a la posición inicial luego de la adquisición de datos.**

Luego haga clic en “Configurar”. Para abordar la operación haga clic en “cancelar”.

9. Ahora vamos a configurar el Trigger del osciloscopio:

\* Si se desea tomar datos sin sincronización del espectro, seleccione el canal al cual esta conectado la señal de salida del PTM (fotosensor), el cual registra el espectro adquirido. Luego elija el modo “Auto” y haga clic en “conf. Trigger” sin seleccionar “force trigger”.

\* En caso de utilizar la sincronización seleccione el canal del osciloscopio al cual esta conectado el trigger externo, es decir, la salida del láser Nd-YAG “Q SW SYNCH OUT”. Luego elija el modo “Manual” y haga clic en “conf. Trigger” sin seleccionar “force trigger”. (ver figura B.10)

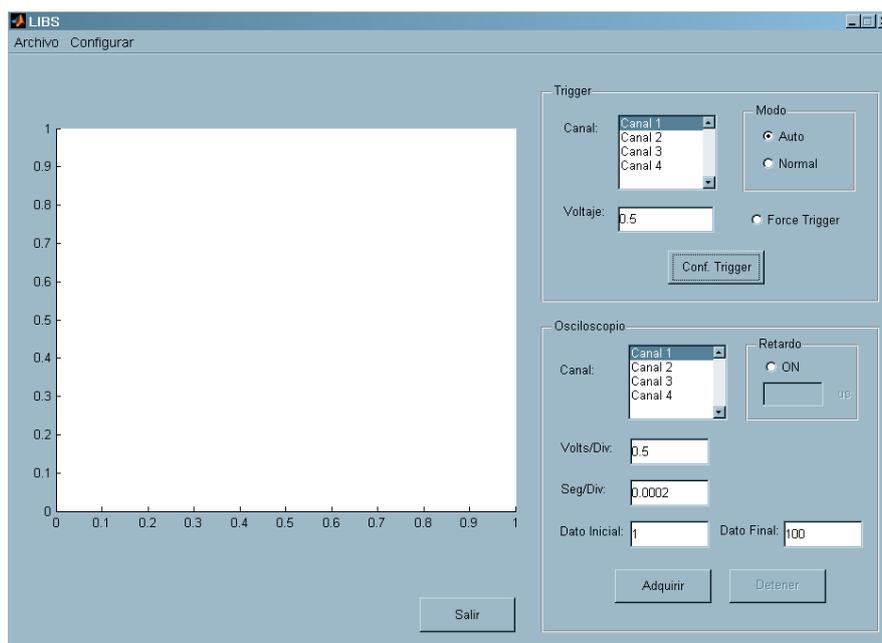


**Figura B.10. Vista de la ventana principal del programa JOBINYVONH25.m, configurando el trigger para la adquisición de datos vía puerto GPIB.**

**10.** Configurar la adquisición de datos con el osciloscopio. (ver figura B.11)

\* Seleccione el canal del osciloscopio al cual esta conectado el fotosensor (PTM).

\* Solamente si se va a utilizar sincronización espectral seleccione Retardo “ON” y digite el tiempo de retardo en microsegundos.



**Figura B.11. Vista de la ventana principal del programa JOBINYVONH25.m, configurando el osciloscopio para la adquisición de datos vía puerto GPIB.**

\* Luego digite en “Volts/Div” la escala de voltaje del osciloscopio en la cual se van a adquirir los datos del fotosensor.

\* Luego digite en “seg/Div” la escala de frecuencia del osciloscopio en la cual se van a adquirir los datos del fotosensor. Por lo general dejar en el valor 0,0002 seg/div.

\* No modificar el “Dato inicial = 1” ni el “Dato final = 100”.

\* Finalmente haga clic en adquirir y espere hasta que termine el proceso de adquisición.

**Observación:** si ha seleccionado “Al finalizar regresar a la posición inicial”, la posición del monocromador regresará a la posición de longitud de onda inicial.