

Universidad Internacional de La Rioja (UNIR)

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Grado en Física

**Desarrollo de un espectrógrafo/fotómetro
astronómico reconfigurable con tecnolo-
gía DMD y detector monopíxel**

Trabajo de fin de estudio presentado por:	Javier de Elías
Director/a/es:	Ezequiel Albentosa y Francisco Prada
Fecha:	2026-07-05

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y validación de un instrumento dual de espectroscopía y fotometría basado en un *Digital Micromirror Device* (DMD) y un detector monopíxel. El DMD actúa como modulador espacial programable en el plano espectral, seleccionando regiones del espectro y dirigiendo la luz hacia un detector sensible. Esta arquitectura permite operar como espectrógrafo o fotómetro mediante cambios por software, sin modificar la configuración óptico-mecánica. El diseño óptico, basado en una configuración Czerny–Turner cruzada con red de difracción, ofrece una solución compacta compatible con detectores monopíxel sensibles. La caracterización del prototipo ha comprobado la modulación del haz, la reconstrucción espectral por barrido secuencial y la medida fotométrica en bandas definidas por software. Los resultados demuestran la viabilidad experimental del concepto y lo sitúan como alternativa flexible, compacta y de bajo coste para instrumentación óptica reconfigurable en telescopios de pequeña o mediana apertura.

Palabras clave: Fotómetro, Espectrógrafo, Fotomultiplicador, DMD, PMT, Telescopio

Abstract

This work presents the design, construction, and validation of a dual spectroscopy and photometry instrument based on a *Digital Micromirror Device* (DMD) and a single-pixel detector. The DMD acts as a programmable spatial modulator in the spectral plane, selecting spectral regions and directing the light towards a sensitive detector. This architecture enables operation as either a spectrograph or a photometer through software changes, without modifying the opto-mechanical configuration. The optical design, based on a crossed Czerny–Turner configuration with a diffraction grating, provides a compact solution compatible with sensitive single-pixel detectors. Prototype characterization has verified beam modulation, spectral reconstruction by sequential scanning, and photometric measurements in software-defined spectral bands. The results demonstrate the experimental viability of the concept and position it as a flexible, compact, and low-cost alternative for reconfigurable optical instrumentation in small- and medium-aperture telescopes.

Keywords: Photometer, Spectrograph, Photomultiplier, DMD, PMT, Telescope

Índice de contenidos

1.	Introducción	1
1.1.	Contexto general	1
1.2.	Instrumentación astronómica compacta	1
1.3.	Instrumento dual	2
1.4.	Principio de funcionamiento	2
1.5.	Motivación y objetivos	5
2.	Estado del arte en instrumentación óptica reconfigurable	6
2.1.	Evolución de la instrumentación espectroscópica compacta	6
2.2.	Introducción a los moduladores espaciales de luz	6
2.3.	Aplicaciones científicas del DMD: de la proyección al laboratorio óptico .	8
2.4.	Ejemplos recientes en astronomía, espectroscopía y óptica adaptativa .	9
2.5.	Síntesis y motivación	9
3.	Tecnología DMD	10
3.1.	Estructura y principio de funcionamiento	10
3.2.	Características físicas y eléctricas	11
3.3.	Limitaciones técnicas conocidas	12
3.4.	Tendencias de desarrollo	14
4.	Tecnología de detección monopíxel	16
4.1.	Concepto de detección monopíxel	16
4.2.	Tecnologías habituales de detector monopíxel	17
4.3.	Limitaciones y tendencias actuales	19
4.4.	Justificación del uso de PMT en este trabajo	20
5.	Elemento dispersor	21

5.1.	Opciones de dispersión: prisma vs red	21
5.2.	Limitaciones prácticas	22
6.	Diseño del instrumento	24
6.1.	Descripción global	24
6.2.	El espectrógrafo Czerny–Turner clásico cruzado	26
6.3.	Parámetros geométricos y ecuaciones de diseño	29
6.4.	Simulación por trazado de rayos secuencial	34
6.5.	Integración del DMD y el fotomultiplicador	41
6.6.	Estimación simple del diámetro de la lente para recoger varios órdenes de difracción	44
7.	Implementación de un prototipo	46
7.1.	Introducción	46
7.2.	Elementos ópticos	48
7.3.	DMD	49
7.4.	Verificación experimental del funcionamiento del DMD en banco de pruebas	52
7.5.	Fotomultiplicador	56
7.6.	Pruebas del prototipo sin fotomultiplicador	58
7.7.	Pruebas del prototipo con PMT	64
7.7.1.	Ajuste del enfoque	66
7.7.2.	Prueba modo espectrógrafo	67
7.7.3.	Prueba modo fotómetro	69
8.	Métodos de adquisición	71
8.1.	Control del PMT	71
8.2.	Control de DMD	75
8.3.	Arquitectura software del sistema	77
8.3.1.	Nodo de adquisición	78
8.3.2.	Nodo de visualización	83
8.4.	Funcionamiento dual como fotómetro y espectrógrafo	87
8.4.1.	Modo espectrógrafo	88
8.4.2.	Modo fotómetro	89

8.4.3. Modo mixto	91
8.5. Métodos avanzados de adquisición	92
9. Conclusiones	94
10. Líneas futuras	97
Anexo A. Protocolo de comunicación serie del PMT Sens-Tech EM6	99
Anexo B. Script de control del equipo	102
Bibliografía	113

1. Introducción

1.1. Contexto general

En los últimos años, el desarrollo de *Micro Electro-Mechanical Systems* (MEMS) ha abierto nuevas posibilidades en el diseño de instrumentos ópticos para la investigación científica. Entre ellos, los dispositivos *Digital Micromirror Device* (DMD), constituidos por matrices de micro espejos direccionables de manera independiente, se han consolidado como moduladores espaciales de luz altamente versátiles. Su aplicación en espectroscopía y fotometría resulta especialmente interesante, ya que permiten seleccionar de forma programable regiones específicas de un espectro dispersado y dirigir la luz hacia un detector monopíxel. El uso de moduladores espaciales de luz en astrofísica se ha explorado desde hace más de tres décadas, por lo que podemos considerarla una tecnología madura. Sin embargo, su utilización se ha limitado hasta ahora a instrumentos de grandes telescopios o a misiones espaciales, donde los costes y complejidades de integración resultan asumibles.

1.2. Instrumentación astronómica compacta

La tecnología DMD ha sido hasta ahora empleada principalmente en proyectos de gran envergadura, sobre todo en instrumentación espacial y desarrollos experimentales de espectroscopía multiplexada en entornos controlados. Sin embargo, su potencial aplicación en telescopios de pequeña apertura es especialmente atractiva: un DMD combinado con un fotómetro sensible podría ofrecer funcionalidades de espectroscopía y fotometría con prestaciones no disponibles en soluciones convencionales basadas en detectores bidimensionales.

Los telescopios pequeños presentan ventajas en coste, rapidez de instalación y movilidad frente a los grandes equipos. Por otro lado, los grandes telescopios plantean limitaciones de disponibilidad para determinados proyectos astronómicos que, por sus características, son más adecuados para pequeños equipos: por ejemplo, observaciones de objetos brillantes, seguimiento de eventos transitorios que requieren alta capacidad de reacción, o proyectos que demandan series temporales prolongadas. Además, los telescopios de pequeña escala son accesibles para una comunidad de observadores cada vez más activa y con aportaciones científicas relevantes, como es la comunidad de astrónomos amateurs, que participa en proyectos de colaboración ProAm (*Professional–Amateur*).

1.3. Instrumento dual

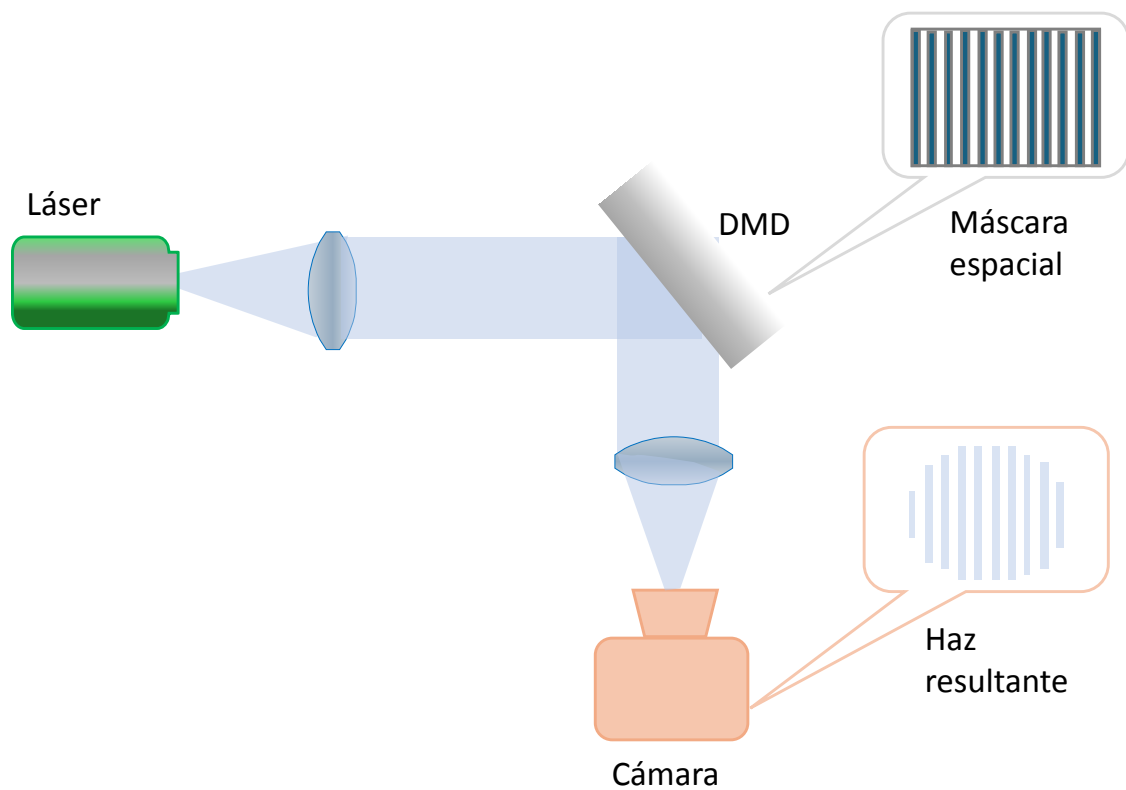
El diseño del instrumento propuesto contempla un funcionamiento dual como espectrógrafo y fotómetro. La diferencia fundamental entre ambas modalidades radica en la naturaleza de la medida: en espectroscopía se obtiene un conjunto de valores, cada uno correspondiente a una subdivisión del rango espectral; en fotometría se obtiene un valor integrado que representa la suma ponderada de un rango de longitudes de onda. Gracias a la modulación espacial proporcionada por el DMD y a la detección monópíxel, es posible realizar tanto espectroscopía como fotometría seleccionando convenientemente los rangos espaciales o espectrales mediante cambios puramente de software, sin necesidad de reajustes en la configuración óptico-mecánica.

1.4. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento se basa en registrar la información espectral mediante modulaciones ópticas controladas y un único detector puntual. Este detector puede ser, por ejemplo, un fotodiodo, un fotomultiplicador (PMT) o un diodo de avalancha monofotón (SPAD), en lugar de una cámara bidimensional. La escena espectral se proyecta sobre un modulador espacial de luz —por ejemplo, un DMD— que aplica patrones de codificación secuenciales. Cada patrón produce una medida escalar en el detector, y el conjunto de medidas permite reconstruir el espectro completo, o analizar regiones espectrales de interés. La Figura 1 muestra un esquema conceptual con detector bidimensional en el que

el DMD se configura con un patrón, por ejemplo barras secuenciadas, que modula el haz resultante al registrarse en el detector.

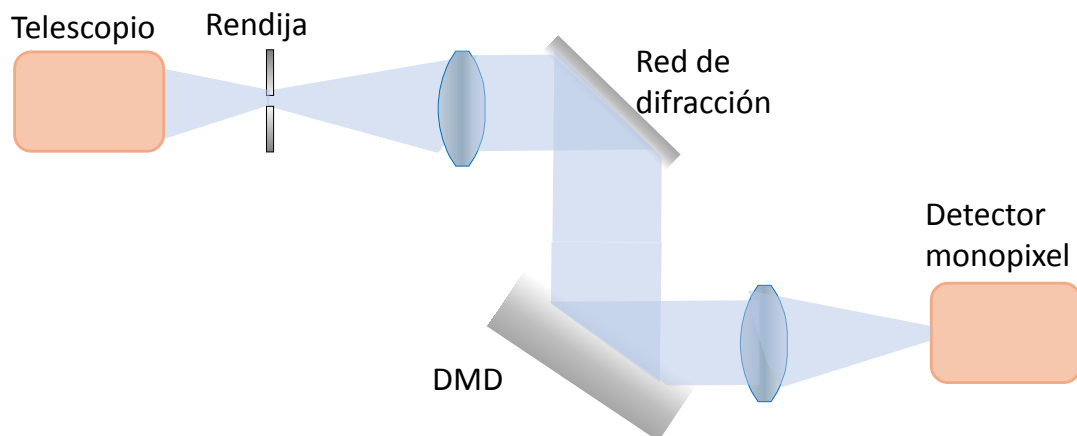
Figura 1. *Esquema conceptual de funcionamiento de la modulación espacial con detector bidimensional.*



La arquitectura propuesta surge dentro del marco del single-pixel imaging (Gibson et al., 2020) y del compressed sensing (CS) (Duarte et al., 2008), y resulta especialmente interesante cuando los detectores bidimensionales en la región espectral de interés son costosos, poco sensibles o presentan altos niveles de ruido. En el contexto del single-pixel imaging, la información espacial o espectral no se registra simultáneamente con una matriz de píxeles, sino mediante una secuencia de patrones de modulación aplicados sobre la luz incidente. Para cada patrón, el detector monopíxel mide una señal escalar, y el conjunto de medidas permite reconstruir la distribución original. Cuando la señal es dispersa o comprimible en una base adecuada, el compressed sensing permite reducir el número de medidas necesarias frente a un barrido completo (Candès et al., 2006; Donoho, 2006; Duarte et al., 2008; Gibson et al., 2020).

En un equipo convencional con sensor bidimensional, cada píxel del detector registra simultáneamente un canal espectral o espacial, lo que simplifica la adquisición pero requiere en cada píxel del sensor el adecuado rendimiento y bajo ruido. El enfoque monopíxel ofrece una alternativa que combina detectores simples y muy sensibles con técnicas computacionales de reconstrucción. La Figura 2 muestra el esquema conceptual de la técnica monopíxel, en la que la luz, procedente en este caso de la dispersión producida por una red de difracción, es modulada espacialmente por el DMD y registrada de forma integrada por el detector monopíxel.

Figura 2. Esquema conceptual de funcionamiento de la modulación espacial con detector monopíxel.



Entre sus principales ventajas destacan:

- Permitir el uso de detectores extremadamente sensibles y rápidos (PMT, SPAD), incluso en rangos donde las cámaras con sensores bidimensionales no son eficientes.
- Reducir significativamente los costes y la complejidad del sistema.
- Facilitar la implementación de estrategias de multiplexado, como las basadas en matrices de Hadamard o en *compressed sensing*, que pueden mejorar la relación señal-ruido bajo determinadas condiciones.

Sus limitaciones principales son el tiempo de adquisición más largo (al requerir secuencias de patrones) y la sensibilidad a variaciones temporales de la fuente o del entorno. No obstante, en escenarios donde la señal es débil, el régimen de ruido está dominado por

el detector y se requieren medidas precisas en bandas seleccionadas, esta arquitectura representa una alternativa eficiente y flexible.

1.5. Motivación y objetivos

En el presente Trabajo Fin de Grado se propone el diseño de un instrumento óptico astronómico basado en tecnología DMD y detector monópíxel, con funcionalidad dual de espectrógrafo y fotómetro, orientado a configuraciones compactas y especialmente adecuado para telescopios de pequeña o mediana apertura. A lo largo del documento se abordará la tecnología DMD y detectores monópíxel, su aplicación a la astronomía, el diseño óptico del instrumento y las técnicas de decodificación de la información asociadas a esta tecnología. Además del estudio teórico, se plantea un enfoque práctico mediante la construcción de un prototipo del instrumento y su puesta en marcha en condiciones de laboratorio. Los objetivos específicos son:

- Estudiar las tecnologías DMD y de detección monópíxel más adecuadas para aplicaciones astronómicas.
- Definir una configuración óptica realista y compacta que maximice la eficiencia y la versatilidad del sistema.
- Desarrollar un prototipo funcional y evaluar su rendimiento mediante pruebas experimentales en laboratorio.

En conjunto, este trabajo pretende demostrar que es posible trasladar conceptos avanzados de instrumentación óptica reconfigurable a sistemas astronómicos compactos, abriendo nuevas oportunidades para la astronomía observacional con recursos accesibles.

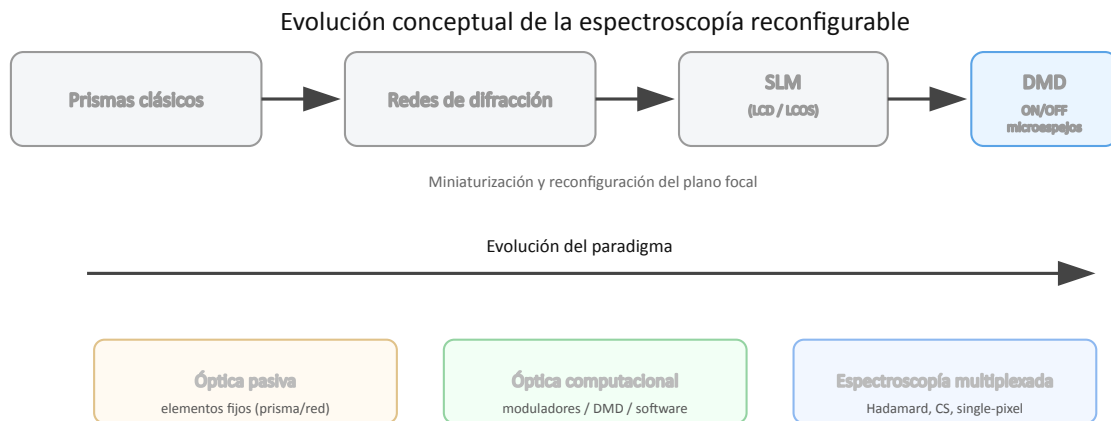
2. Estado del arte en instrumentación óptica reconfigurable

2.1. Evolución de la instrumentación espectroscópica compacta

Los avances en instrumentación óptica durante las últimas décadas han permitido miniaturizar los sistemas de análisis espectral manteniendo o incluso mejorando su resolución. La transición desde espectrógrafos de prisma o rejilla de gran formato hacia dispositivos reconfigurables ha estado impulsada por el desarrollo de la óptica computacional y las técnicas de detección monopíxel. En los años noventa, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) identificó el potencial de los moduladores espaciales de luz, en particular los *Digital Micromirror Devices*, como máscaras reconfigurables capaces de sustituir las rendijas o máscaras fijas tradicionales. Estos estudios condujeron al desarrollo de conceptos pioneros de espectroscopía multiobjeto y sentaron las bases de la instrumentación óptica reconfigurable moderna.

2.2. Introducción a los moduladores espaciales de luz

Los *Spatial Light Modulators* (SLM) constituyen la base tecnológica de los instrumentos ópticos reconfigurables. Entre ellos, los DMD han demostrado una madurez notable por su robustez mecánica, rapidez y compatibilidad con un amplio rango espectral. La Figura 3 muestra la evolución conceptual de la instrumentación espectroscópica desde prismas y redes estáticas hacia moduladores espaciales programables (SLM, DMD), reflejando la transición de la óptica pasiva a la óptica computacional y la espectroscopía multiplexada

Figura 3. *Evolución conceptual de la instrumentación espectroscópica.*

Un DMD está formado por una matriz bidimensional de micro espejos de forma que cada espejo puede orientarse individualmente entre dos estados estables, desviando la luz incidente según el estado hacia el detector o fuera de la trayectoria útil. A diferencia de los moduladores basados en cristal líquido, los DMD son insensibles a la polarización y toleran mayores densidades de potencia, lo que los hace adecuados tanto para proyección como para instrumentación científica. Esta combinación de fiabilidad, velocidad y estabilidad ha permitido su adopción en áreas que van desde la espectroscopía multiplexada hasta la óptica adaptativa.

Los moduladores espaciales de luz pueden implementarse mediante distintas tecnologías. Los LCD (Liquid Crystal Display) modulan la luz por transmisión mediante la variación de las propiedades ópticas de un cristal líquido, normalmente con dependencia de la polarización. Los LCOS (Liquid Crystal on Silicon) emplean también cristal líquido, pero en una arquitectura reflectiva integrada sobre un sustrato de silicio, lo que los hace adecuados para modulación de fase y aplicaciones holográficas. Los DMD, en cambio, realizan una modulación binaria de amplitud mediante microespejos MEMS basculantes controlados electrostáticamente (Efron, 1995; Lee, 2018).

La Tabla 1 muestra una comparativa entre modulares espaciales LCD (*Liquid Crystal Display*), LCOS (*Liquid Crystal on Silicon*) y DMD (*Digital Micromirror Device*) indicando su principio físico, aplicaciones típicas y una estimación cualitativa de velocidad y madurez tecnológica.

Tabla 1. *Comparativa entre moduladores espaciales.*

Tipo	Principio físico	Aplicaciones
LCD	Birrefringencia controlada (transmisión) Dependencia de polarización <i>Velocidad</i> 	Proyección, displays Óptica adaptativa básica <i>Madurez</i> 
LCOS	Modulación por reflexión (cristal líquido sobre silicio) Buena calidad de fase <i>Velocidad</i> 	Interferometría Metrología, holografía <i>Madurez</i> 
DMD	Reflexión binaria por microespejos (ON/OFF) Alta velocidad de conmutación <i>Velocidad</i> 	Proyección Espectroscopía, óptica computacional <i>Madurez</i> 

2.3. Aplicaciones científicas del DMD: de la proyección al laboratorio óptico

La introducción de los DMD en la investigación científica comenzó con la exploración de su uso como máscaras reconfigurables para espectroscopía multiobjeto. Durante la fase de diseño del *James Webb Space Telescope* (JWST), la NASA evaluó los DMD frente a otras tecnologías. Finalmente, se optó en el instrumento Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec) por los Micro Shutter Arrays (MSA) criogénicos por su mayor fiabilidad en entornos extremos, pero las pruebas con DMD demostraron su viabilidad para operaciones de selección dinámica de objetos (Ferruit & others, 2012). Posteriormente, la tecnología fue retomada en proyectos terrestres como IRMOS (*Infrared Multi-Object Spectrograph*) (MacKenty et al., 2003) y RITMOS (*Reconfigurable Integral-field Time-resolved Multi-Object Spectrograph*) (Meyer et al., 2004), que confirmaron la capacidad de los DMD para trabajar en condiciones reales de observación. En Europa, la misión SPACE (*Spectroscopic All-sky Cosmic Explorer*) (Cimatti & others, 2009) extendió este concepto a la observación espacial, consolidando el DMD como alternativa viable a los sistemas de rendija fija y como componente central de espectrógrafos reconfigurables de próxima generación.

2.4. Ejemplos recientes en astronomía, espectroscopía y óptica adaptativa

Actualmente, los DMD se emplean en múltiples líneas de desarrollo, entre ellas la espectroscopía multiobjeto, la espectroscopía Hadamard, la imagen hiperespectral y la instrumentación monopíxel (Gibson et al., 2020; Harwit & Sloane, 1979; MacKenty et al., 2003; Meyer et al., 2004):

- **Espectroscopía multiobjeto** en telescopios de 4–10 m, donde la rapidez de reconfiguración permite seleccionar objetivos sin cambiar máscaras físicas.
- **Espectroscopía Hadamard e hiperespectral**, en la que el DMD actúa como modulador en el plano espectral, implementando técnicas como *Hadamard Transform Spectral Imaging* (HTSI) o *Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging* (CASSI).
- **Instrumentación monopíxel y *single-pixel imaging***, que integran DMD y detectores rápidos (PMT, SPAD) para realizar reconstrucción espectral mediante técnicas de *compressed sensing*.
- **Óptica adaptativa y control de frentes de onda**, donde los DMD reemplazan a los espejos deformables en sistemas de baja frecuencia, ofreciendo flexibilidad y bajo coste.

Estos ejemplos ilustran la convergencia entre la instrumentación óptica y el procesamiento computacional, dando lugar a una nueva generación de dispositivos en los que la modulación digital y el análisis numérico se integran de forma inseparable (Candès et al., 2006; Donoho, 2006; Duarte et al., 2008).

2.5. Síntesis y motivación

La evolución desde los moduladores estáticos hasta los DMD marca un cambio de paradigma: los instrumentos dejan de ser estructuras rígidas y se convierten en sistemas reconfigurables por software. Los DMD ofrecen velocidad, versatilidad y precisión suficientes para aplicaciones astronómicas compactas y de bajo coste, abriendo la puerta a espectrógrafos y fotómetros adaptables a distintas configuraciones sin modificar la óptica. Estas ventajas justifican su elección como elemento central en el desarrollo del instrumento presentado en este trabajo, destinado a explorar la instrumentación astronómica reconfigurable para telescopios pequeños.

3. Tecnología DMD

3.1. Estructura y principio de funcionamiento

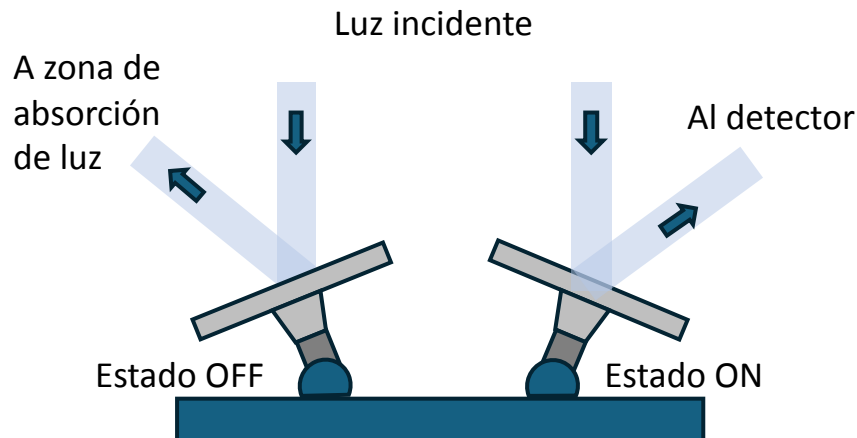
Los DMD son moduladores espaciales de luz desarrollados originalmente para aplicaciones de proyección, pero que en las últimas décadas han sido adoptados en instrumentación científica avanzada. Un DMD está constituido por una matriz bidimensional de micro espejos, cada uno de ellos direccionable de manera independiente y con dos estados estables (*ON/OFF*), que corresponden a dos ángulos de inclinación mecánica. De este modo, la luz incidente puede reflejarse hacia el detector o desviarse fuera del haz útil.

Desde el punto de vista óptico, un DMD funciona como una máscara espacial dinámica: cualquier patrón binario cargado en el chip determina cómo se redistribuye la luz reflejada. Esto permite reemplazar elementos físicos estáticos como máscaras, rendijas o moduladores de cristal líquido. A diferencia de estos últimos, que dependen de efectos electro-ópticos en materiales birrefringentes, los DMD actúan mediante control mecánico directo de superficies reflectantes. Esto los hace menos sensibles a la polarización, más robustos frente a potencias ópticas altas y utilizables en un rango espectral amplio, desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo medio.

La Figura 4 muestra el principio de funcionamiento de un DMD: cada micro espejo se monta sobre un sustrato CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor), tecnología empleada para integrar la electrónica de direccionamiento y control bajo la matriz de microespejos (Fossum, 1997; Lee, 2018). La conmutación entre los estados estables se produce cuando un electrodo atrae el micro espejo, basculándolo respecto a su eje torsio-

nal. Esta arquitectura permite direccionar miles de micro espejos de forma independiente y generar patrones ópticos binarios en alta velocidad.

Figura 4. Esquema conceptual del control los microespejos del DMD, aplicado como ejemplo a dos micro espejos de forma independiente.



3.2. Características físicas y eléctricas

Los DMD empleados en instrumentación científica integran en un mismo sustrato la matriz MEMS y la electrónica CMOS de control (Lee, 2018). El tamaño típico de los micro espejos está comprendido entre 5 y 10 micras, con un paso (*pitch*) similar. La inclinación mecánica máxima de cada espejo suele ser de $\pm 12^\circ$ o $\pm 17^\circ$, según el diseño y la familia del dispositivo. El principio de actuación es electrostático: la aplicación de una diferencia de potencial genera un par de torsión sobre la bisagra del espejo, que bascula entre dos posiciones estables. Este proceso ocurre en tiempos del orden de decenas de microsegundos, lo que permite frecuencias de conmutación de decenas de kHz. En términos eléctricos, los DMD operan con tensiones de conmutación típicas de 5–15 V y consumos globales del orden de miliamperios. Al tratarse de un sistema puramente capacitivo, el consumo depende más de la frecuencia de refresco que del número de espejos activados.

Cada micro espejo se fabrica en aluminio de alta reflectividad (90–95% en el visible), soportado sobre una estructura de silicio y aislado eléctricamente de la circuitería subyacente mediante una capa dieléctrica. La conmutación de los espejos se controla mediante buses digitales que actualizan patrones binarios almacenados en memoria, sincronizados por una controladora externa. El rango espectral operativo depende del recubrimiento reflectante y del material subyacente. En general, los DMD comerciales presentan buena respuesta desde 300 nm hasta $2.5\mu\text{m}$, con limitaciones en el ultravioleta profundo por absorción en el silicio y en el infrarrojo medio por pérdidas térmicas.

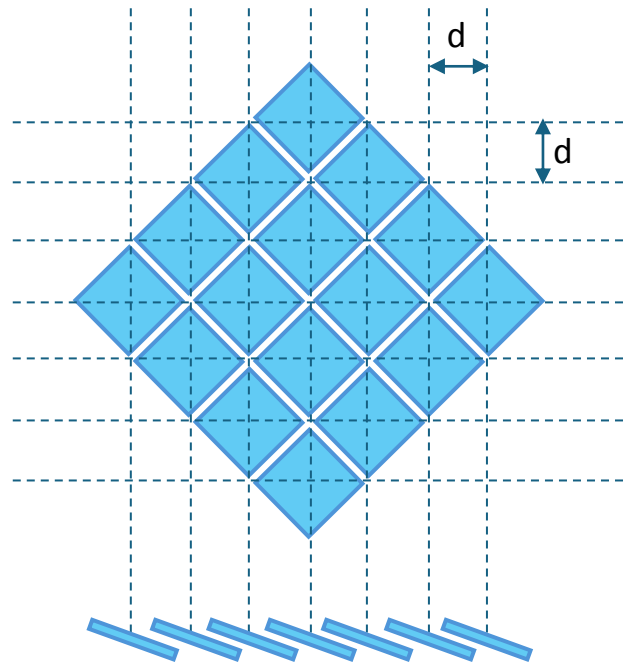
3.3. Limitaciones técnicas conocidas

El uso de DMD en instrumentación óptica presenta ciertas limitaciones derivadas de su estructura discreta y su naturaleza periódica:

Difracción intrínseca

La matriz periódica de micro espejos actúa como una red de difracción. Cuando todos los espejos están en un mismo estado (*ON* u *OFF*), la superficie se comporta como una rejilla de paso micrométrico d (ver Figura 5). La luz incidente se reparte entre distintos órdenes de difracción, cuya posición angular depende de la longitud de onda y del paso entre espejos.

Figura 5. El DMD puede modelarse como una red de difracción.



En la práctica, el DMD se comporta de manera similar a una red blazed, es decir, una red cuyo perfil geométrico favorece la concentración de la energía difractada en determinados órdenes. En el caso del DMD, el ángulo de basculamiento de los microespejos desplaza el máximo de difracción fuera de la dirección especular (Loewen & Popov, 1997; MKS Instruments, 2020).

Este efecto puede provocar:

- Pérdidas de eficiencia, al distribuirse parte de la energía en órdenes no aprovechados.
- Desplazamientos espectrales, debidos a la desviación angular introducida por la inclinación de los micro espejos.
- Luz parásita, que puede introducir ruido en el detector si no se controla adecuadamente.

Para mitigar estos efectos, es necesario optimizar el ángulo de incidencia y la geometría óptica de modo que el orden principal coincida con la trayectoria útil del instrumento. Este comportamiento se tendrá en cuenta en la fase de diseño, con objeto de aprovechar otros órdenes además del 0, y maximizar así la energía recibida en el sensor.

Eficiencia óptica

La eficiencia global depende del recubrimiento metálico, el ángulo de basculamiento y las pérdidas por difracción. Los valores típicos oscilan entre el 65% y el 85% en el visible, con una ligera disminución hacia el azul debido a la dispersión superficial.

Polarización y fiabilidad

Aunque los DMD son poco sensibles a la polarización, se han observado ligeras diferencias de reflectividad entre las componentes s y p de la polarización eléctrica de la luz, especialmente a grandes ángulos de incidencia (Dudley et al., 2003). En cuanto a fiabilidad, los micro espejos pueden sufrir degradación por contaminación o fatiga mecánica, pero los dispositivos modernos superan los 10^{11} ciclos de conmutación sin fallo observable, lo que garantiza un uso prolongado incluso en entornos de observación astronómica (Texas Instruments, 2018).

Tamaño de píxel y resolución

El tamaño del micro espejo determina el límite de resolución espacial o espectral. En aplicaciones espectroscópicas, el paso entre espejos define el ancho mínimo de canal resoluble, por lo que este parámetro debe considerarse en el dimensionamiento del instrumento.

3.4. Tendencias de desarrollo

La evolución tecnológica de los DMD apunta hacia la miniaturización, la integración electrónica y la ampliación del rango operativo:

- **Miniaturización y alta densidad.** Los nuevos dispositivos alcanzan resoluciones 4K con tamaños de espejo inferiores a $5\mu m$, permitiendo una mayor granularidad espectral o espacial.
- **Integración MEMS-CMOS avanzada.** La fabricación avanza hacia la integración monolítica de la electrónica de control bajo la capa MEMS, reduciendo retardos y mejorando la uniformidad de conmutación (Lee, 2018).
- **Altas tasas de refresco y modulación analógica.** Se desarrollan arquitecturas capaces de operar por encima de 100 kHz y con modulación temporal PWM (*Pulse Width Modulation*).

tion) que permite niveles intermedios de reflectividad, útiles en técnicas de control de intensidad o gradación de gris.

- **Ampliación del rango espectral.** Nuevos recubrimientos reflectantes (oro, platino, multicapa dieléctrico) buscan extender la reflectividad hacia el infrarrojo medio y el ultravioleta profundo.
- **Uso en entornos extremos.** Para aplicaciones espaciales, se investiga en encapsulados herméticos y operación criogénica con resistencia a radiación, continuando el interés iniciado por la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) en espectroscopía multiobjeto reconfigurable.

Estas tendencias se apoyan en la evolución de la tecnología Digital Light Processing (DLP) y en los avances en fiabilidad de los microespejos MEMS (Lee, 2018; Texas Instruments, 2018).

En conjunto, los DMD representan una tecnología madura y versátil dentro de los moduladores espaciales de luz. Su combinación de robustez mecánica, alta velocidad de conmutación, amplio rango espectral y control digital preciso los convierte en candidatos idóneos para la instrumentación científica reconfigurable. Su funcionamiento puramente reflectivo y la independencia de la polarización simplifican el diseño óptico, mientras que su capacidad de modulación rápida permite implementar técnicas como la multiplexación Hadamard o el *compressed sensing*.

4. Tecnología de detección monopíxel

4.1. Concepto de detección monopíxel

Los espectrógrafos de un solo píxel se basan en el principio de registrar la información espectral mediante modulaciones ópticas controladas y un único detector puntual (fotodiodo, PMT, SPAD, etc.), en lugar de una cámara bidimensional. La escena espectral se proyecta sobre un modulador espacial de luz —por ejemplo, un DMD— que aplica patrones de codificación secuenciales. Cada patrón produce una medida escalar en el detector, y el conjunto de medidas permite reconstruir el espectro completo, o medir regiones espectrales específicas. En un espectrógrafo convencional que emplee una cámara con sensor bidimensional, cada píxel del detector registra simultáneamente un canal espectral o espacial. En contraste, la aproximación de un solo píxel presenta un esquema radicalmente distinto:

Ventajas

- Uso de detectores simples, sensibles y rápidos en rangos espectrales donde las cámaras 2D son costosas o poco maduras (por ejemplo, en el infrarrojo medio o en el rango submilimétrico).
- Posibilidad de emplear fotomultiplicadores o SPADs para mejorar la sensibilidad en condiciones de flujo extremadamente bajo.
- Reducción de costes, simplificación de la electrónica asociada y mayor robustez general del sistema detector.

Desventajas

- Necesidad de múltiples exposiciones secuenciales para reconstruir un espectro completo, lo que puede limitar la cadencia temporal.
- Mayor sensibilidad a inestabilidades o fluctuaciones temporales (*seeing*, guiado, variabilidad atmosférica).
- Complejidad en el procesamiento y calibración, ya que la reconstrucción requiere conocer con precisión los patrones proyectados y su respuesta temporal.

La arquitectura de un solo píxel es particularmente útil en rangos donde no existen detectores matriciales eficientes o donde las técnicas de multiplexado permiten mejorar la relación señal/ruido en la detección de fuentes débiles.

4.2. Tecnologías habituales de detector monopíxel

A continuación se revisan las principales tecnologías empleadas como detectores monopíxel, indicando sus características fundamentales, ventajas y limitaciones.

- **Fotomultiplicadores (PMT).** Ofrecen ganancia muy alta (10^6), excelente sensibilidad en luz débil y posibilidad de conteo de fotones (Hamamatsu Photonics, 2007). Cubren típicamente el visible y parte del infrarrojo cercano, dependiendo del tipo de fotocátodo, con tiempos de respuesta de nanosegundos o incluso subnanosegundos. Se basan en la emisión fotoeléctrica: un fotón incidente libera un electrón en el fotocátodo, que se acelera hacia una cadena de díodos, multiplicándose exponencialmente. Este principio permite detectar flujos extremadamente bajos y registrar señales individuales de fotones. Los módulos modernos integran el tubo, la fuente de alta tensión, el preamplificador y la electrónica de discriminación y conteo, con interfaces USB (Universal Serial Bus) o TTL (Transistor–Transistor Logic) para sincronización. Su robustez y alta velocidad los hacen especialmente apropiados para aplicaciones de conteo de fotones y espectroscopía multiplexada rápida (Fellgett, 1969; Hamamatsu Photonics, 2023; Harwit & Sloane, 1979).
- **Fotodiodos de avalancha (APD).** Presentan ganancia interna moderada y buen rendimiento en el visible e infrarrojo cercano, con tensiones de operación menores que un PMT. Se utilizan cuando se requiere velocidad, compacidad y estabilidad, con niveles de

luz algo mayores que los detectables con un fotomultiplicador. Los APD operan cerca del umbral de avalancha, proporcionando ganancias del orden de 10^2 a 10^3 , con tiempos de respuesta en el rango de nanosegundos (Hamamatsu Photonics, 2019). En aplicaciones científicas, su ventaja principal reside en su eficiencia cuántica, su pequeño tamaño y su facilidad de integración óptica, aunque su sensibilidad en señales muy débiles suele ser inferior a la de un PMT en modo de conteo de fotones.

- **Single-Photon Avalanche Diodes (SPAD).** Los SPAD son fotodiodos de avalancha polarizados por encima de la tensión de ruptura, en el denominado modo **Geiger**. En estas condiciones, la absorción de un único fotón puede desencadenar una avalancha autosostenida de portadores, generando un pulso eléctrico asociado a la detección de un evento individual. A diferencia de un APD convencional, la señal de un SPAD no es proporcional de forma directa al flujo incidente, sino que se interpreta como una sucesión de cuentas de fotones. Por ello, son especialmente adecuados para detección de fotones individuales, medidas temporales de alta resolución, técnicas de **time-of-flight** y experimentos de coincidencia temporal. Su resolución temporal puede alcanzar decenas de picosegundos, dependiendo del dispositivo y de la electrónica asociada. Existen SPAD de silicio para el visible y el infrarrojo cercano, así como dispositivos basados en InGaAs para longitudes de onda más largas. Requieren circuitería de **quenching** para detener la avalancha y preparar el detector para un nuevo evento. Estas características hacen que los SPAD sean especialmente útiles en detección de fotones individuales y medidas temporales de alta resolución, aunque requieren circuitos de quenching y correcciones asociadas a cuentas oscuras, tiempo muerto y afterpulsing (Bronzi & others, 2014; Eisaman et al., 2011).
- **Fotodiodos de silicio (PIN).** No presentan ganancia interna y se caracterizan por su bajo ruido, excelente linealidad y gran ancho de banda. Son adecuados cuando el flujo óptico es relativamente alto y se requiere electrónica simple. La corriente de fotogeneración es proporcional al flujo incidente, lo que los hace apropiados para mediciones absolutas, calibraciones o monitorización de señales estables. A diferencia de los detectores con ganancia, los PIN presentan un comportamiento muy lineal y estable, pero su sensibilidad en bajas señales es limitada, ya que no amplifican internamente la señal fotoeléctrica.

Por su linealidad y estabilidad, los fotodiodos PIN se emplean habitualmente en medidas radiométricas, calibración y monitorización de señales ópticas cuando no se requiere ganancia interna (Eppeldauer, 1991).

4.3. Limitaciones y tendencias actuales

Cada tecnología presenta limitaciones inherentes que determinan su idoneidad para diferentes regímenes de observación:

- Los **PMT** requieren alta tensión de operación, habitualmente de centenares de voltios, y presentan una sensibilidad limitada en el infrarrojo. Además, son dispositivos más voluminosos que los detectores semiconductores y pueden requerir protección frente a campos magnéticos o niveles de iluminación excesivos. No obstante, los avances en fotocátodos multialcalinos o de GaAsP han ampliado su eficiencia cuántica y su rango útil hacia el rojo y el infrarrojo cercano.
- Los **APD** ofrecen un compromiso entre sensibilidad, compacidad y robustez, aunque su ganancia está limitada y el proceso de avalancha introduce ruido adicional. Además, su rendimiento depende de la temperatura y de la estabilidad de la tensión de polarización, por lo que requieren un control electrónico cuidadoso.
- Los **SPAD** proporcionan gran sensibilidad y excelente resolución temporal, pero presentan limitaciones asociadas a las cuentas oscuras (**dark counts**), el tiempo muerto posterior a cada detección, el **afterpulsing** y la dependencia térmica. Estas características obligan a emplear circuitería de **quenching**, control de temperatura y estrategias de corrección cuando se requieren medidas precisas de flujo.
- Los **fotodiodos PIN** son extremadamente lineales, estables y sencillos de utilizar, pero su uso queda restringido a condiciones de flujo relativamente alto, monitorización o calibración, dado que no proporcionan ganancia interna y no son adecuados para detección de señales extremadamente débiles.

Las tendencias actuales en detección monopíxel apuntan hacia la:

- Integración de detectores compactos con electrónica digital de conteo, discriminación y sincronización incorporada.

- Miniaturización y encapsulados más robustos, con interfaces de comunicación estándar como USB, TTL o Ethernet.
- Ampliación del rango espectral mediante nuevos materiales de fotocátodo en PMT y nuevas heteroestructuras semiconductoras en APD y SPAD, como GaAsP, InGaAs o GaN.
- Reducción del ruido oscuro y mejora de la estabilidad térmica mediante control activo de temperatura, refrigeración termoeléctrica y electrónica de lectura optimizada.

4.4. Justificación del uso de PMT en este trabajo

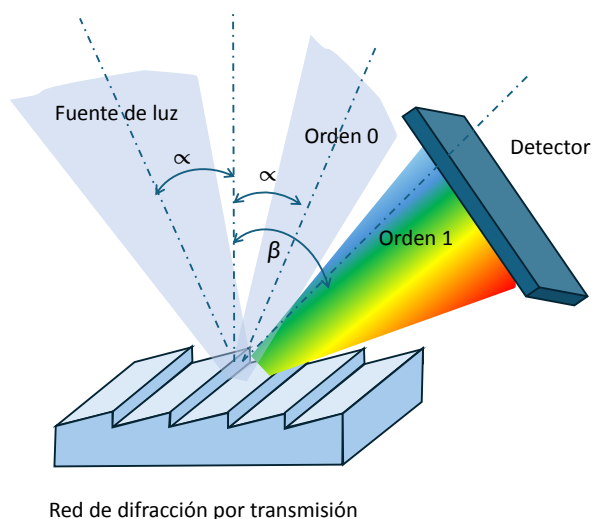
Para el presente prototipo, se adopta un fotomultiplicador como detector principal, dada su capacidad de conteo de fotones, su amplio rango dinámico y su elevada velocidad. El modelo seleccionado, que se detallará en apartados posteriores, integra el fotomultiplicador, la fuente de alta tensión, la etapa de preamplificación y discriminación, el contador digital y la interfaz de comunicación USB en una carcasa compacta con apantallamiento magnético.

El uso de un fotomultiplicador ofrece una combinación de alta velocidad, bajo ruido de lectura y gran rango dinámico, aspectos críticos en un instrumento DMD donde los patrones ópticos se actualizan rápidamente. La naturaleza puntual del detector permite una lectura sincronizada con los patrones proyectados, garantizando la coherencia temporal necesaria para la reconstrucción Hadamard o *compressed sensing*. En consecuencia, la elección de un PMT como detector monópíxel representa la solución más adecuada para este prototipo, equilibrando sensibilidad, velocidad y compatibilidad con técnicas de multiplexación óptica.

5. Elemento dispersor

5.1. Opciones de dispersión: prisma vs red

El elemento dispersor del instrumento puede ser un prisma o una red de difracción, ya sea de reflexión o de transmisión. Ambos sistemas permiten descomponer la luz incidente en sus componentes espectrales, aunque difieren en su principio físico, su dependencia angular y su eficiencia en distintas longitudes de onda. Los prismas producen la dispersión a partir de la variación del índice de refracción con la longitud de onda. Al no generar órdenes de difracción superpuestos, los prismas presentan una alta eficiencia en su rango de transmisión, especialmente en el visible. Sin embargo, su dispersión no es lineal con la longitud de onda, la resolución depende fuertemente del material y del ángulo del prisma, y la cobertura espectral suele ser limitada cuando se requiere alta resolución. Las redes de difracción, en cambio, basan la dispersión en la interferencia producida por ranuras grabadas o replicadas en una superficie. Cada ranura actúa como fuente secundaria coherente, y la superposición de las ondas difractadas genera máximos en direcciones que cumplen la ecuación de la red. Estas redes pueden fabricarse para operar en reflexión o transmisión (ver Figura 6) y ofrecen una relación casi lineal entre ángulo de difracción y longitud de onda, lo que simplifica la calibración espectral (Loewen & Popov, 1997; MKS Instruments, 2020).

Figura 6. *Funcionamiento de una red de difracción por transmisión.*

Aunque los prismas presentan una mayor eficiencia integrada en un ancho de banda amplio, las redes permiten un control más preciso del rango espectral útil y una dispersión ajustable mediante la elección de la densidad de líneas. En consecuencia, se ha considerado que para el instrumento propuesto resulta más adecuada una red de difracción, en particular una de reflexión, que se integra de manera natural en la geometría óptica adoptada.

5.2. Limitaciones prácticas

A pesar de su idoneidad, las redes de difracción presentan limitaciones técnicas que deben considerarse en el diseño del instrumento. En primer lugar, la eficiencia varía significativamente con la longitud de onda. La red seleccionada, Edmund Optics 64-402, es una red de reflexión rulada de 150 líneas/mm, con recubrimiento de aluminio, optimizada para 500 nm y con una eficiencia pico típica del orden del 69% (Edmund Optics, s. f.). Esta elección resulta adecuada para el prototipo porque prioriza la eficiencia en torno a la región central del visible, frente a otras alternativas como redes holográficas, que suelen emplearse cuando se busca minimizar la luz parásita, o redes con mayor densidad de líneas, que proporcionan mayor dispersión pero pueden reducir el flujo útil y exigir una geometría más crítica. No

obstante, al estar optimizada para una longitud de onda concreta, su rendimiento disminuye hacia los extremos del espectro útil.

La uniformidad de las ranuras y su rugosidad superficial también pueden introducir difracción en órdenes no deseados, generando luz parásita o *ghosts*. Estos efectos son intrínsecos a las redes ruladas y deben minimizarse mediante un diseño óptico que bloquee los órdenes secundarios fuera del campo útil.

En cuanto a la resistencia óptica, aunque la red seleccionada presenta umbrales de daño elevados, se debe evitar su exposición directa a fuentes intensas o concentradas, especialmente en configuraciones donde la luz convergente pueda superar localmente los límites de irradiancia. El manejo debe realizarse por los bordes, evitando contacto con la superficie ranurada, ya que los depósitos microscópicos o las huellas pueden degradar la eficiencia y alterar la uniformidad angular de la difracción.

6. Diseño del instrumento

6.1. Descripción global

El instrumento desarrollado en este trabajo se concibe como un sistema dual capaz de operar tanto como espectrógrafo como fotómetro, combinando un elemento dispersor, un modulador espacial de luz tipo DMD y un detector monópíxel. El equipo permite operar como espectrógrafo, ya que en el plano del DMD se genera una imagen espectral que puede leerse en el detector de forma secuencial o mediante técnicas de decodificación. También puede utilizarse el DMD para seleccionar regiones espectrales y emplear el equipo como un fotómetro en los rangos espectrales que se deseen. Ambas formas de operar no requieren modificar la estructura óptica del instrumento y permiten, programando por software el DMD, operar de forma multifuncional. Este diseño dual permite realizar, en una misma sesión observacional, mediciones espectrométricas y fotométricas mediante cambios puramente digitales en los patrones de los micro espejos, sin ajustes mecánicos ni reposicionamiento óptico.

Modo espectrógrafo

En un espectrógrafo convencional, el plano focal está ocupado por una cámara CCD (Charge-Coupled Device) o CMOS, que registra simultáneamente todo el espectro. En el presente diseño, el detector 2D se sustituye por el DMD. El DMD se coloca en el plano focal del espectrógrafo, orientado de modo que las columnas de micro espejos se alineen con la dirección de dispersión espectral, mientras que las filas se extienden perpendicularmente a ella. Cada columna del DMD corresponde a un intervalo estrecho de longitud de onda, mientras que las filas representan las distintas posiciones espaciales a lo largo de la rendija.

De esta forma, se pueden seleccionar regiones específicas tanto en el dominio espectral como en el espacial. Cuando el instrumento se utiliza en modo espectrógrafo, se activan grupos de columnas que corresponden a franjas espectrales discretas. El detector monopíxel registra la intensidad total reflejada por los micro espejos activados, y la secuencia completa de patrones permite reconstruir el espectro del objeto observado.

Modo fotómetro

En modo fotométrico, en cambio, se activan conjuntos de columnas que cubren un rango espectral más amplio (por ejemplo, el correspondiente a un filtro fotométrico *Johnson* o *Sloan*). Además, puede seleccionarse simultáneamente una región equivalente del fondo de cielo (filas superiores e inferiores a la del objeto), permitiendo restar su contribución y obtener una medida fotométrica diferencial. El detector monopíxel recibe exclusivamente la luz procedente de los micro espejos activados en estado *ON*. El sistema de control sincroniza las secuencias del DMD con la ventana de adquisición del fotomultiplicador, garantizando que cada patrón de micro espejos corresponda a una medida puntual y precisa. Esta disposición asegura una alta eficiencia óptica, ya que solo la luz útil se dirige al detector, y permite trabajar con tiempos de conmutación del orden de decenas de microsegundos, adecuados para técnicas de multiplexación rápida.

Partes principales que componen el diseño

Desde el punto de vista funcional, el instrumento se compone de tres bloques principales:

- **Bloque óptico:** Basado en el diseño de un espectrógrafo Czerny-Turner. Incluye la rendija de entrada, los espejos colimadores y de enfoque, la red de difracción y el DMD situado en el plano espectral. La luz del objeto astronómico entra a través de la rendija, es colimada, dispersada por la red y proyectada sobre el DMD, donde se aplican los patrones de modulación.
- **Bloque de detección:** constituido por el fotomultiplicador, que recoge la luz reflejada por los micro espejos activados gracias a una lente de enfoque, y que se responsabilizará del conteo de fotones.
- **Bloque de control:** que proporciona el control electrónico del DMD y del PMT.

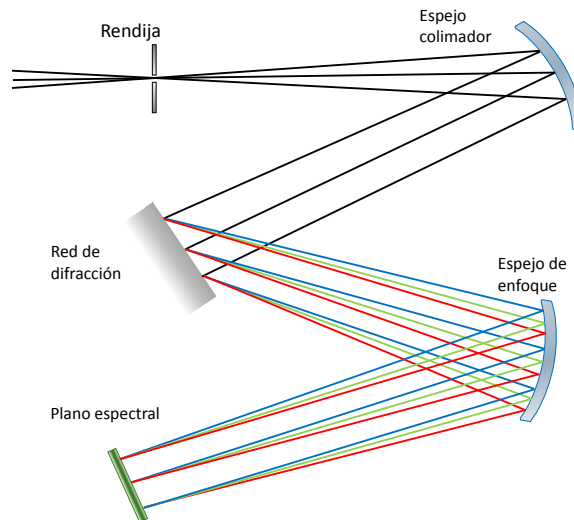
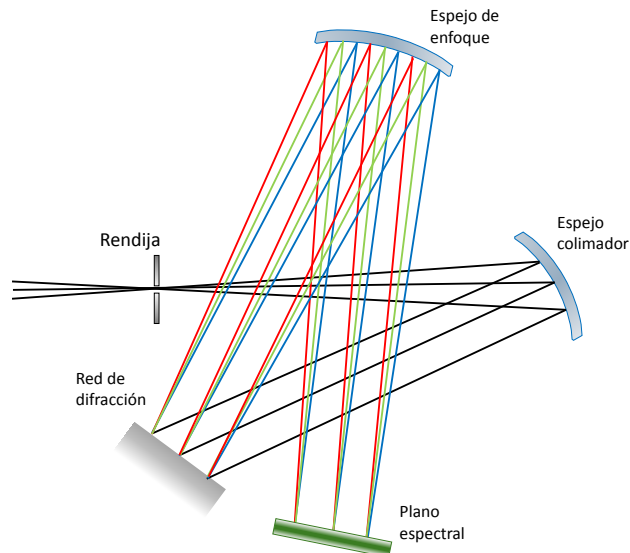
En los siguientes apartados se muestra el diseño adoptado para el instrumento, tanto desde un punto de vista conceptual como para el cálculo de la geometría y su implementación para la verificación en un software de trazado geométrico de rayos.

6.2. El espectrógrafo Czerny–Turner clásico cruzado

El espectrógrafo *Czerny–Turner* (C–T) constituye una de las configuraciones más ampliamente empleadas en espectroscopía de reflexión debido a su equilibrio entre simplicidad geométrica, eficiencia óptica y facilidad de alineamiento (Czerny & Turner, 1930; Schroeder, 2000; Wang et al., 2019). Está formado por tres elementos principales: una rendija de entrada, dos espejos esféricos (colimador y de enfoque) y una red de difracción situada entre ambos. En esta configuración, la rendija define el haz de entrada, el espejo colimador transforma la luz divergente en un haz paralelo que incide sobre la red, y el espejo de enfoque proyecta el espectro dispersado sobre el plano del detector o, en el caso de este trabajo, sobre el modulador DMD.

Configuración clásica y versión cruzada. En la disposición clásica del espectrógrafo C–T (Figura 7), los espejos colimador y de enfoque se encuentran en un mismo plano, lo que facilita la alineación pero introduce aberraciones fuera del eje —principalmente astigmatismo y coma— que degradan la calidad de imagen a lo largo del campo espectral.

La versión denominada *Czerny–Turner* cruzada o *crossed Czerny–Turner* (Figura 8) introduce un cruce entre los ejes ópticos de los dos espejos, de manera que sus planos de reflexión se hallan inclinados simétricamente respecto al plano de la red. Esta disposición geométrica reduce notablemente el astigmatismo y la curvatura de campo, permitiendo obtener imágenes espectrales más planas y uniformes en un espacio físico reducido. Además, proporciona un acceso más directo al plano focal, lo que facilita la inserción de elementos moduladores o detectores compactos.

Figura 7. *Esquema óptico espectrógrafo Czerny–Turner clásico.***Figura 8.** *Esquema óptico espectrógrafo Czerny–Turner cruzado.*

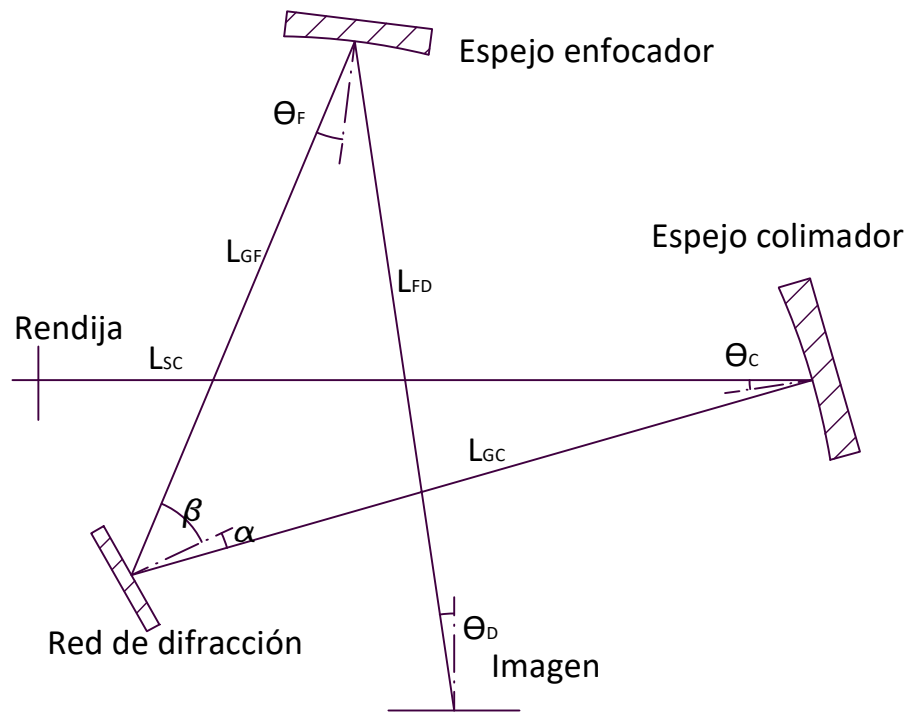
Ventajas frente al diseño Czerny–Turner convencional. Entre las ventajas de la configuración cruzada destacan:

- **Reducción de aberraciones:** la geometría cruzada minimiza el astigmatismo y la coma sin necesidad de recurrir a ópticas asféricas o correcciones adicionales.

- **Campo focal más plano:** se obtiene una mayor uniformidad de foco a lo largo del espectro, mejorando la resolución efectiva.
- **Compacidad del diseño:** la disposición cruzada permite reducir las distancias entre elementos y optimizar la distribución mecánica del instrumento.
- **Accesibilidad del plano focal:** el plano de detección queda más despejado, facilitando la integración de dispositivos como un DMD o un detector monopíxel.

Aplicación en el instrumento propuesto

En este trabajo se adopta la configuración *crossed Czerny–Turner* como base para el diseño óptico del espectrógrafo/fotómetro DMD–monopíxel. Esta arquitectura conserva las ventajas clásicas del sistema *Czerny–Turner* —linealidad espectral, estabilidad y facilidad de calibración—, al tiempo que ofrece una geometría compatible con un plano focal programable. La incorporación del DMD en dicho plano permite utilizar la superficie de micro espejos como modulador espectral dinámico, transformando un espectrógrafo tradicional en un sistema reconfigurable capaz de realizar espectroscopía y fotometría mediante control puramente digital. La Figura 9 muestra los elementos fundamentales de la versión cruzada donde también se representa la nomenclatura adoptada: las distancias entre componentes L_{SC} , L_{GF} , L_{FD} y L_{GC} ; los ángulos de incidencia y reflexión sobre los espejos θ_C y θ_F ; los ángulos de incidencia y difracción en la red, α y β ; así como el ángulo de detección θ_D .

Figura 9. Esquema óptico espectrógrafo Czerny–Turner cruzado con indicación de cotas.

6.3. Parámetros geométricos y ecuaciones de diseño

Constantes de diseño

En el prototipo propuesto se han seleccionado espejos esféricos con una distancia focal de $f_C = f_F = 100 \text{ mm}$, lo que implica radios de curvatura $R_C = R_F = 200 \text{ mm}$ al cumplir $f = \frac{R}{2}$. El elemento dispersor es una red de difracción de $150 \frac{l}{\text{mm}}$, cuyo espaciado entre ranuras es

$$d = \frac{1}{150} \text{ mm} = 6.667 \mu\text{m} \quad (1)$$

Se establece como longitud de onda central de diseño $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$, correspondiente al centro del rango visible (300 – 700 nm), tomado como banda operativa del espectrógrafo.

A lo largo de este trabajo se considera que el espectrógrafo está alimentado por un haz con relación focal $f/\# = 10$, habitual en telescopios pequeños.

Ecuación fundamental de la red

La dispersión de la luz por una red de difracción plana se rige por la ecuación general de la red, que expresa la condición de interferencia constructiva entre ondas difractadas por ranuras consecutivas (Loewen & Popov, 1997; MKS Instruments, 2020):

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda, \quad (2)$$

donde d es el paso de la red, α el ángulo de incidencia, β el ángulo de difracción, m el orden de difracción y λ la longitud de onda. Esta relación expresa la condición de interferencia constructiva entre las ondas reflejadas por las ranuras: para cada longitud de onda existe un par (α, β) que satisface la ecuación. En el presente diseño se trabaja en el primer orden ($m = 1$), lo que proporciona la máxima eficiencia en el visible.

Focos sagital y tangencial.

En el espectrógrafo *Czerny–Turner* cruzado, ambos espejos esféricos (colimador y de enfoque) trabajan fuera de eje, es decir, el haz incidente no coincide con el eje de simetría de los espejos. El ángulo que forman el rayo principal y el eje óptico local de cada espejo se denomina **ángulo fuera de eje** y se representa por δ . En el esquema de la Figura 9, este ángulo corresponde a los valores $\delta = \theta_c$ para el espejo colimador y $\delta = \theta_f$ para el espejo de enfoque.

El efecto de esta incidencia oblicua es que la curvatura efectiva del espejo difiere en los dos planos principales del sistema: el **plano tangencial**, que contiene el rayo principal y el eje óptico del espejo, y el **plano sagital**, perpendicular al anterior. En consecuencia, las focales efectivas son distintas y se expresan como (Wang et al., 2019):

$$f_T = \frac{R \cos \delta}{2}, \quad f_S = \frac{R}{2 \cos \delta} \quad (3)$$

donde R es el radio de curvatura del espejo. Dado que $f_T \neq f_S$, los rayos en los dos planos convergen en posiciones diferentes, generando **astigmatismo**. Este fenómeno se traduce en la aparición de dos focos distintos: uno tangencial y otro sagital.

Condición de igualación de focos.

Para minimizar el astigmatismo en el espectrógrafo, se busca que las posiciones de imagen en los planos tangencial y sagital coincidan al menos para la longitud de onda central de

diseño. El análisis de imagen en ambos planos se obtiene combinando la ecuación de las focales efectivas de los espejos con las relaciones de formación de imagen en la red de difracción, que actúa de manera diferente en cada plano: en el *plano tangencial* introduce una variación angular dependiente de α y β , mientras que en el *plano sagital* se comporta como un espejo plano, sin dispersión transversal.

El trazado del rayo principal a través del espejo colimador, la red y el espejo de enfoque permite obtener las posiciones finales de imagen en ambos planos, dadas por las expresiones (Wang et al., 2019):

$$F_T = \frac{R_C R_F L_{SC}}{A}, F_S = \frac{R_C R_F L_{SC}}{B} \quad (4)$$

donde F_T y F_S representan las distancias imagen en los planos tangencial y sagital, respectivamente, y

$$A = 2L_{SC} \left(R_C \sec \theta_F + R_F \sec \theta_C \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \right) - R_C R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \quad (5)$$

$$B = 2L_{SC} ((R_C \cos \theta_F + R_F \cos \theta_C)) - R_C R_F \quad (6)$$

El término A corresponde al caso tangencial, donde intervienen los factores de incidencia y difracción en la red, mientras que B se asocia al plano sagital, donde la red refleja sin alterar la convergencia transversal. La diferencia entre F_T y F_S determina la magnitud del astigmatismo residual. El criterio de diseño consiste en ajustar los parámetros geométricos del sistema (L_{SC} , L_{GF} , θ_C , θ_F) de forma que:

$$F_T = F_S, \quad (7)$$

para la longitud de onda de referencia $\lambda_0 = 550$ nm. El cumplimiento de esta condición, denominada *igualación de focos*, asegura que el plano de imagen sea común a ambos haces, minimizando el astigmatismo en la zona central del espectro visible.

Criterios geométricos prácticos.

Para definir una configuración geométrica viable, se establecen los valores iniciales atendiendo a las limitaciones constructivas y a la compacidad del instrumento. Por motivos

mecánicos y de accesibilidad del haz, se fija el ángulo del espejo colimador en $\theta_c = -7.5^\circ$, lo que corresponde a un ángulo de cruce total $\gamma \approx 15^\circ$ entre los brazos de entrada y salida del espectrógrafo.

En la red de difracción se adopta un rango de incidencia comprendido entre $\alpha = -5^\circ$ y -15° , de modo que la diferencia angular $\beta - \alpha$ se mantenga próxima a 27° , valor adecuado para cubrir el orden 1 de difracción con la geometría compacta buscada. A partir de la ecuación de la red,

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda, \quad (8)$$

y tomando $d = 6.667 \sim \mu m$ (150 líneas por nm), $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ y $m = 1$, se obtiene una pareja de ángulos aproximada de $\alpha = -10.8^\circ$ y $\beta = 15.7^\circ$. Los ángulos de incidencia sobre los espejos se consideran del orden de 10° , lo que garantiza una geometría cruzada compacta y sin obstrucciones.

Aplicando la condición de igualdad de focos $F_T = F_S$ derivada anteriormente, y con los valores adoptados de θ_c , θ_F , α y β , se obtiene una distancia entre la rendija y el espejo colimador de aproximadamente

$$L_{SC} \approx 46 \text{ mm} \quad (9)$$

El resultado indica que, bajo esta configuración, el plano focal común de los haces tangencial y sagital se forma a una distancia considerable del espejo de enfoque, muy superior a su distancia focal nominal de 100 mm . En la práctica, ello situaría el plano del detector en una posición físicamente poco viable dentro de un diseño compacto.

Por esta razón, se **desestima la posibilidad de cumplir simultáneamente la condición de igualdad de focos en ambos planos.**

Nuevo enfoque de diseño y evaluación del tamaño de la imagen transversal.

En lugar de imponer estrictamente la condición de igualdad de focos para eliminar el astigmatismo, se adopta un enfoque alternativo basado en **priorizar los criterios geométricos de compacidad del instrumento**. Este criterio resulta más adecuado para un prototipo experimental, en el que las dimensiones físicas y la simplicidad mecánica tienen un peso

mayor que la corrección completa de las aberraciones. Por tanto, se acepta que los planos tangencial y sagital no coincidan exactamente, y se evalúa el efecto de este desacoplo a través del tamaño de la imagen proyectada en el plano sagital.

El parámetro relevante en este caso es el **ancho de la mancha de imagen** (*spot size*) en la dirección perpendicular a la dispersión espectral. En un sistema convencional con detector bidimensional —por ejemplo, una cámara CCD o una matriz lineal— dicho ancho define la extensión de la imagen en la dirección no dispersiva y condiciona la resolución espacial o el grado de solapamiento entre canales. Sin embargo, en el instrumento desarrollado en este trabajo el detector es **monopíxel**, y la información espacial se obtiene secuencialmente mediante modulación en el plano del DMD. En este contexto, el desenfoque sagital no produce una pérdida de resolución espectral, sino únicamente una línea de iluminación de longitud H sobre el plano del detector en el plano perpendicular a la dispersión, sin impacto significativo en la calidad de la medida.

La magnitud H puede estimarse a partir de la diferencia entre los focos tangencial y sagital. Según el desarrollo de primer orden de (Wang et al., 2019), la longitud de la mancha en la dirección perpendicular a la dispersión viene dada por:

$$H = \left(1 - \frac{F_T}{F_S}\right)D \quad (10)$$

donde D representa el diámetro efectivo del haz sobre el detector, que puede expresarse en función de la apertura numérica (NA, *numerical aperture*) como $D = 2fNA$, siendo f la distancia focal de los espejos. Las variables F_T y F_S corresponden a las posiciones de imagen en los planos tangencial y sagital, respectivamente. Esta expresión permite cuantificar directamente el efecto del astigmatismo residual en términos de tamaño transversal de la imagen.

El criterio de diseño adoptado consiste, por tanto, en calcular el valor de H manteniendo los parámetros geométricos dentro de un rango compacto —en particular, con L_{SC} del orden de $100mm$, correspondiente a la distancia focal de los espejos— y evaluar si el tamaño obtenido es admisible dentro del contexto del detector monopíxel. Si el ancho proyectado

resulta pequeño en comparación con el área efectiva del detector, la configuración se considera óptima y se da por válida aun sin cumplir la condición de astigmatismo nulo.

Para un telescopio con $f/\# = 10$ podemos estimar que $NA \approx \frac{1}{2f/\#} = 0.05$ y con los parámetros adoptados en este diseño preliminar ($L_{SC} = 100 \text{ mm}$, $\theta_C = 7.5^\circ$, $\alpha = -11^\circ$, $\theta_F = 9^\circ$) se obtiene, a partir de la ecuación anterior, un valor aproximado de

$$H \approx 0.4 \text{ mm} . \quad (11)$$

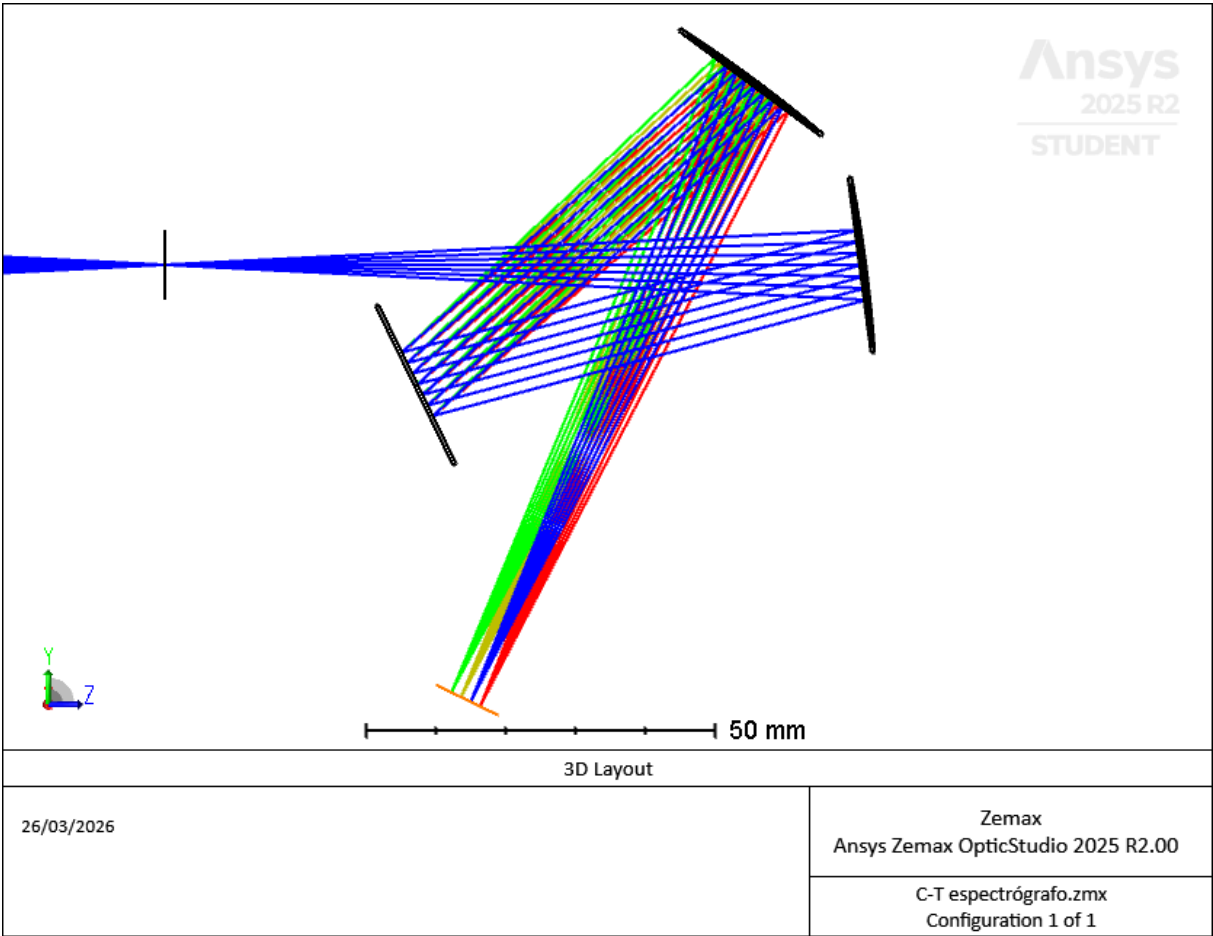
Este resultado se considera plenamente aceptable dentro de los objetivos del presente proyecto, ya que representa un compromiso muy razonable entre la compacidad geométrica del instrumento y el nivel de astigmatismo residual. La desviación sagital resultante, al producirse en la dirección perpendicular a la de dispersión espectral, tiene escasa relevancia práctica al emplearse un detector monopíxel. Por tanto, el sistema mantiene una configuración óptica simple y compacta sin comprometer la resolución espectral ni la fidelidad de la medida.

6.4. Simulación por trazado de rayos secuencial

Con el objetivo de validar el diseño óptico obtenido analíticamente, se ha realizado una simulación mediante el método de **trazado de rayos secuencial** empleando el software *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00* (versión estudiante) (Ansys Inc., 2025). Este tipo de modelado permite analizar la propagación de rayos, aberraciones, posición del foco y comportamiento fuera de eje de un sistema óptico de forma más completa que una aproximación puramente paraxial (O'Shea & Bentley, 2024). En particular, el modelo implementado permite analizar con precisión la propagación de los rayos a través del espectrógrafo, considerando los radios de curvatura, las distancias reales y los ángulos de incidencia y difracción definidos en las secciones anteriores. El uso de *Ansys Zemax OpticStudio* se justifica por la necesidad de evaluar los efectos fuera de eje, las aberraciones residuales y la posición real del foco, aspectos que no pueden determinarse con exactitud mediante el modelo paraxial. La simulación permite además verificar la compacidad del diseño y confirmar la validez de las aproximaciones empleadas en el desarrollo teórico.

En la Figura 10 se muestra el trazado tridimensional del espectrógrafo completo. Se observa la secuencia de reflexión sobre el espejo colimador, la red de difracción y el espejo de enfoque, confirmándose la geometría cruzada característica del sistema y la ausencia de obstrucciones. El detector se sitúa en el plano focal tangencial, tal como se justificó en el apartado anterior.

Figura 10. Trazado de rayos secuencial del espectrógrafo Czerny–Turner cruzado.



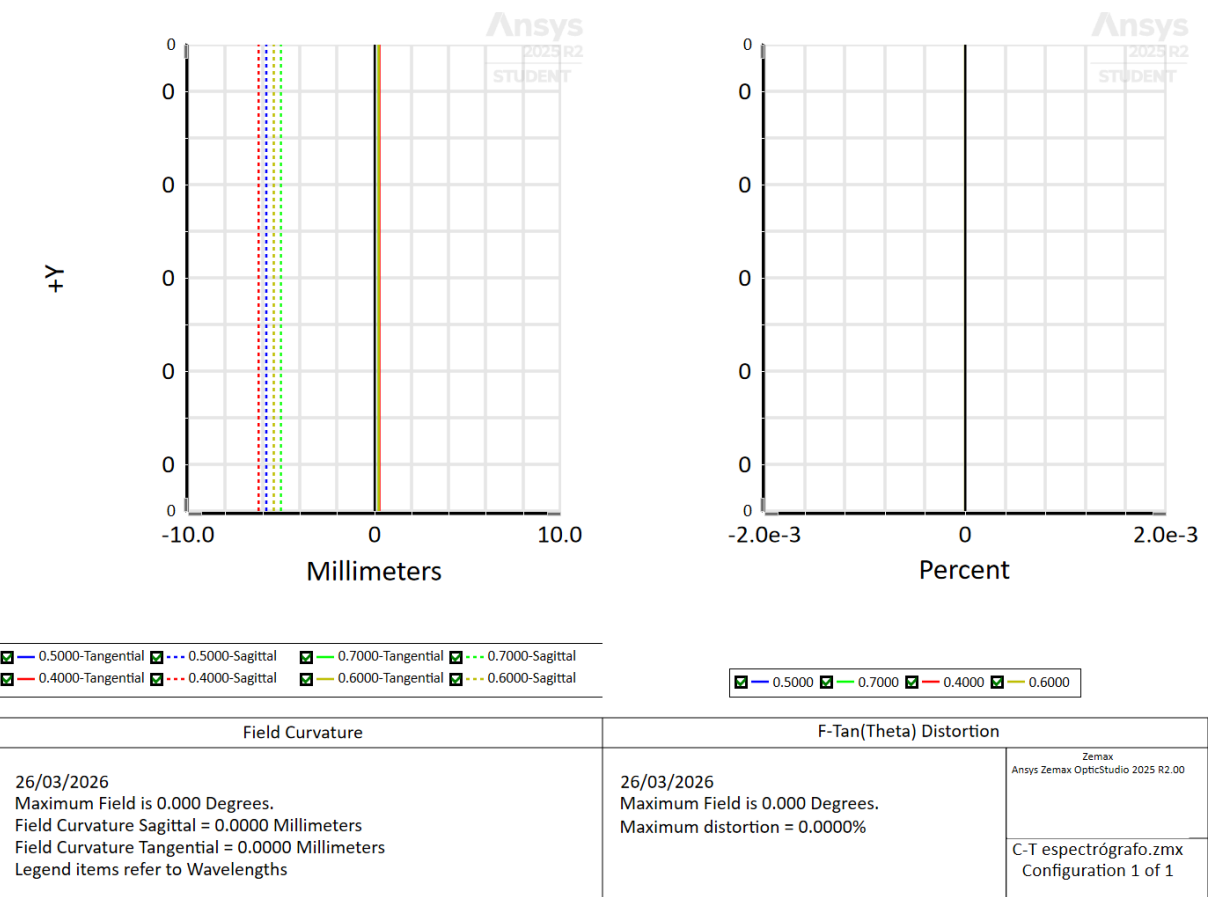
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

Curvatura de campo y distorsión

La curvatura de campo (field curvature) describe el desplazamiento de la superficie de mejor foco respecto a un plano imagen ideal al variar el campo. La distorsión (distortion), por su parte, cuantifica la desviación geométrica de la posición imagen respecto a la predicha por la óptica paraxial. Ambas magnitudes permiten evaluar la calidad geométrica del sistema fuera del eje óptico (O'Shea & Bentley, 2024; Schroeder, 2000).

La Figura 11 muestra el informe de curvatura de campo (*field curvature*) y distorsión (*distortion*). Las curvas tangencial y sagital coinciden prácticamente sobre el eje, y los valores numéricos de curvatura son del orden de milésimas de milímetro, con distorsión inferior al 0.001%. Este resultado confirma que el plano focal del sistema es prácticamente plano y que la dispersión espectral es lineal en todo el campo simulado.

Figura 11. Curvatura de campo y distorsión obtenidas en la simulación secuencial.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

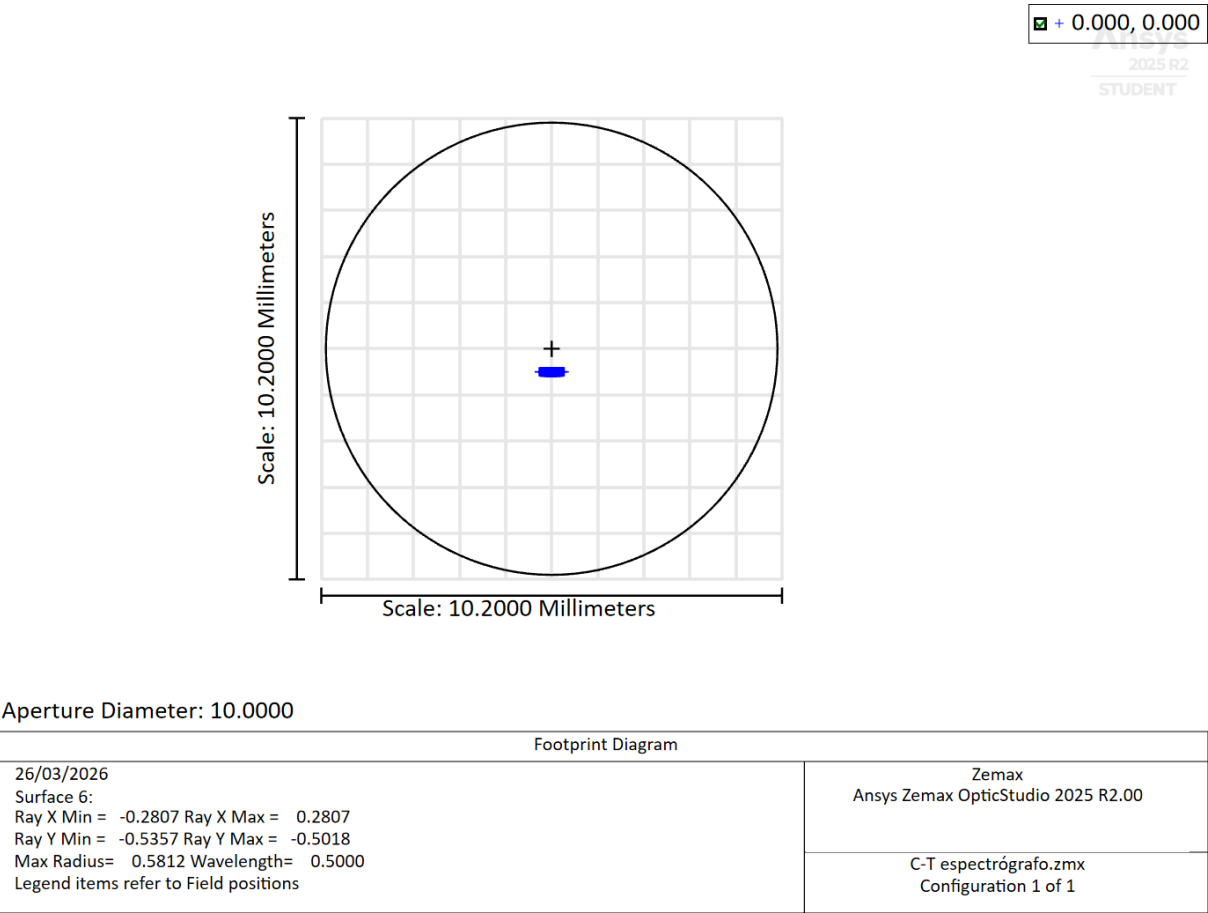
Huella del haz sobre el detector

El diagrama de huella (*footprint diagram*) representa la distribución de los rayos sobre una superficie óptica o detector. Se utiliza para verificar si el haz queda contenido dentro de la apertura útil y para detectar posibles problemas de viñeteo (O'Shea & Bentley, 2024).

En la Figura 12 se presenta el diagrama de huella (*footprint diagram*). El patrón muestra una elipse estrecha centrada en el eje óptico, con un radio máximo de aproximadamente

0.6 mm sobre una apertura de 10 mm. Esto indica que el haz está completamente contenido dentro de la apertura útil, sin viñeteo ni pérdidas significativas.

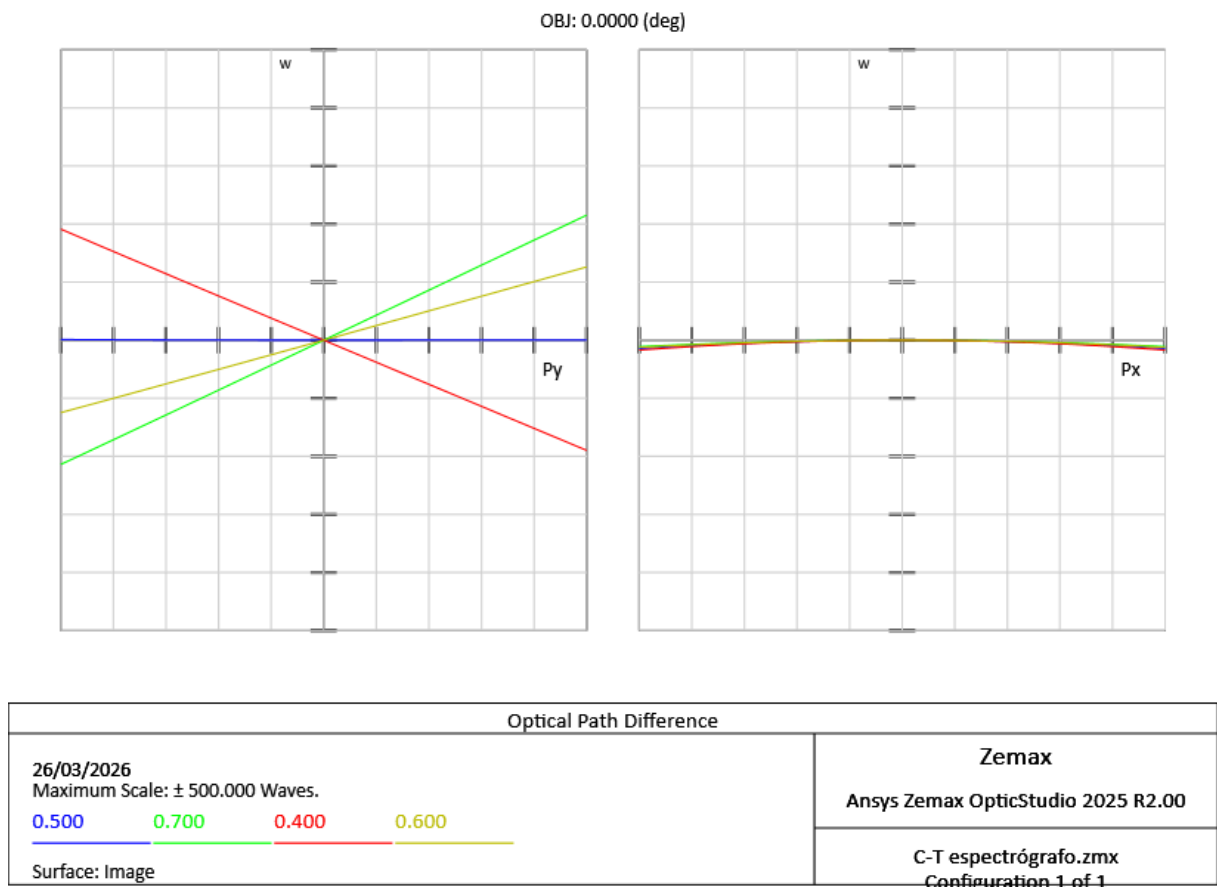
Figura 12. Huella del haz sobre el plano detector.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

Aberraciones y frente de onda

La Figura 13 muestra el diagrama de diferencia de camino óptico (*Optical Path Difference, OPD*). Las curvas correspondientes a las direcciones tangencial (Px) y sagital (Py) se mantienen prácticamente superpuestas, lo que confirma que el astigmatismo residual es reducido. El frente de onda se mantiene dentro de unos pocos cientos de longitudes de onda en el rango visible.

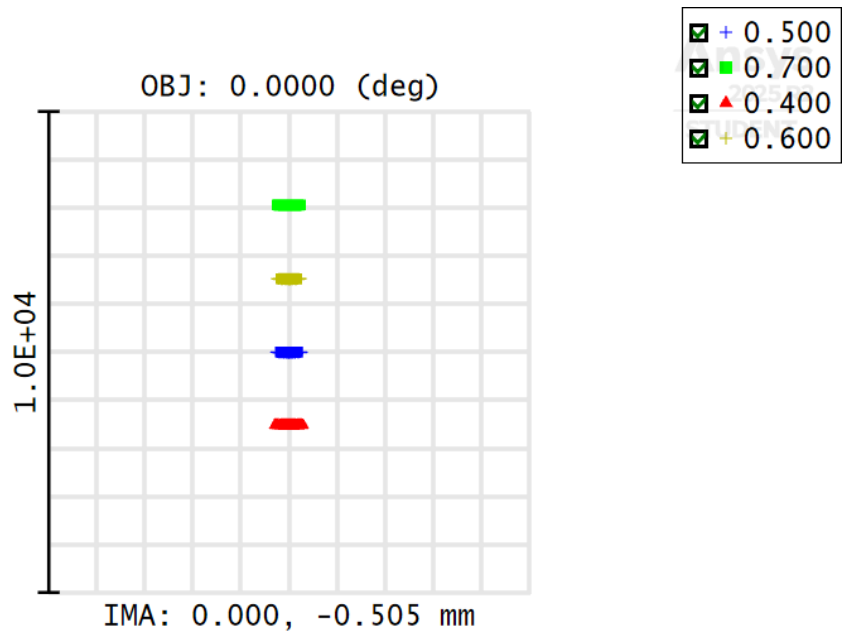
Figura 13. *Diferencia de camino óptico (OPD Fan) en los planos tangencial y sagital.*

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

Diagrama de manchas

El *Spot Diagram*, mostrado en la Figura 14, representa el patrón de enfoque en el plano del detector para varias longitudes de onda entre 0.4 y $0.7\mu\text{m}$. Los diferentes colores corresponden a los haces difractados en cada longitud de onda, que se alinean en la dirección de dispersión. La extensión transversal del patrón, de aproximadamente 0.4 mm , coincide con el valor calculado analíticamente para H , validando el modelo teórico. La disposición regular de las manchas confirma la linealidad de la dispersión y la ausencia de coma significativa.

Figura 14. *Diagrama de manchas (Spot Diagram) en el plano focal para distintas longitudes de onda.*



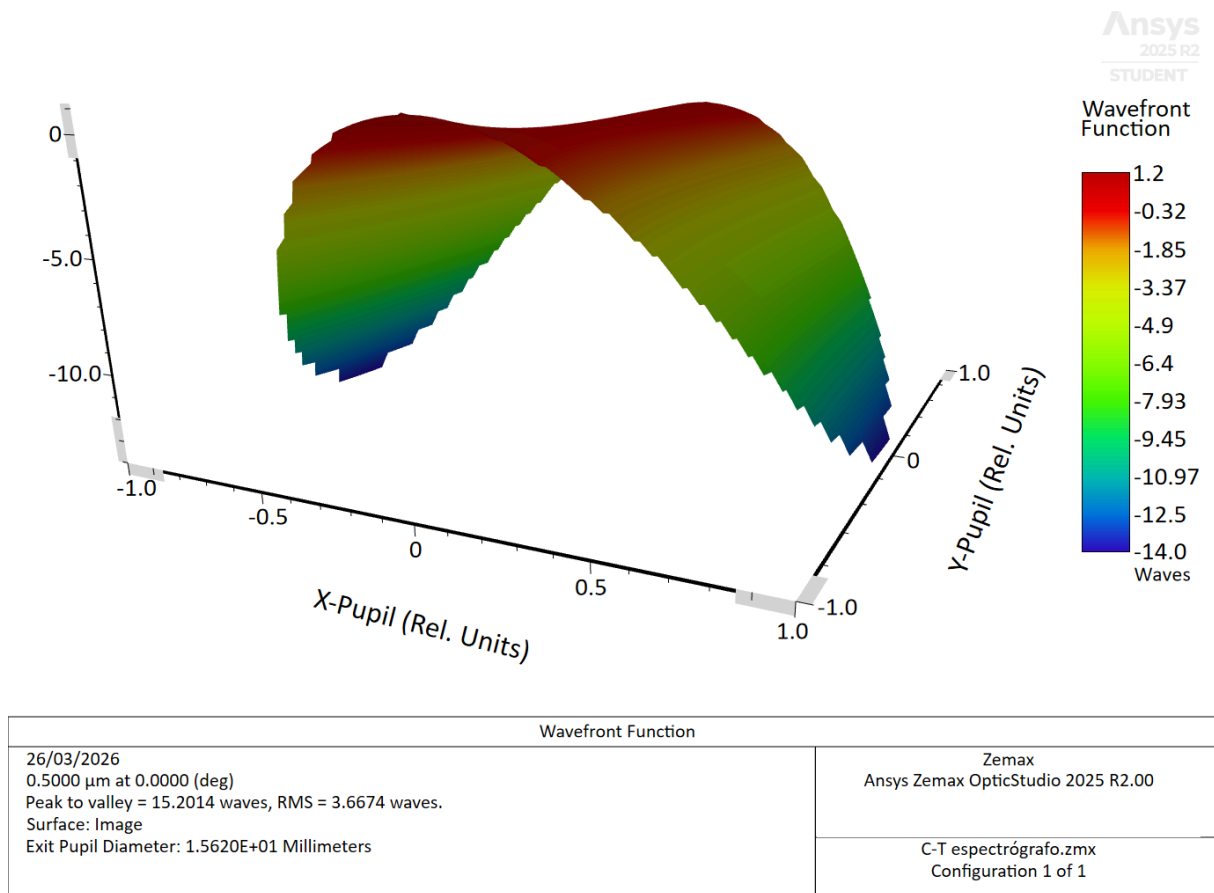
Surface: IMA

Spot Diagram	
26/03/2026	Zemax
Units are μm . Legend items refer to Wavelengths	Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00
Field : 1	C-T espectrógrafo.zmx Configuration 1 of 1
RMS radius : 1874.48	
GEO radius : 3070.74	
Scale bar : 1.0E+04	Reference : Chief Ray

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

Frente de onda tridimensional

La Figura 15 muestra el mapa tridimensional del frente de onda (*Wavefront Map*) en la pupila de salida. El gradiente suave observado indica que las aberraciones residuales son principalmente de tipo esférico y astigmático, sin discontinuidades locales. Este resultado corrobora los datos del *OPD Fan* y evidencia que el instrumento mantiene un frente de onda continuo y controlado dentro del rango visible.

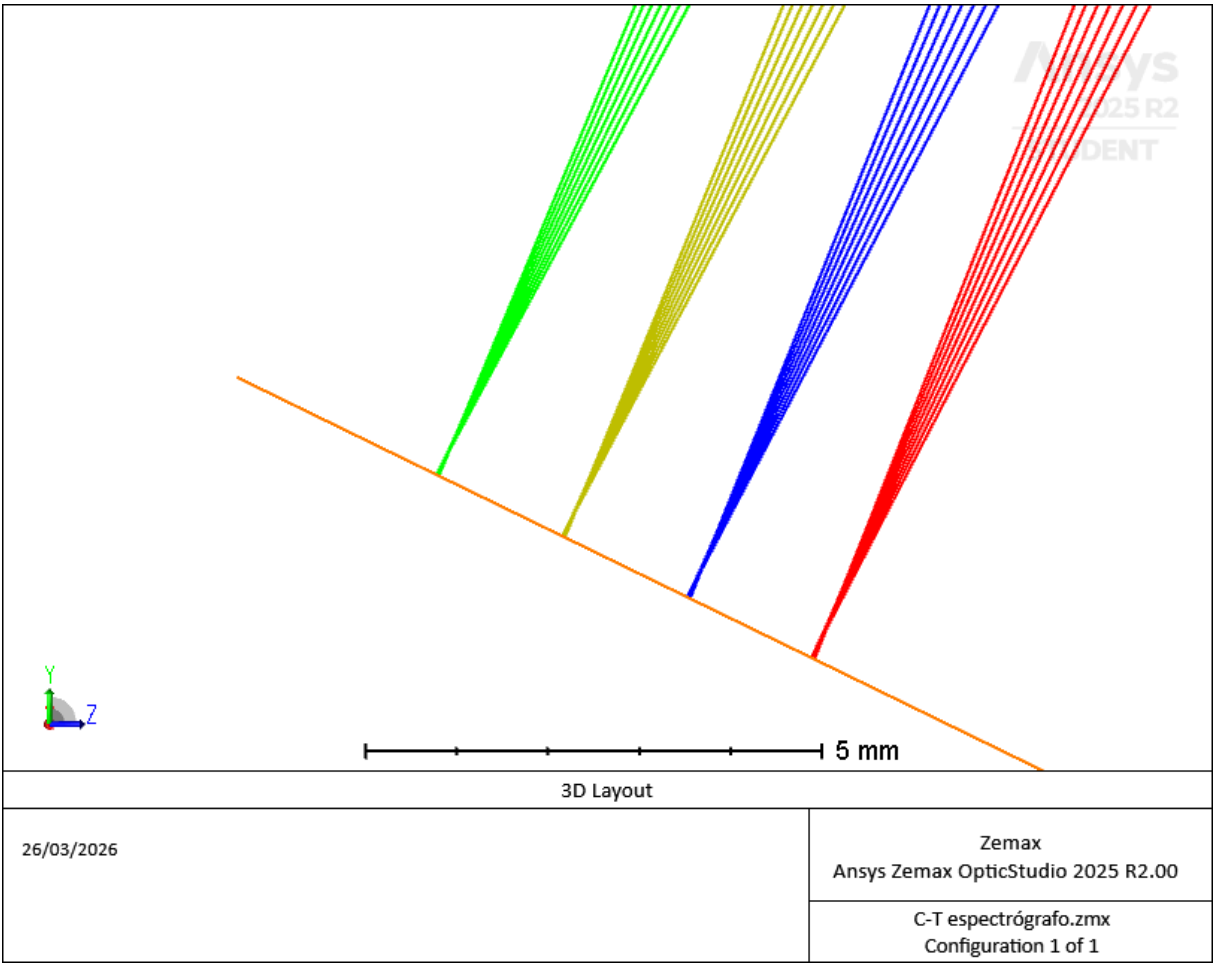
Figura 15. Mapa tridimensional del frente de onda en la pupila de salida.

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansyz Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

Rango espectral abarcado

Como se detallará en secciones posteriores en las que se explique la implementación de un prototipo, el ancho de la zona sensible del DMD es de aproximadamente 5.2 mm. En la Figura 16 se muestra el plano de la imagen donde debe situarse el DMD y el resultado de la incidencia de varios haces con diferentes longitudes de onda, desde 400 nm hasta 700 nm. Observando la escala de la figura, podemos comprobar que el diseño abarca una parte importante del rango visible que se determinará empíricamente en apartados sucesivos.

Figura 16. Layout ampliado en el plano espectral.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

Los resultados de la simulación confirman que la configuración propuesta del espectrógrafo *Czerny–Turner* cruzado cumple los objetivos de compacidad y calidad óptica. El astigmatismo residual calculado ($H \approx 0.4\text{ mm}$) se manifiesta como una ligera elongación sagital sin relevancia práctica para un detector monopíxel, mientras que la curvatura de campo y la distorsión son despreciables. En conjunto, las gráficas obtenidas validan el diseño analítico y demuestran que el sistema presenta un equilibrio adecuado entre simplicidad geométrica, tamaño reducido y rendimiento espectral.

6.5. Integración del DMD y el fotomultiplicador

El funcionamiento del DMD en el diseño propuesto del espectrógrafo Czerny-Turner requiere reemplazar el plano del detector lineal por la superficie activa del propio DMD.

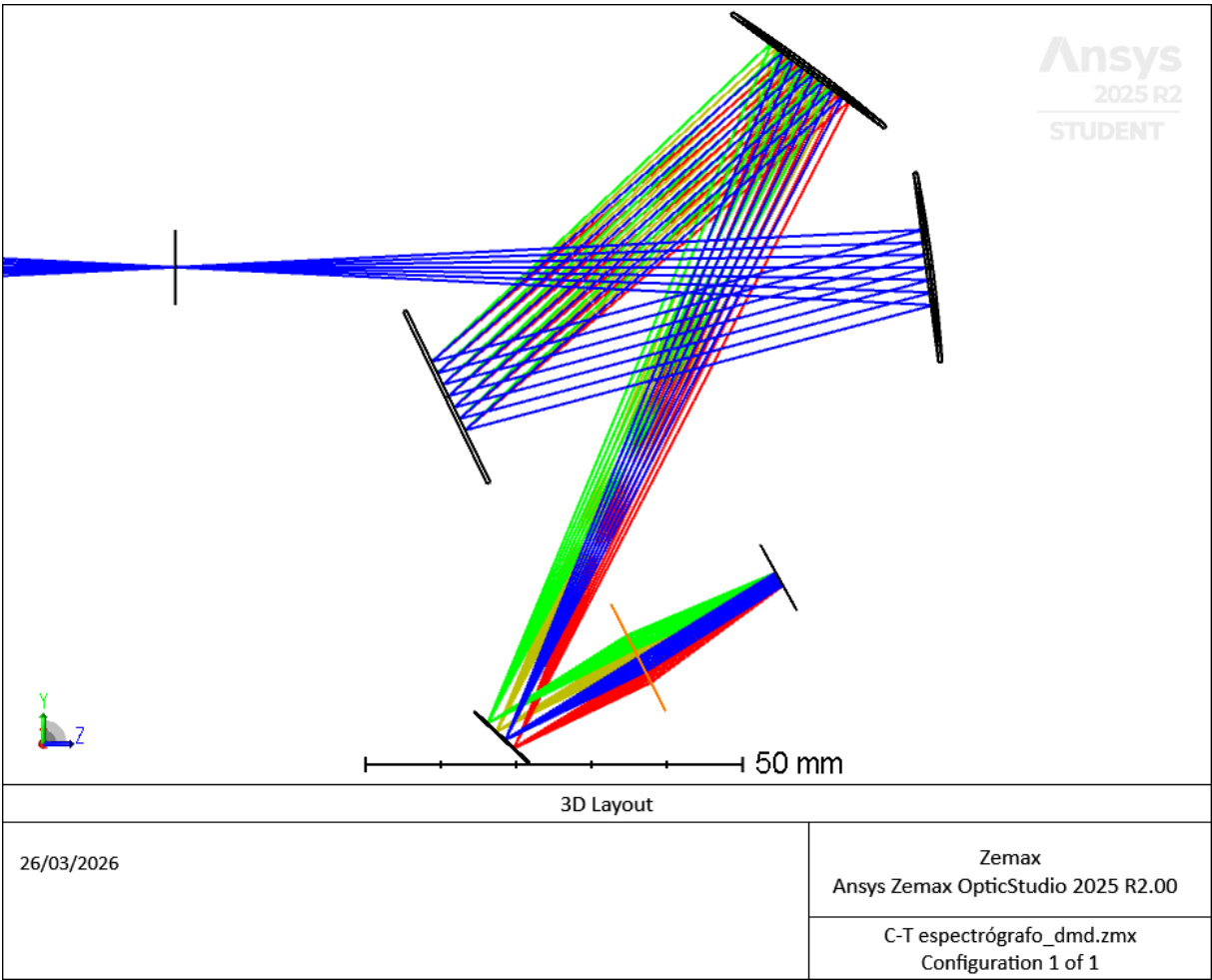
Dado que cada micro espejo bascula individualmente, el modelo exacto del dispositivo no puede implementarse en la versión empleada de *Zemax OpticStudio 2025 R2.00*. Para aproximar su comportamiento, se ha sustituido la superficie del detector por un plano reflectante inclinado un ángulo de 17° , correspondiente al estado *ON* de los micro espejos. Esta aproximación permite estudiar la geometría del haz emergente y evaluar las necesidades de acoplo hacia el fotomultiplicador.

En la Figura 17 se muestra el trazado obtenido para esta configuración. El haz procedente del espectrógrafo incide en el plano que representa al DMD y se refleja con la inclinación correspondiente. Dado que el PMT no se encuentra en el plano focal original del Czerny-Turner, es necesario añadir una lente auxiliar cuya función es concentrar la luz reflejada hacia la ventana del fotomultiplicador. Esta lente no forma parte del diseño Czerny-Turner, sino que actúa como elemento de acoplo entre el DMD, que selecciona espacialmente la señal, y el detector final.

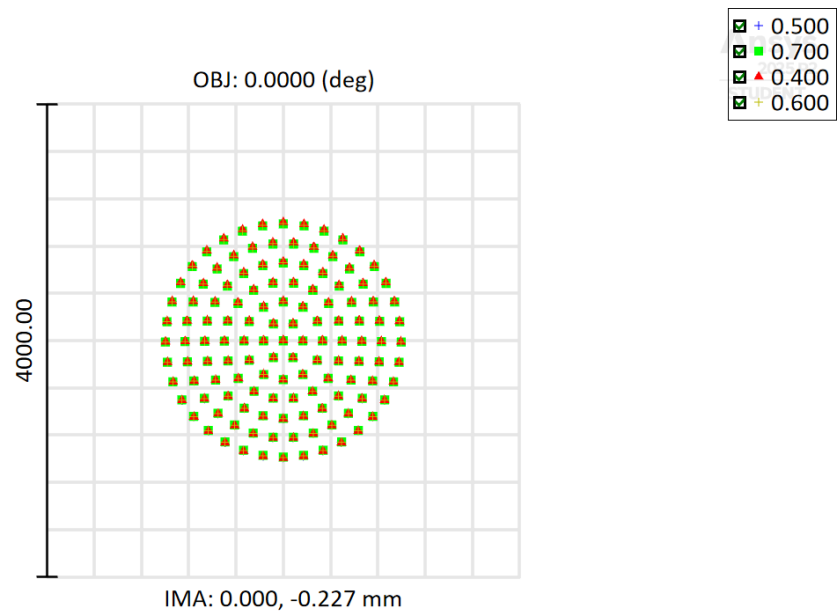
Para esta etapa de diseño se ha empleado una lente paraxial biconvexa con distancia focal de 20 mm, colocada a 20 mm del plano que representa al DMD. El fotomultiplicador se sitúa a 21.4 mm del último vértice de la lente. La Figura 18 muestra el diagrama de mancha obtenido en el plano del PMT, donde se observa que el diámetro de la imagen es aproximadamente de 2 mm. Dado que la ventana útil del fotomultiplicador es considerablemente mayor, esta aproximación resulta suficiente para garantizar un acoplo eficiente de la señal óptica.

Aunque el modelo no incorpora explícitamente la estructura discreta de micro espejos del DMD, la simulación permite verificar que la lente seleccionada logra concentrar el haz principal y órdenes de difracción generados por la periodicidad del dispositivo. Este comportamiento es consistente con el análisis realizado en Sección 6.6 donde se describe su funcionamiento equivalente al de una red de difracción *blazed*. De este modo, el diseño resultante asegura la captura estable de la energía óptica en el fotomultiplicador, incluso en presencia de variaciones angulares asociadas al patrón de modulación aplicado. En el siguiente apartado se realizan cálculos estimativos del efecto de la dispersión.

Figura 17. Trazado de rayos secuencial del espectrógrafo incluyendo el DMD.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

Figura 18. Diagrama de mancha obtenido en el plano del fotomultiplicador.

Surface: IMA

Spot Diagram	
26/03/2026 Units are μm . Legend items refer to Wavelengths Field : 1 RMS radius : 756.927 GEO radius : 1001.45 Scale bar : 4000.00 Reference : Chief Ray	Zemax Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00
	C-T espectrógrafo_dmd.zmx Configuration 1 of 1

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo óptico implementado en *Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2.00*.

6.6. Estimación simple del diámetro de la lente para recoger varios órdenes de difracción

Como primera aproximación, el DMD puede modelarse como una red de difracción formada por los espejos individuales. Sin embargo, la anchura efectiva que contribuye a la difracción no es el *pitch* del dispositivo, sino la semidiagonal del *micro espejo*, ya que el espejo bascula alrededor de su diagonal, y es dicha dimensión la que determina el patrón angular observado. Denotando esta semidiagonal por a , el ángulo entre el orden central ($m = 0$) y los órdenes ± 1 puede estimarse mediante:

$$\Delta\theta \approx \arcsin\left(\frac{\lambda}{a}\right) \quad (12)$$

donde λ es la longitud de onda incidente. Para un *micro espejo* típico con semidiagonal efectiva $a \approx 3.8\mu\text{m}$ y una longitud de onda representativa en el visible $\lambda_0 = 550\text{ nm} = 0.55\mu\text{m}$, se obtiene

$$\Delta\theta \approx \arcsin\left(\frac{0.55}{3.8}\right) \approx 8.3^\circ. \quad (13)$$

Si la lente de acoplo se sitúa a una distancia $L \approx 20\text{ mm}$ del DMD, su cono de aceptación viene dado por el semiancho

$$\theta_{max} \approx \arctan\left(\frac{\frac{D}{2}}{L}\right), \quad (14)$$

donde D es el diámetro útil de la lente. Para que la lente recoja simultáneamente el orden central y los órdenes ± 1 , es necesario que

$$\theta_{max} > \Delta\theta. \quad (15)$$

Despejando el diámetro mínimo requerido:

$$D_{min} \approx 2L \tan(\Delta\theta). \quad (16)$$

Sustituyendo $L = 20\text{ mm}$ y $\Delta\theta \approx 8.3^\circ$:

$$D_{min} \approx 2 \times 20\text{ mm} \times \tan(8.3^\circ) \approx 5.8\text{ mm}. \quad (17)$$

Por tanto, una lente situada a unos 20 mm del DMD necesita un diámetro útil de, al menos, 6 mm para poder recoger geométricamente el orden central y los órdenes ± 1 a una longitud de onda de 550 nm. En la práctica, emplear lentes comerciales a partir de diámetros de 10 mm garantiza que el fotómetro recoja no solo el orden $m = 0$, sino también la mayor parte de la energía dispersada por efecto de difracción del DMD.

7. Implementación de un prototipo

7.1. Introducción

Como parte del alcance del presente TFG se ha implementado un prototipo del instrumento de acuerdo con el diseño óptico y cálculos previamente detallados. Para el prototipo se ha considerado partir de la estructura básica de un espectrógrafo Czerny-Turner diseñado para su montaje con impresora 3D (Buil, 2019) y se han adaptado las partes necesarias para integrar el DMD en el plano espectral y el fotomultiplicador, así como la electrónica que gobierna el DMD. La Figura 19 muestra en planta la ubicación funcional de todos los elementos del prototipo, y en la Figura 20 se muestra el diseño 3D adaptado en el que se han resaltado las partes estructurales más relevantes del prototipo: una abertura en el plano espectral para colocar el DMD y un tubo en el que se aloja el fotomultiplicador.

Figura 19. Esquema general de la ubicación de los elementos ópticos en el alojamiento mecánico.

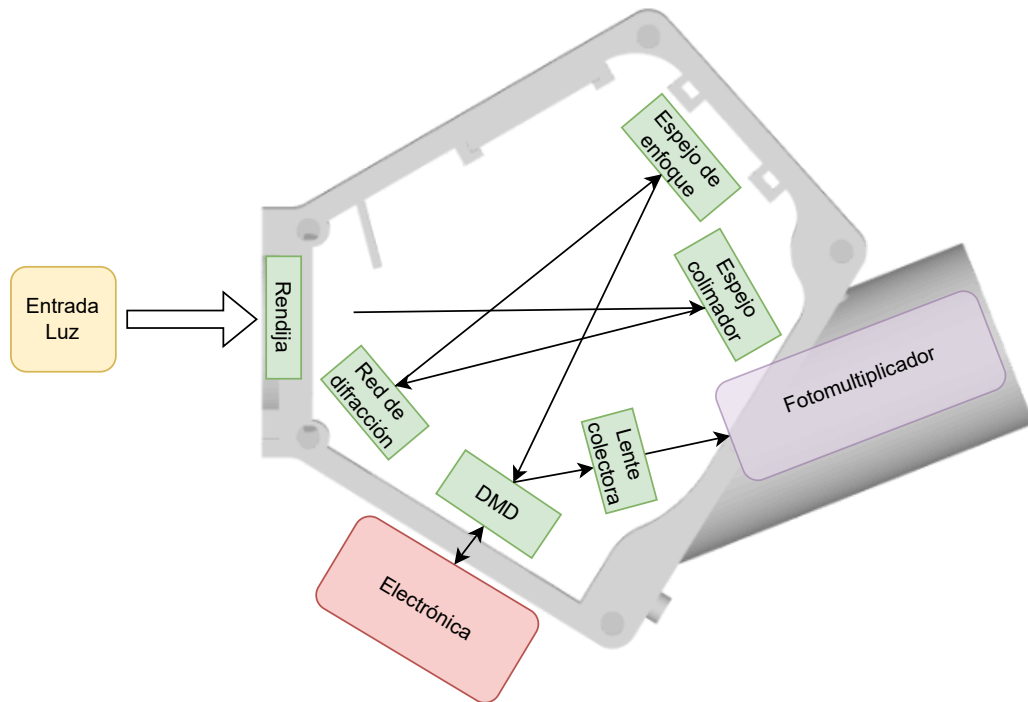
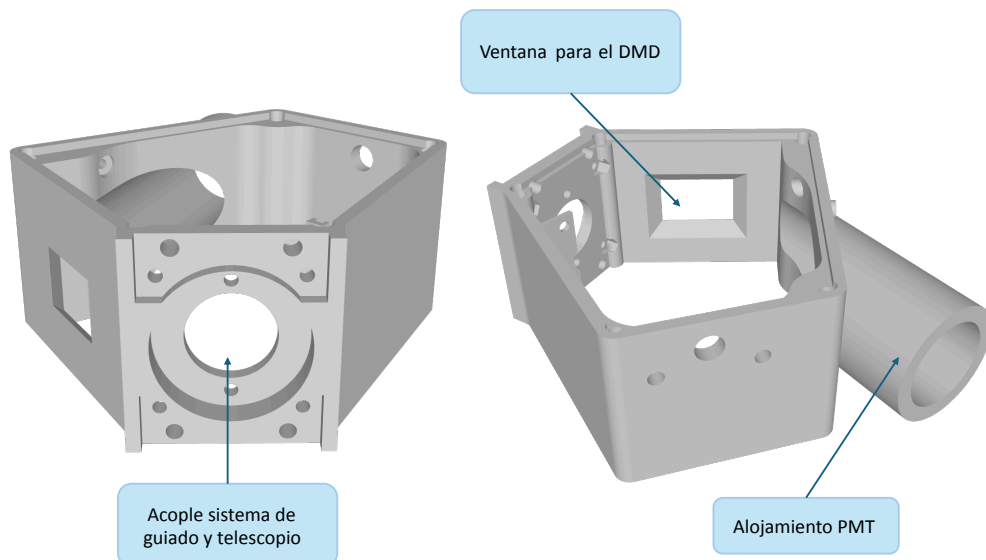


Figura 20. Vistas 3D del diseño mecánico del dispositivo.



7.2. Elementos ópticos

Para el prototipo se han utilizado elementos ópticos comerciales. En concreto:

- **Espejo colimador y de enfoque:** espejo cóncavo de focal 100mm de una pulgada de diámetro, fabricante *Thorlabs*, referencia CM254-100-G01. La Tabla 2 recoge las especificaciones técnicas de los espejos.
- **Red de difracción:** reflectiva de 150 líneas/mm, longitud de onda de *blaze* 500nm, tamaño 25x25mm, fabricante *Edmund Optics*, referencia 64-402. La Tabla 3 recoge las especificaciones técnicas.

La rendija que se ha usado para el prototipo es de 35 μm fabricada sobre una superficie reflectiva.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los espejos.

Parámetro	Valor
Diámetro	1"
Rango espectral recubrimiento metálico	450 nm – 2 μm ; R_avg > 90% 2 μm – 20 μm ; R_avg > 95%
Apertura libre	>90% del diámetro
Calidad superficial	40–20 Scratch-Dig
Tolerancia de diámetro	+0.0 / –0.2 mm
Sustrato	N-BK7A
Superficie posterior	Rectificada fina y grabada con número de pieza (no pulida)

Fuente: Elaboración propia a partir de especificaciones del fabricante.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la red de difracción reflectiva utilizada.

Parámetro	Valor
Tipo	Red de difracción reflectiva
Construcción	Red rayada (<i>ruled grating</i>)
Dimensiones	25.0 × 25.0 mm ± 0.5 mm
Apertura libre	90%
Longitud	25.00 mm
Anchura	25.00 mm
Espesor	9.50 ± 0.5 mm
Dirección de las ranuras	Paralelas a la dimensión corta
Alineación de las ranuras al borde	±0.5°

Parámetro	Valor
Densidad de líneas	150 líneas/mm
Longitud de onda de <i>blaze</i>	500 nm
Ángulo de <i>blaze</i>	2.13°
Recubrimiento	Aluminio desnudo
Sustrato	Vidrio flotado (<i>float glass</i>)
Eficiencia máxima absoluta (típica)	69%
Eficiencia media máxima (típica)	>65%
RoHS 2015	Conforme
REACH 247	Conforme

Fuente: Elaboración propia a partir de especificaciones del fabricante.

7.3. DMD

Para el prototipo se ha seleccionado el DMD DLP230NP que va incluido en el kit de evaluación DLPDLCR230NPEVM de *Texas Instruments*. La Figura 21 muestra el esquema funcional del Kit. La principal razón de seleccionar este kit es que incluye una interfaz para gobernar el DMD con una *Raspberry Pi*. Los elementos principales con los que se suministra el kit son:

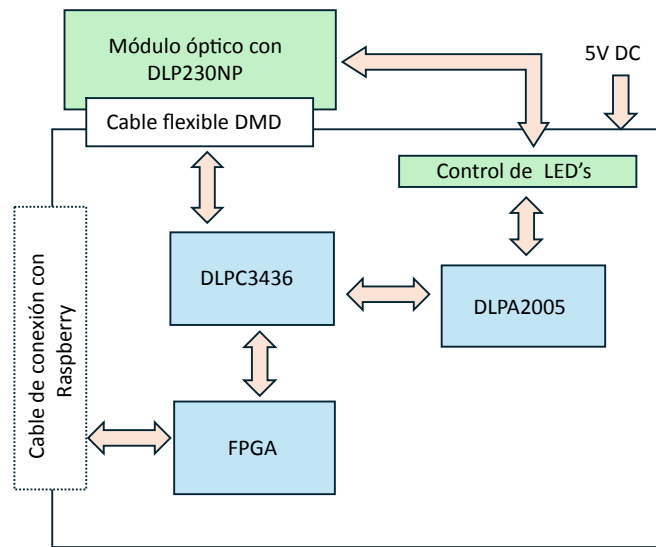
- Conjunto óptico de proyección que incluye un DMD DLP230NP.
- Placa controladora del DMD y de los LED del proyector. La placa contiene un conector y la correspondiente cinta plana para comunicar con una placa *Raspberry Pi* (no suministrada en el Kit).

Los elementos a destacar en la placa controladora son:

- Controlador de DMD DLPC3436
- Controlador de LED DLPA2005
- FPGA PHK1924 para el control del sistema.

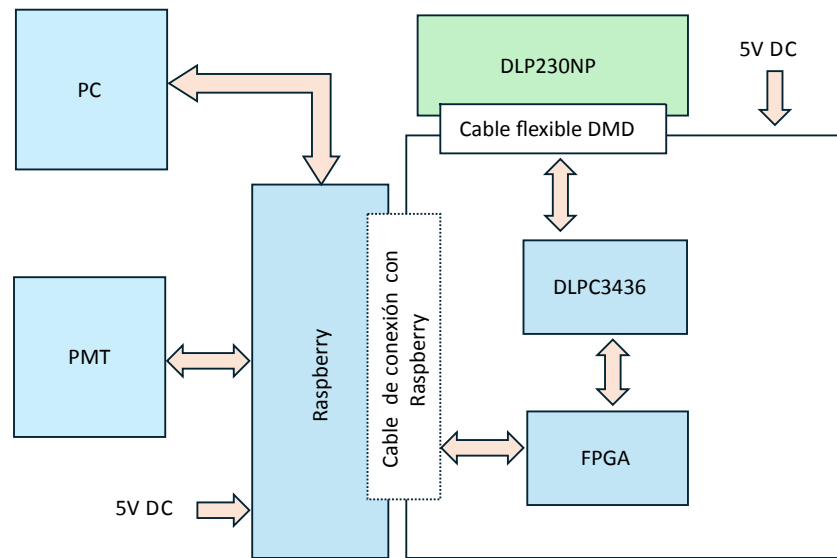
Aunque el Kit está orientado a su uso como proyector, aplicación lejos de los objetivos del presente trabajo, demuestra ser muy útil ya que incluye un DMD, en concreto el DLP230NP, y todos los elementos necesarios para su control, incluyendo la comunicación con una *Raspberry Pi* externa al Kit en la que se implementará el software de control del instrumento.

Figura 21. Esquema del kit de evaluación utilizado para el prototipo.



La adaptación del Kit al prototipo se representa en la Figura 22, en la que se han introducido las siguientes modificaciones y ampliaciones:

- Se conecta una placa *Raspberry Pi* utilizando la cinta plana incluida en el Kit.
- Se debe desarmar el Módulo Óptico y extraer con sumo cuidado el DMD y la cinta flexible.
- A la placa *Raspberry Pi* se conecta el PMT a través de USB y un PC a través de Ethernet. Aunque el funcionamiento del instrumento es autónomo y controlado íntegramente por la Raspberry, el PC es un elemento útil para la depuración y supervisión del funcionamiento.
- En el esquema funcional se ha dejado de representar los elementos de control de LED ya que no tienen ninguna función en el instrumento.
- Tanto la *Raspberry Pi* como el controlador del DMD se alimentan a 5V DC.

Figura 22. Esquema del kit de evaluación integrado en el dispositivo.

La Tabla 4 muestra las principales características del DMD. Su tamaño de 5.2mm de ancho no es el óptimo para la aplicación de espectrógrafo, pero es válido para el objetivo del presente TFG que pretende realizar un prototipo demostrativo. De hecho, como se ha comprobado en anteriores apartados, con el ancho de la superficie activa del DMD y el poder dispersivo de la red de difracción de 150 líneas por mm se consigue en un rango espectral suficiente a nivel demostrativo.

Aunque el dispositivo se direcciona como una matriz de 1920×1080 píxeles, la resolución física del DMD corresponde a una matriz de 960×540 *micro espejos*. Cada *micro espejo* se controla mediante un bloque lógico de 2×2 píxeles, mecanismo introducido por la controladora para compatibilidad con formatos de vídeo y que no implica un aumento de la resolución óptica real.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del dispositivo DMD.

Parámetro	Valor
Tipo de dispositivo	Matriz de micro espejos digital (DMD)
Tamaño del chip	$5.2 \times 2.9\text{ mm}$
Resolución a nivel lógico	1920×1080 píxeles
Resolución a nivel físico	960×540 micro espejos
Paso del micro espejo	$5.4\mu\text{m}$

Parámetro	Valor
Ángulo de basculación del micro espejo	$\pm 17^\circ$ (respecto a una superficie plana)
Configuración de iluminación	Iluminación lateral para máxima eficiencia y diseño óptico compacto
Superficie del micro espejo	Aluminio, independiente de la polarización
Bus de datos de entrada	subLVDS de 8 bits
Controlador dedicado	DLPC3436

Fuente: Elaboración propia a partir de especificaciones del fabricante.

7.4. Verificación experimental del funcionamiento del DMD en banco de pruebas

Con el fin de comprobar experimentalmente el funcionamiento del DMD se ha montado un banco de pruebas para verificar experimentalmente:

- El funcionamiento de la geometría de los *microespejos*.
- El comportamiento del DMD como una red de difracción efectiva para un haz láser casi monocromático, midiendo el ángulo de desviación del primer orden de difracción y comparándolo con el valor predicho teóricamente.

El experimento se ha realizado utilizando un láser rojo de longitud de onda

$$\lambda \approx 650nm \approx 0.65\mu m, \quad (18)$$

expandido mediante un expansor de haz ($\times 5$) y colimado con una lente adecuada.

El haz colimado incide casi perpendicularmente sobre el plano del DMD, cuyos parámetros relevantes a efectos de las verificaciones en el banco de prueba son:

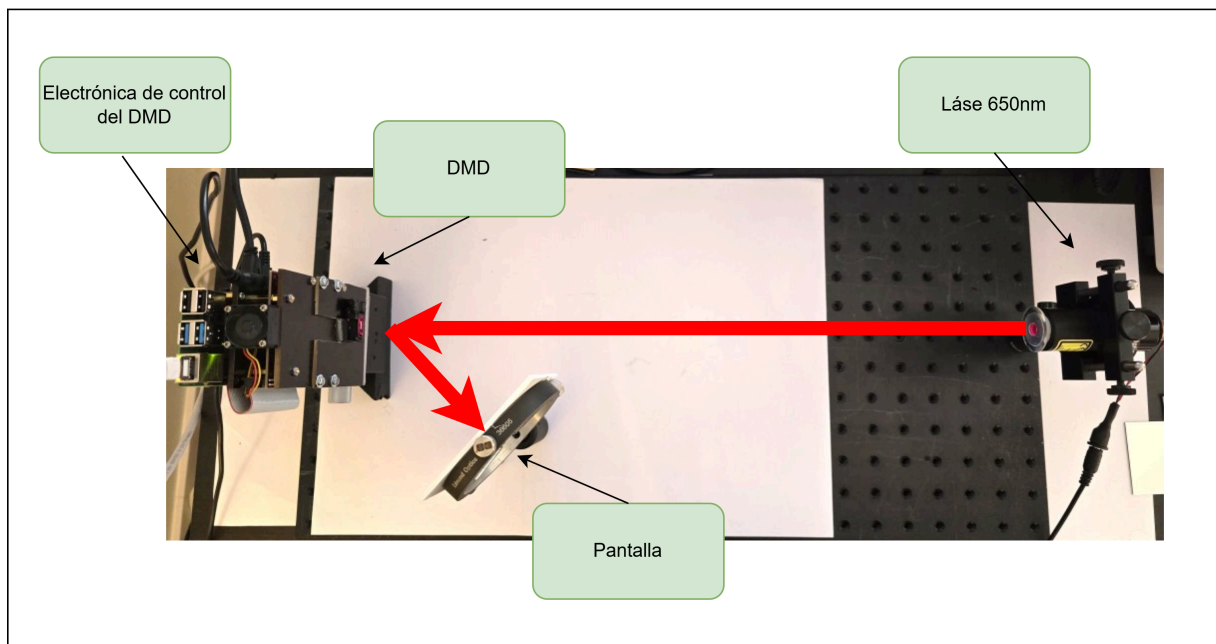
- Paso de celda (*pitch*): $p \approx 5.4\mu m$,
- Ángulo de basculamiento: $\pm 17^\circ$ alrededor de la diagonal del píxel.

El sensor se configuró en modo casi telecéntrico (eje óptico aproximadamente perpendicular al haz incidente). Para la medida del ángulo de difracción se utilizó una pantalla situada a una distancia fija $L \approx 120mm$ del DMD, sobre la que se registró la posición del máximo de intensidad del orden $m = 1$. Asimismo, se orientó la pantalla de forma que coincidiera con

la dirección del haz reflejado en estado *ON*, comprobando experimentalmente que dicho ángulo es aproximadamente 34° respecto a la normal al DMD.

La Figura 23 muestra la disposición del láser, DMD y pantalla en el banco de pruebas para el experimento.

Figura 23. Configuración del banco montado para el experimento.



Para órdenes bajos y en incidencia cercana a la normal, el DMD puede modelarse como una red de difracción unidimensional con una constante de red efectiva dada por la semidiagonal del píxel,

$$d_{\text{eff}} \approx \frac{\text{pitch}}{\sqrt{2}} \approx 3.8\mu\text{m}, \quad (19)$$

ya que los micro espejos basculan alrededor de su diagonal y la periodicidad relevante a lo largo de la dirección de basculamiento es precisamente dicha semidiagonal.

La relación de difracción para el orden m es, en aproximación escalar,

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d_{\text{eff}}} \quad (20)$$

donde θ es el ángulo de desviación respecto al eje del haz incidente.

En el montaje experimental se midió la separación entre el máximo de intensidad del orden central ($m = 0$) y el del primer orden ($m = 1$) sobre la pantalla. La distancia transversal medida fue

$$\Delta x \approx 18 \text{ mm} \quad (21)$$

de modo que el ángulo experimental para el primer orden viene dado por la relación geométrica

$$\sin \theta = \frac{\Delta x}{L} \approx \frac{18 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} \approx 0.15 \quad (22)$$

lo que corresponde a

$$\theta_{\text{med}} \approx \arcsin(0.15) \approx 8.6^\circ \quad (23)$$

Por otro lado, el ángulo teórico para el orden $m = 1$ se obtiene como

$$\sin \theta_{\text{teo}} \approx \frac{1 \times 0.65 \mu\text{m}}{3.8 \mu\text{m}} \approx 0.17 \quad (24)$$

de donde

$$\theta_{\text{teo}} \approx \arcsin(0.17) \approx 9.8^\circ \quad (25)$$

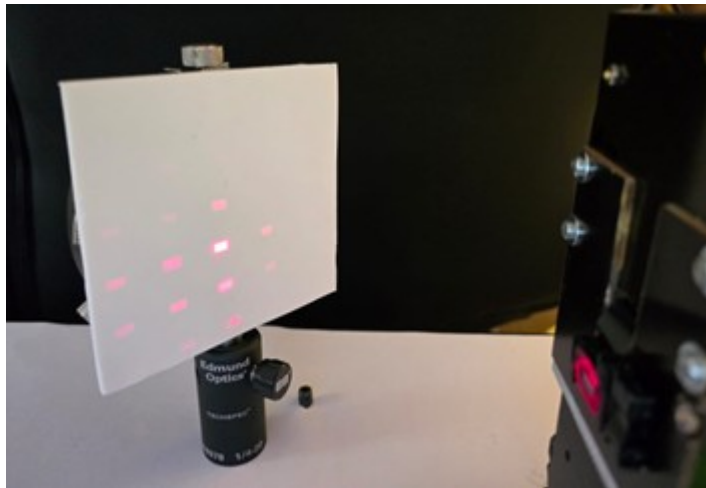
La diferencia entre el ángulo medido y el predicho es, por tanto,

$$\Delta \theta = \theta_{\text{teo}} - \theta_{\text{med}} \approx 1.2^\circ \quad (26)$$

valor perfectamente compatible con las incertidumbres experimentales asociadas a la distancia efectiva DMD–pantalla, la medida de Δx , el tamaño finito de la mancha y las posibles pequeñas desalineaciones del haz.

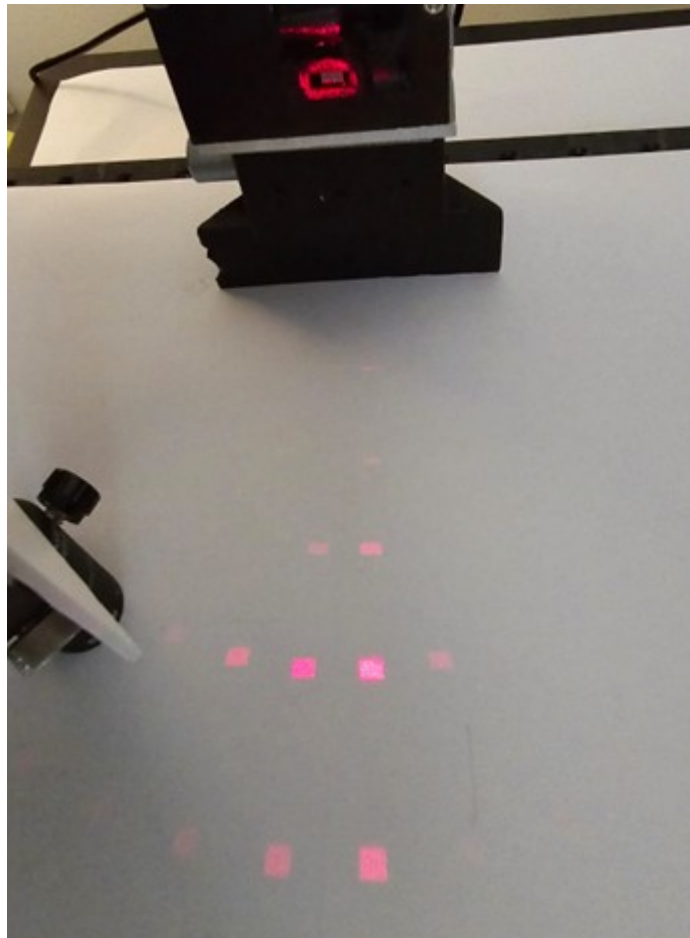
La Figura 24 muestra la imagen del DMD proyectada en la pantalla cuando todos los micro espejos se activan a ON. Se aprecia el orden cero en el centro y los siguientes órdenes de difracción con menor intensidad.

Figura 24. *Imagen en la pantalla con los micro espejos activados a ON.*



La Figura 25 muestra la imagen del DMD proyectada fuera de la pantalla cuando todos los micro espejos se activan a OFF.

Figura 25. *Imagen proyectada con los micro espejos a OFF.*



Además de la difracción en primer orden, el montaje se empleó para comprobar la geometría de funcionamiento del DMD en estado *ON*. Dado que cada *micro espejo* bascula un ángulo de

$$\theta_{\text{tilt}} = 17^\circ \quad (27)$$

alrededor de su diagonal, y considerando un haz incidente aproximadamente normal al plano medio del DMD, el ángulo de reflexión para el estado *ON* viene dado por la ley de la reflexión aplicada a un espejo inclinado, resultando en un desvío doble:

$$\theta_{\text{ON,teo}} \approx 2\theta_{\text{tilt}} = 2 \times 17^\circ = 34^\circ \quad (28)$$

En el experimento, la pantalla se orientó hasta maximizar la intensidad del haz reflejado cuando los micro espejos se encontraban en estado *ON*. El ángulo medido de la pantalla respecto a la normal al DMD fue

$$\theta_{\text{ON,med}} \approx 34^\circ, \quad (29)$$

en excelente acuerdo con el valor teórico $\theta_{\text{ON,teo}}$. Esto confirma tanto el correcto funcionamiento del DMD como la coherencia del modelo geométrico utilizado para describir la dirección del haz reflejado en estado *ON*.

En conjunto, estas medidas validan experimentalmente que:

- El DMD se comporta, a efectos prácticos, como una red de difracción cuya constante efectiva está determinada por la semidiagonal del píxel.
- El ángulo de desviación del primer orden de difracción para $\lambda \approx 650 \text{ nm}$ coincide con las predicciones dentro de $\approx 1^\circ$.
- La deflexión de 34° en estado *ON* es consistente con un basculamiento de $\pm 17^\circ$ de los micro espejos, tal como especifica el fabricante.

7.5. Fotomultiplicador

Como fotomultiplicador para el prototipo se ha seleccionado el módulo PMT P25USB-01 del fabricante *Sens-Tech*. La Tabla 5 muestra las especificaciones técnicas del detector.

El P25USB-01 es un módulo fotodetector *plug-and-play* diseñado para recuento de fotones. Integra un tubo fotomultiplicador con ventana final de 25 mm y fotocátodo S20 sensible al rojo, seleccionado por su bajísimo nivel de recuento oscuro. El conjunto incluye además una fuente de alta tensión positiva, un amplificador–discriminador de alta velocidad, un contador y un microcontrolador.

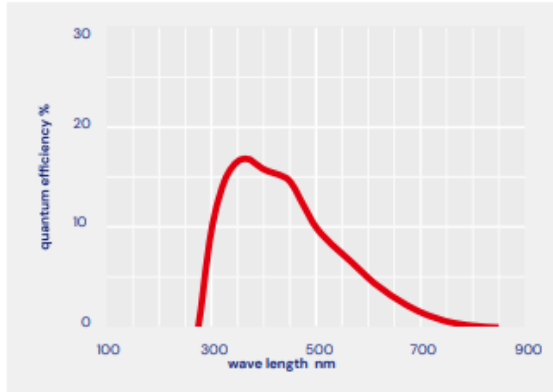
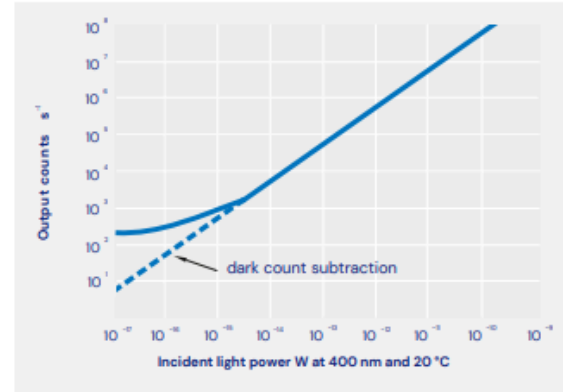
Todos los componentes están encapsulados en una carcasa cilíndrica de mu-metal, que garantiza una elevada inmunidad frente a campos magnéticos externos. Las conexiones de baja tensión y la salida de señal se realizan mediante cables volantes, mientras que la alta tensión del fotomultiplicador viene ajustada de fábrica, evitando la necesidad de calibraciones adicionales por parte del usuario.

Tabla 5. *Especificaciones técnicas del detector fotónico.*

Parámetro	Valor
Salida	USB
Control	Ver manual de usuario
Nivel de discriminación	-2 mV
Cuentas oscuras a 20 °C	Típico: 1000s ⁻¹ Máximo: 5000s ⁻¹
Acabado	Negro mate
Rango de respuesta espectral	Ver Figura 26
Tipo de fotocátodo	S20
Diámetro activo del fotocátodo	22 mm
Tiempo de calentamiento	< 2s
Eficiencia cuántica máxima (típica)	Ver Figura 26
Alimentación (a 10 s)	+5 V, 125 mA
Peso	230 g
Tensión de entrada	+4.75 +5.25 V
Humedad (sin condensación)	93% RH máx. a 30 °C
Posición de operación	Cualquiera
Temperatura de operación	+5 °C a +55 °C
Temperatura de almacenamiento	-40°C a +55 °C

Fuente: Elaboración propia a partir de especificaciones del fabricante.

La Figura 26 muestra las curvas de respuesta espectral y rango dinámico. El PMT tiene una buena respuesta en el rango visible para el que se ha diseñado el prototipo del instrumento.

Figura 26. Curvas de respuesta espectral y rango dinámico del PMT P25USB-01.**PHOTOCATHODE
SPECTRAL RESPONSE****DYNAMIC
RANGE**

Fuente: Especificaciones técnicas del fabricante *Sens Tech*.

El módulo incorpora un tubo fotomultiplicador de ventana final (diámetro activo ≈ 22 mm) con fotocátodo S20 de sensibilidad extendida al rojo. La señal del ánodo se discrimina y cuenta digitalmente en modo *photon counting*, aplicando corrección automática de tiempo muerto a altas tasas de conteo. La respuesta espectral del fotocátodo S20 cubre aproximadamente $\approx 300\text{--}850$ nm, con máximo de eficiencia en el visible rojo. El montaje con carcasa de *mu-metal* reduce la influencia de campos magnéticos, estabilizando la ganancia. El módulo está especificado para capacidades de conteo de hasta 100 MHz (dependiendo de las condiciones), con un tiempo de arranque inferior a 2 s y líneas de entrada/salida TTL para sincronización. El *dark count* a temperatura ambiente (20°C) es típicamente de $\approx 10^3 s^{-1}$, con un máximo especificado de $\approx 5 \times 10^3 s^{-1}$. El rango dinámico útil viene limitado por el tiempo muerto y la estadística de llegada de fotones. La corrección de tiempo muerto y la sustracción de fondo permiten extender la linealidad efectiva del sistema. En aplicaciones sensibles, puede emplearse control térmico o corrección software para compensar la deriva térmica del conteo oscuro.

7.6. Pruebas del prototipo sin fotomultiplicador

Para la primera fase de pruebas se ha montado, de acuerdo con el diseño 3D mostrado en apartados anteriores, un prototipo integrando los siguientes elementos: rendija, espejos

de colimación y enfoque, DMD en el plano espectral y la electrónica controladora del DMD. Adicionalmente, se ha conectado a la controladora una *Raspberry Pi* para implementar las pruebas del modo espectroscópico y el modo fotométrico. Podemos observar en la Figura 27, la Figura 28, y la Figura 29 fotografías del resultado del montaje, donde pueden apreciarse los elementos mencionados y su ubicación en el prototipo. También puede observarse que la posición del espejo de enfoque se realiza con micrómetro para poder conseguir un ajuste fino.

Figura 27. Fotografía del montaje, en una fase preliminar sin fotomultiplicador.

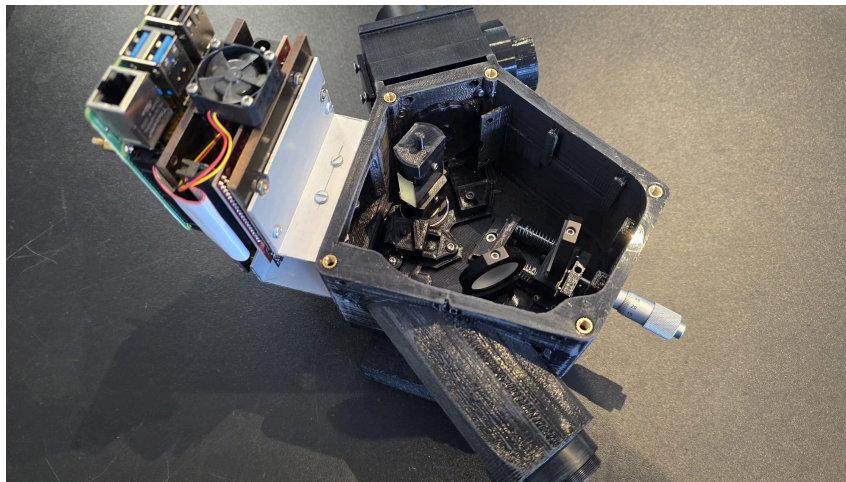


Figura 28. Fotografía con otra vista del montaje.

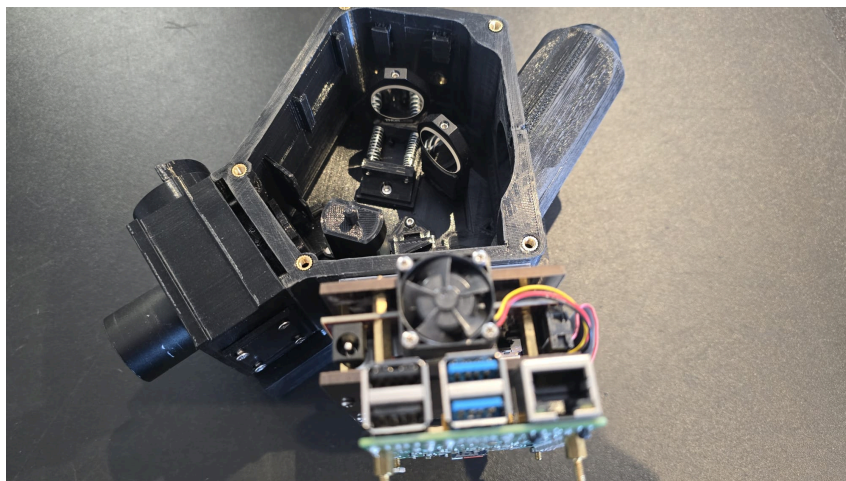


Figura 29. Fotografía en la que se ve el DMD desde la perspectiva del espejo enfocador.



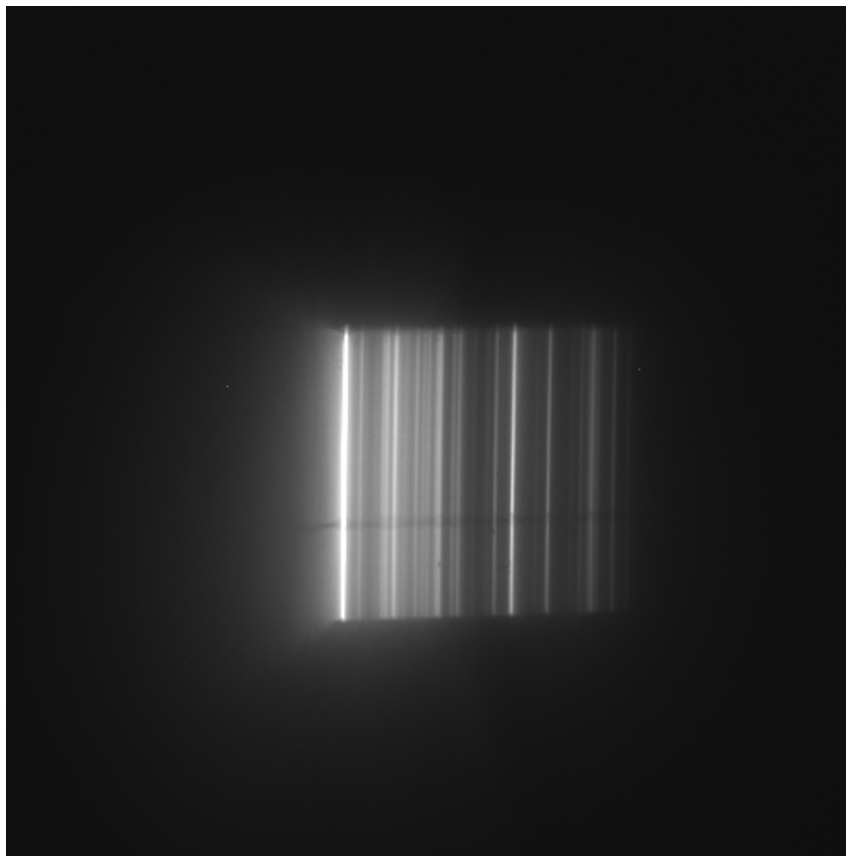
El objetivo de este montaje preliminar es probar el funcionamiento del montaje Czerny-Turner para verificar la generación de la imagen espectral en el DMD. Para ello, se ha optado por sustituir en una prueba preliminar el fotomultiplicador por un pequeño objetivo y una cámara CMOS en el plano donde el DMD enfoca. El procedimiento tiene las siguientes fases:

- Se genera en el DMD un patrón de espejos en forma de X (se activan en *ON* únicamente los espejos que forman parte de la X). La iluminación se realiza con una lámpara halógena que genera un patrón continuo en el plano espectral. Se ajusta el objetivo y la cámara CMOS a una distancia tal que la imagen de la X se obtiene enfocada. La Figura 30 muestra el resultado.
- Se genera en el DMD un patrón de espejos con todos en *ON*. Se ilumina la rendija con una lámpara de Neón. En la cámara debemos observar el espectro obtenido que se muestra en la Figura 31.

Figura 30. *Prueba de foco.*



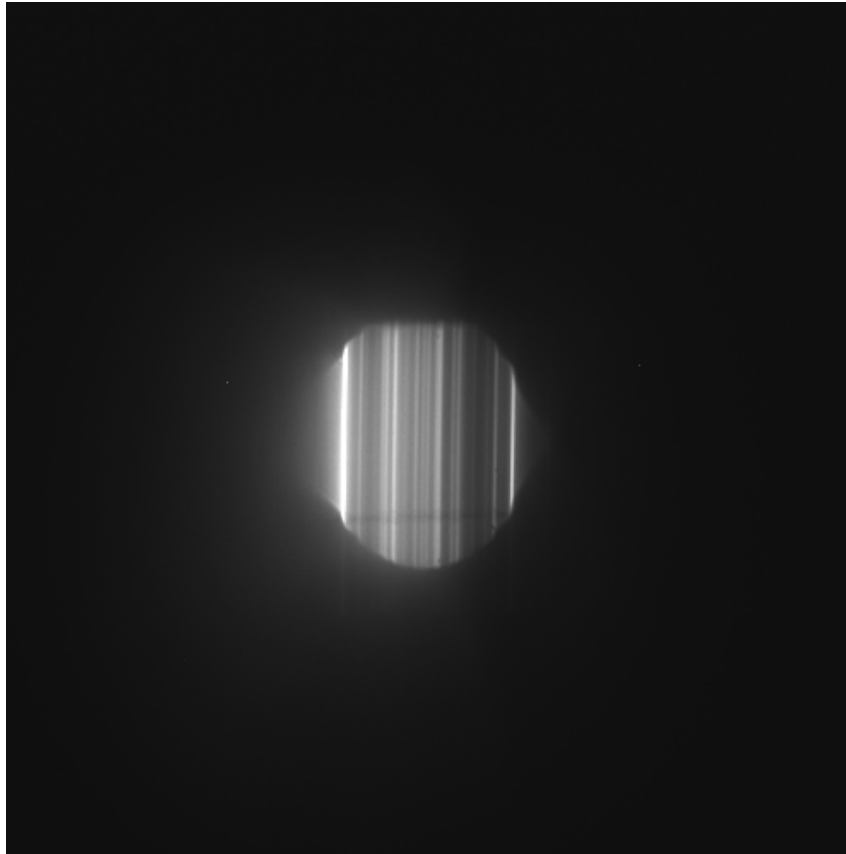
Figura 31. *Espectro de lámpara de Neón obtenido en el plano del DMD y reflejado por el DMD a la cámara de test.*



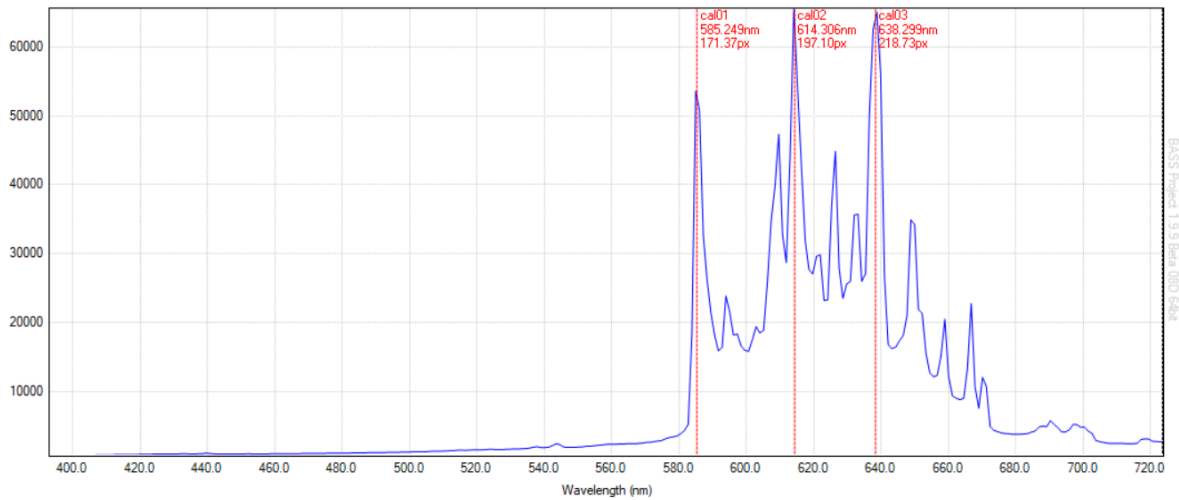
El montaje y ajuste explicado nos permite capturar imágenes del plano espectral y experimentar con patrones de modulación espacial. Como ejemplo demostrativo del concepto

de modulación, se han seleccionado y activado en modo *ON* los micro espejos correspondientes a un círculo. Se muestra el resultado de dicha modulación sobre el espectro de Neón en la Figura 32.

Figura 32. *Espectro de lámpara de Neón modulado espacialmente con un círculo.*



El siguiente paso es realizar una calibración del espectro de Neón para determinar el rango espectral y la resolución. Para este cometido se ha utilizado el programa *BASS Project* (BASS Project, 2026). Mediante la identificación de las líneas de la lámpara de Neón se han reconocido las principales líneas de emisión obteniendo el espectro que se muestra en la Figura 33. En la figura se resaltan las tres líneas de emisión que se han utilizado para la calibración.

Figura 33. Espectro de lámpara de Neón con cámara CMOS.

A partir del espectro calibrado podemos concluir:

- El funcionamiento de la óptica del espectrógrafo Czerny-Turner es correcto al verificar que en el plano del DMD se forma una imagen espectral.
- El rango espectral obtenido en esta prueba experimental es entre aproximadamente 400nm y 700nm. Este rango es ajustable girando la red de difracción y cubre unos 300nm, y está centrado aproximadamente en 550nm. Obtenemos, por lo tanto, un espectro centrado en el visible y con una cobertura razonable. La principal limitación del rango son las pequeñas dimensiones de la zona activa del DMD empleado.

Para evaluar la resolución espectral obtenida, consideramos que ésta viene determinada, en primera aproximación, por la anchura de la rendija proyectada sobre el plano espectral. A partir del diseño óptico descrito en los capítulos anteriores, la dispersión lineal en el plano del DMD es:

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\Delta\lambda}{W} \approx \frac{336 \text{ nm}}{5.184 \text{ mm}} \approx 64.8 \text{ nm mm}^{-1}, \quad (30)$$

donde $\Delta\lambda \approx 336 \text{ nm}$ es la anchura espectral total proyectada y $W = 5.184 \text{ mm}$ el ancho útil del DMD. La rendija utilizada en el prototipo tiene una anchura geométrica de:

$$w_{\text{rendija}} \approx 35 \mu\text{m} \approx 0.035 \text{ mm} \quad (31)$$

Como los espejos colimador y de enfoque tienen la misma distancia focal, la magnificación lineal es aproximadamente unitaria, de modo que la anchura de imagen de la rendija en el plano espectral es, en primera aproximación,

$$W_{\text{imagen}} \approx W_{\text{rendija}} \quad (32)$$

La anchura espectral de un elemento resoluble viene dada por:

$$\Delta\lambda_{\text{res}} \approx \frac{d\lambda}{dx} W_{\text{imagen}} \approx 64.8 \text{ nm mm}^{-1} \times 0.035 \text{ mm} \approx 2.27 \text{ nm} \quad (33)$$

Tomando una longitud de onda representativa en la zona central del espectro, por ejemplo $\lambda_0 \approx 550 \text{ nm}$, la resolución teórica del prototipo es

$$R_{\text{teo}} = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda_{\text{res}}} \approx \frac{550 \text{ nm}}{2.27 \text{ nm}} \approx 240. \quad (34)$$

Esta estimación puede compararse con la resolución deducida experimentalmente a partir del espectro de una lámpara de Ne obtenido en el plano del DMD y registrado con una cámara CMOS, y analizado posteriormente con el software *BASS Project*. En la zona central del espectro se obtiene un valor de

$$R_{\text{exp}} \approx 230 \quad (35)$$

en excelente acuerdo con la predicción teórica dentro de las incertidumbres asociadas al enfoque, al muestreo en píxeles y al ajuste de perfiles en el proceso de calibración.

7.7. Pruebas del prototipo con PMT

Con el objetivo de evaluar el rendimiento del sistema en su configuración monopíxel, el siguiente paso consiste en la sustitución de la cámara CMOS utilizada en fases previas por un tubo fotomultiplicador como detector puntual. Esta sustitución implica una modificación tanto del acople óptico como del procedimiento de enfoque y alineación, dado que el PMT no proporciona información espacial directa del plano espectral. Para el acoplo del haz reflejado por el DMD al PMT se ha añadido un doblete convergente, cuya función es concentrar la luz modulada sobre la superficie fotosensible del detector. Esta configuración maximiza la eficiencia de recogida de luz manteniendo la selectividad espectral impuesta

por el DMD. La Figura 34 muestra el resultado del equipo con el PMT y la lente de acople. La Figura 35 muestra cómo se ha incluido una pantalla para bloquear la incidencia de luces parásitas sobre el PMT.

Figura 34. *Imagen del instrumento con el PMT instalado.*

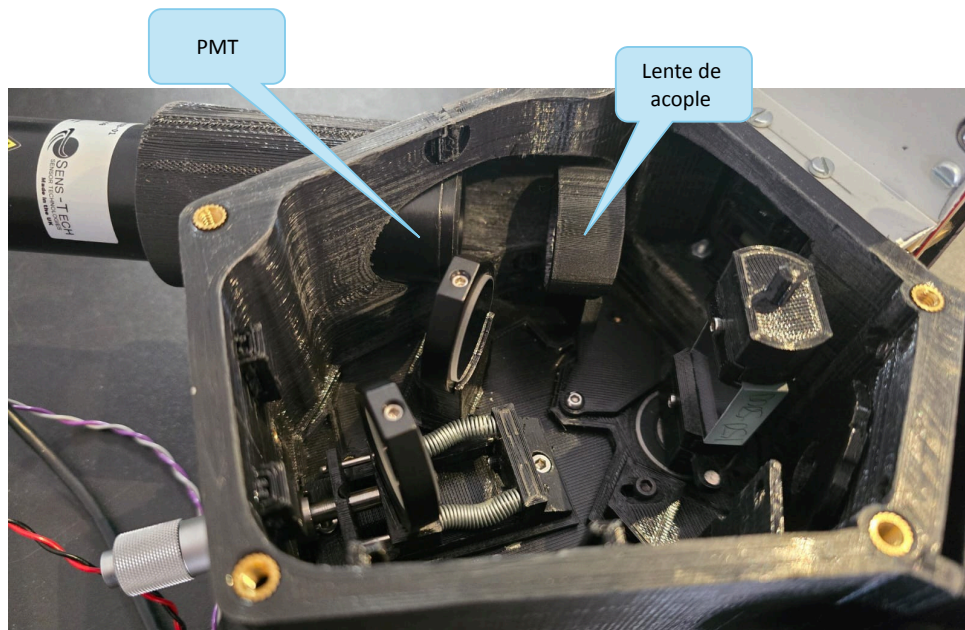
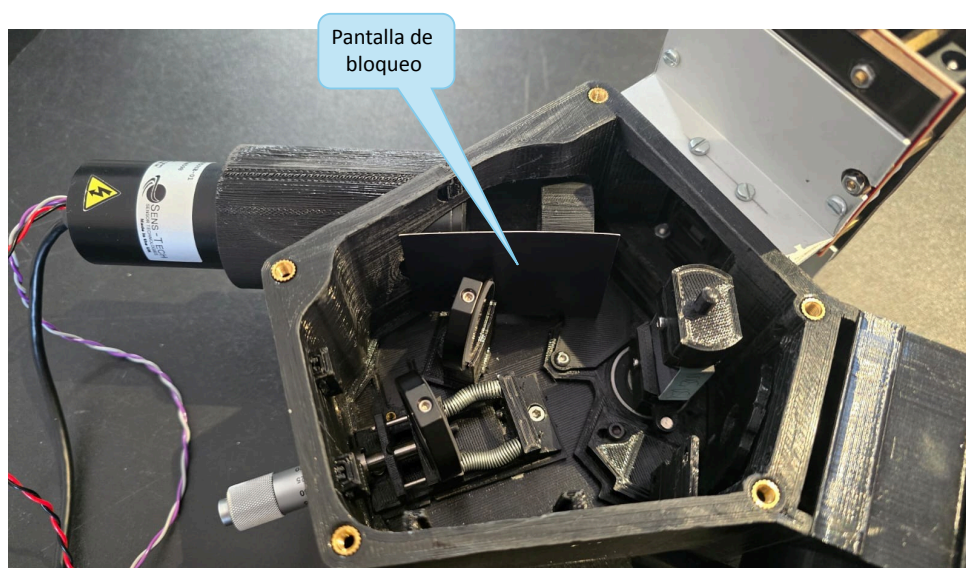


Figura 35. *Pantalla para bloquear la luz parásita que pueda generarse en la parte óptica del espectrómetro.*



7.7.1. Ajuste del enfoque

El enfoque realizado previamente con la cámara CMOS hay que considerarlo como aproximado. El DMD actúa como una superficie reflectante discreta (no es un elemento ópticamente pasivo), por lo que la correcta visualización del patrón reflejado no garantiza que el espectro esté perfectamente enfocado sobre el plano del modulador. Por este motivo, el enfoque definitivo del sistema se ha realizado directamente utilizando el PMT, optimizando la resolución espectral medida y no la apariencia visual del patrón reflejado. El criterio adoptado para el enfoque consiste en minimizar la anchura espectral de una línea bien definida de una lámpara de neón. En particular, se ha seleccionado la línea de 585.249 nm, que presenta una intensidad elevada y una línea de base muy plana hacia el lado azul del espectro, lo que facilita un cálculo robusto del ancho a media altura (FWHM).

El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

- Se realiza un barrido espectral en torno a la línea seleccionada.
- Se calcula el FWHM de la línea a partir del espectro adquirido.
- Se ajusta iterativamente la posición del espejo de enfoque del espectrógrafo hasta obtener el valor mínimo de FWHM.

El FWHM se utiliza aquí como una medida operacional de la resolución espectral, adecuada para comparar configuraciones y optimizar el sistema, aunque no pretende describir con exactitud la forma intrínseca de la línea. Una vez optimizado el enfoque longitudinal, se ha procedido a ajustar la orientación angular de la rendija de entrada. Se ha comprobado experimentalmente que una ligera desviación angular entre la rendija y el eje del DMD provoca un ensanchamiento apreciable de las líneas espectrales, debido a la integración de distintas longitudes de onda a lo largo de la altura de la rendija. El ajuste angular se ha realizado, de nuevo, minimizando el FWHM medido.

Tras completar el proceso de enfoque y alineación, el valor mínimo de FWHM obtenido para la línea de 585.249 nm es de aproximadamente 14 píxeles lógicos. En este apartado, los tamaños de barra se expresan en píxeles lógicos, siendo cada dos píxeles equivalentes a un micro espejo físico.

Considerando una dispersión media de aproximadamente 0.35 nm por micro espejo, este ancho equivale a una resolución espectral del orden de:

$$\Delta\lambda \approx 2.5 \text{ nm}, R \approx 250 \quad (36)$$

en la zona central del espectro.

Este valor es comparable, e incluso ligeramente superior, al obtenido previamente con la cámara CMOS, confirmando que el tren óptico del sistema es capaz de mantener una alta resolución espectral también en configuración de detección puntual.

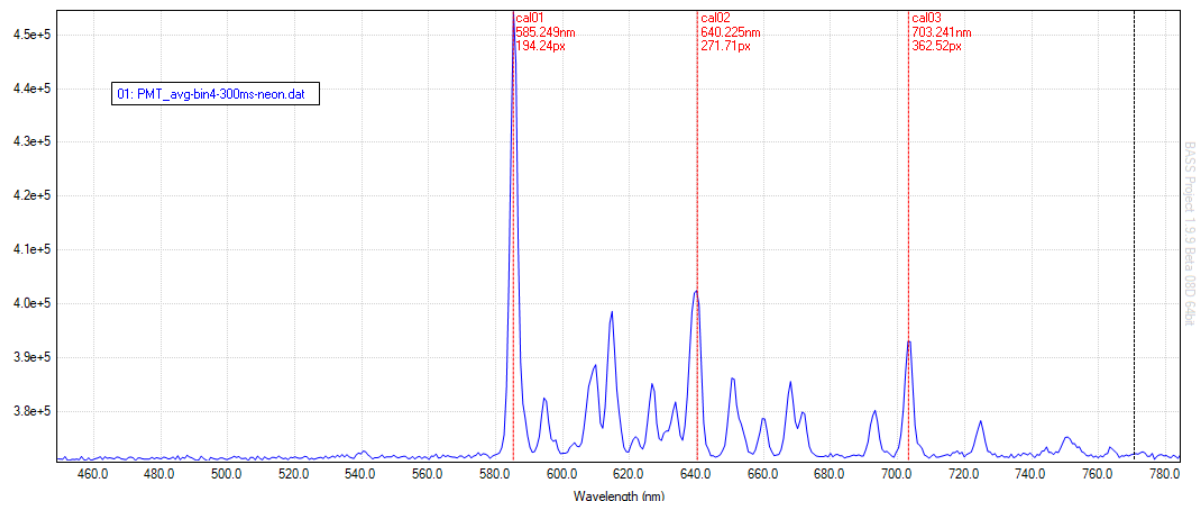
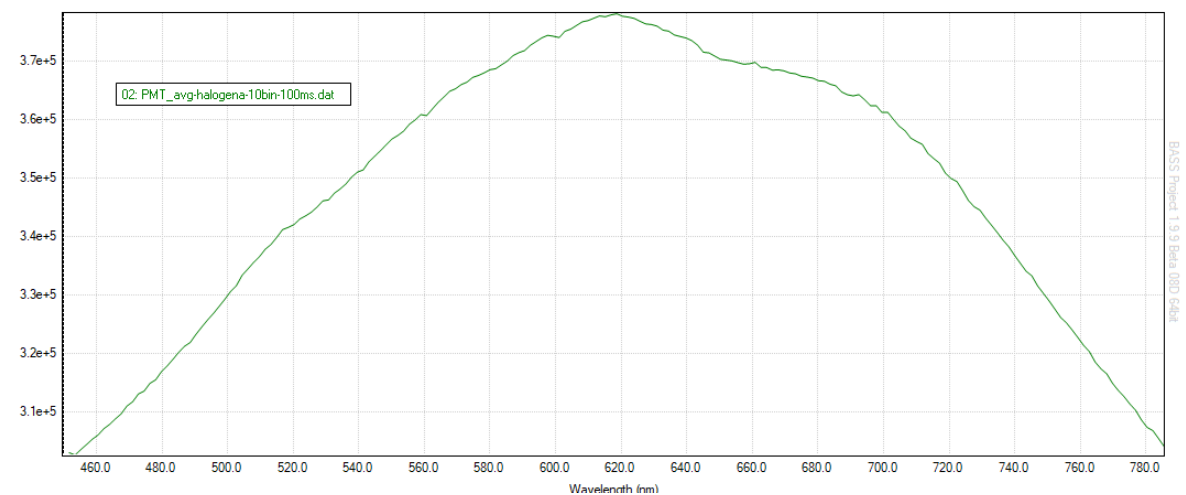
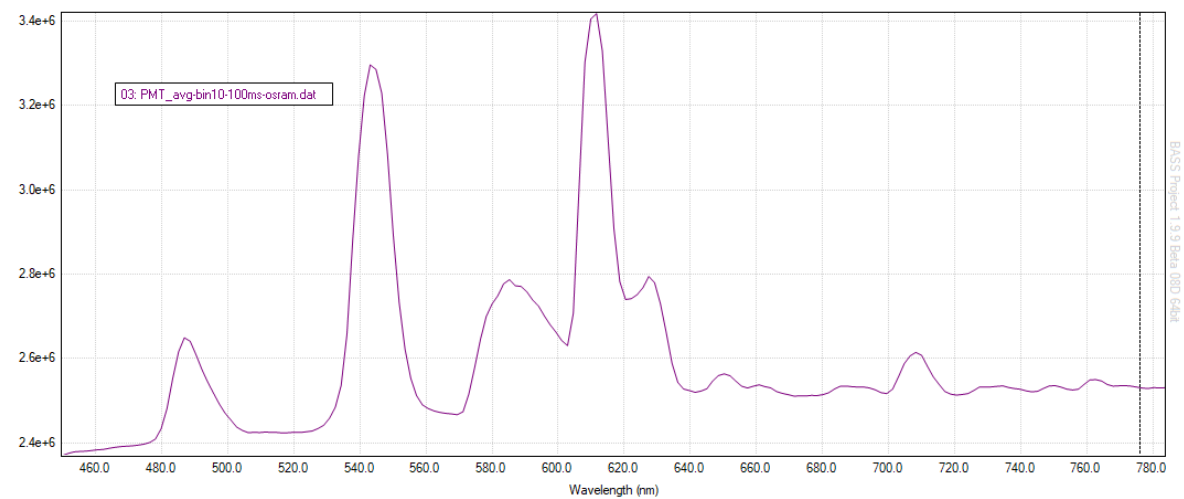
7.7.2. Prueba modo espectrógrafo

Una vez establecida la configuración óptima, se han adquirido espectros completos de una lámpara de neón utilizando un barrido secuencial con barras de 4 píxeles lógicos. El espectro resultante, mostrado en la Figura 36, presenta líneas bien definidas, línea base muy estable y un nivel de ruido reducido. Se muestra el resultado de la calibración con tres líneas de Neón.

El rango espectral cubierto en estas medidas se extiende desde aproximadamente 449 nm hasta 784 nm. El rango específico puede modificarse modificando el ángulo de la red de difracción. En comparación con los espectros adquiridos mediante CMOS, el espectro obtenido con PMT presenta un mayor contraste de líneas y una línea base más limpia, lo que resulta especialmente ventajoso para técnicas de decodificación posteriores. Sobre este espectro se ha medido la resolución obteniendo $R = 243@585.49 \text{ nm}$.

Adicionalmente, se ha adquirido el espectro de una lámpara halógena (Figura 37) y el de una lámpara *OSRAM* (Figura 38), en ambos casos con barras de 10 píxeles lógicos.

Estos resultados confirman la idoneidad del diseño, ofreciendo un excelente comportamiento como espectrógrafo en las pruebas de laboratorio.

Figura 36. Espectro de una lámpara de neón obtenido con PMT.**Figura 37.** Espectro de una lámpara halógena obtenido con PMT.**Figura 38.** Espectro de una lámpara OSRAM obtenida con PMT.

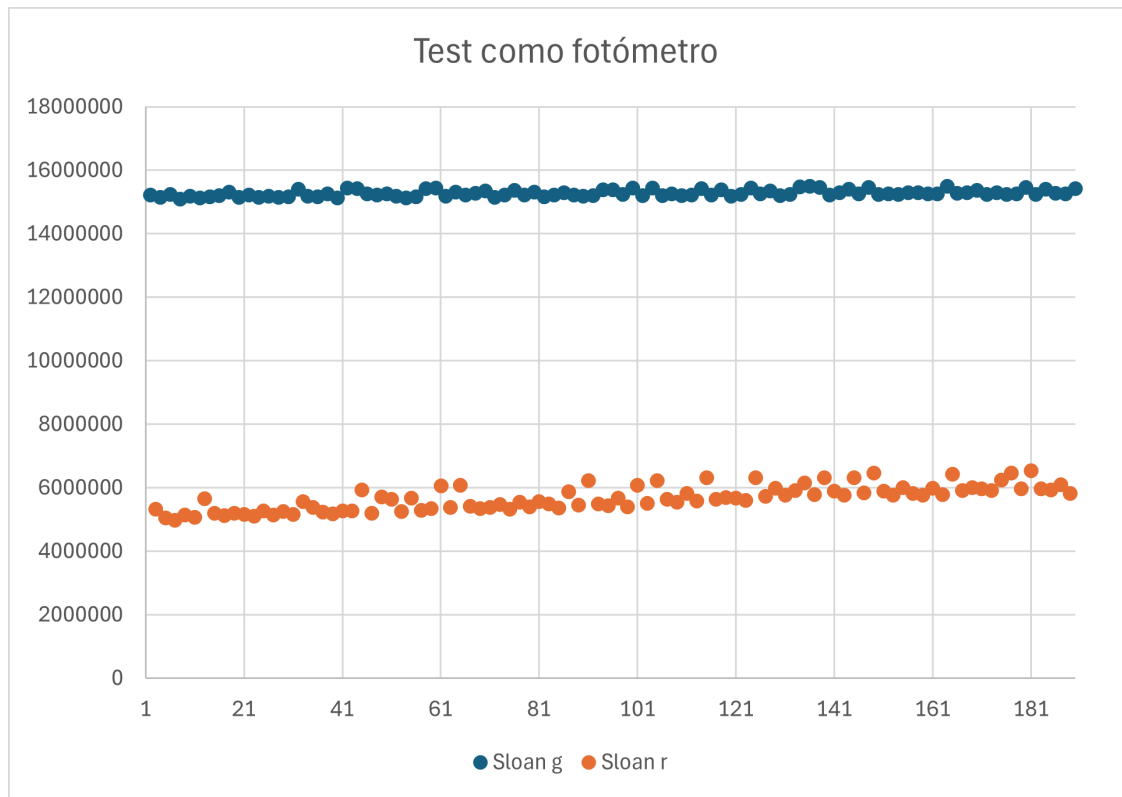
7.7.3. Prueba modo fotómetro

Se ha utilizado como fuente de luz una lámpara *OSRAM* y se han considerado dos rangos espectrales:

- Rango espectral 1: desde 450 a 550 nm, que corresponde aproximadamente a un filtro fotométrico *Sloan g*.
- Rango espectral 2: desde 550 a 700 nm, que corresponde aproximadamente a un filtro fotométrico *Sloan r*.

Se han realizado medidas consecutivas en ambos filtros configurando los micro espejos que se corresponden con cada rango espectral y se han obtenido las series de datos correspondientes a cada filtro, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 39. El resultado es muy interesante porque se manifiesta la potencia de uso del instrumento como fotómetro realizando conmutaciones entre dos filtros sin ningún movimiento mecánico. Las medidas se han realizado con cuenta fotónica de 500ms, y sin tiempo entre la conmutación de los filtros, ya que la respuesta de los espejos es prácticamente instantánea. En este caso particular se observa cómo la medida correspondiente al filtro *Sloan g* apenas varía más allá del ruido fotónico, pero la medida con filtro *r* va incrementando su valor, probablemente por el progresivo calentamiento de la lámpara.

Figura 39. Series obtenidas realizando medidas consecutivas alternando la configuración de los micro espejos para aplicar un rango espectral correspondiente a Sloan g y Sloan r. El eje X indica la secuencia de medida.



8. Métodos de adquisición

En este capítulo se presentan las soluciones de software desarrolladas para el control del instrumento. Los métodos de adquisición, así como su implementación, difieren según el instrumento se utilice como fotómetro o como espectrógrafo. No obstante, ambas configuraciones comparten desarrollos comunes, como el control del PMT y la activación y desactivación de los espejos del DMD. En los siguientes apartados se describen estas herramientas comunes, así como las estrategias adoptadas para el control global del sistema. Dado que la placa controladora es una *Raspberry Pi* con sistema operativo *Ubuntu*, se ha optado por desarrollar el software en Python para entorno Linux.

8.1. Control del PMT

El PMT seleccionado incorpora una conexión USB para su control y la lectura de las medidas. El fabricante del módulo, *Sens-Tech*, proporciona únicamente un *driver* propietario para Windows, sin documentación pública del protocolo de comunicación serie subyacente. Tal como se ha mencionado, el dispositivo desarrollado debe ser implementado en un entorno Linux no soportado oficialmente por el fabricante, lo que ha requerido un proceso de **ingeniería inversa** para obtener el protocolo nativo empleado por el PMT. El objetivo no ha sido reproducir el comportamiento interno del firmware, sino identificar los comandos mínimos necesarios para configurar el equipo y adquirir medidas de forma fiable mediante una interfaz serie estándar.

Para el control del PMT se necesita, como mínimo, identificar los comandos que permiten activar y desactivar el modo *HV* (*High Voltage*), definir el periodo de integración de las medidas, y obtener los valores de las mediciones. Se presume que estos comandos se

organizan dentro de un formato o protocolo que se pretende identificar. Es necesario también, determinar los parámetros físicos de la comunicación a través del USB, como son la velocidad, bits de datos, paridad, y si el dispositivo emplea o no control de flujo.

El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

- Captura del tráfico serie generado por el software original en Windows, identificando patrones repetitivos de comandos y respuestas.
- Desarrollo de *scripts* en *Python* (usando *pyserial*) para enviar comandos individuales y observar las respuestas del dispositivo.
- Aislamiento progresivo de comandos mediante pruebas controladas (cambio de un único parámetro por vez).
- Verificación empírica del efecto de cada comando sobre el comportamiento del equipo (ritmo de adquisición, magnitud de la señal, activación de *HV*, etc.).

El resultado del proceso ha sido satisfactorio, pudiendo encontrar los comandos necesarios para el control del PMT y la lectura de las medidas. Los comandos hallados se presentan en los anexos y, aunque se basan en observaciones reproducibles y coherentes, deben entenderse como *no oficiales* pero adecuadas para el alcance del presente trabajo.

Empleando el protocolo obtenido se ha desarrollado una aplicación de control y adquisición de datos para el tubo fotomultiplicador (PMT) modelo EM6, implementada en *Python*. Su función principal es gestionar la comunicación con el dispositivo a través de un puerto serie, permitiendo tanto el envío de comandos de control como la recepción y procesamiento de datos en tiempo real. La aplicación incorpora una interfaz gráfica de usuario (GUI) basada en *tkinter*, lo que permite una interacción sencilla sin necesidad de operar mediante consola. El software permite:

- Establecer comunicación serie con el dispositivo (9600 8N1)
- Controlar la alimentación de alto voltaje (*HV*)
- Iniciar y detener la adquisición de datos en modo continuo
- Realizar adquisiciones discretas mediante el comando de lectura
- Configurar parámetros de operación:
 - Periodo de muestreo (P)

- Número de lecturas (R)
- Visualizar en tiempo real:
 - Datos binarios (enteros de 32 bits)
 - Mensajes de estado del dispositivo
- Activar un modo de depuración para monitorizar la comunicación *RAW*

El software se organiza en una única clase principal, EM6GUI, que integra tanto la interfaz gráfica como la lógica de comunicación.

Su funcionamiento se basa en tres bloques principales:

- **Interfaz de usuario:** permite la configuración del sistema y el envío de comandos.
- **Comunicación serie:** gestiona el envío y recepción de datos mediante `pyserial`.
- **Procesamiento de datos:** interpreta la información recibida, diferenciando entre datos binarios y mensajes de texto.

La recepción de datos se realiza en un hilo independiente, lo que permite mantener la interfaz gráfica responsiva durante la adquisición.

Modos de operación

El sistema implementa dos modos principales:

- **Modo *streaming*:** adquisición continua de datos en formato binario.
- **Modo discreto:** adquisición de un número finito de lecturas definido por el parámetro R.

El control de estos modos se realiza mediante variables internas que actúan como una máquina de estados simple.

Procesamiento de datos

Los datos recibidos se procesan de dos formas:

- Datos binarios: se agrupan en bloques de 4 bytes e interpretan como enteros de 32 bits en formato *big-endian*.
- Datos de texto: se analizan para detectar mensajes y *tokens* de control enviados por el dispositivo.

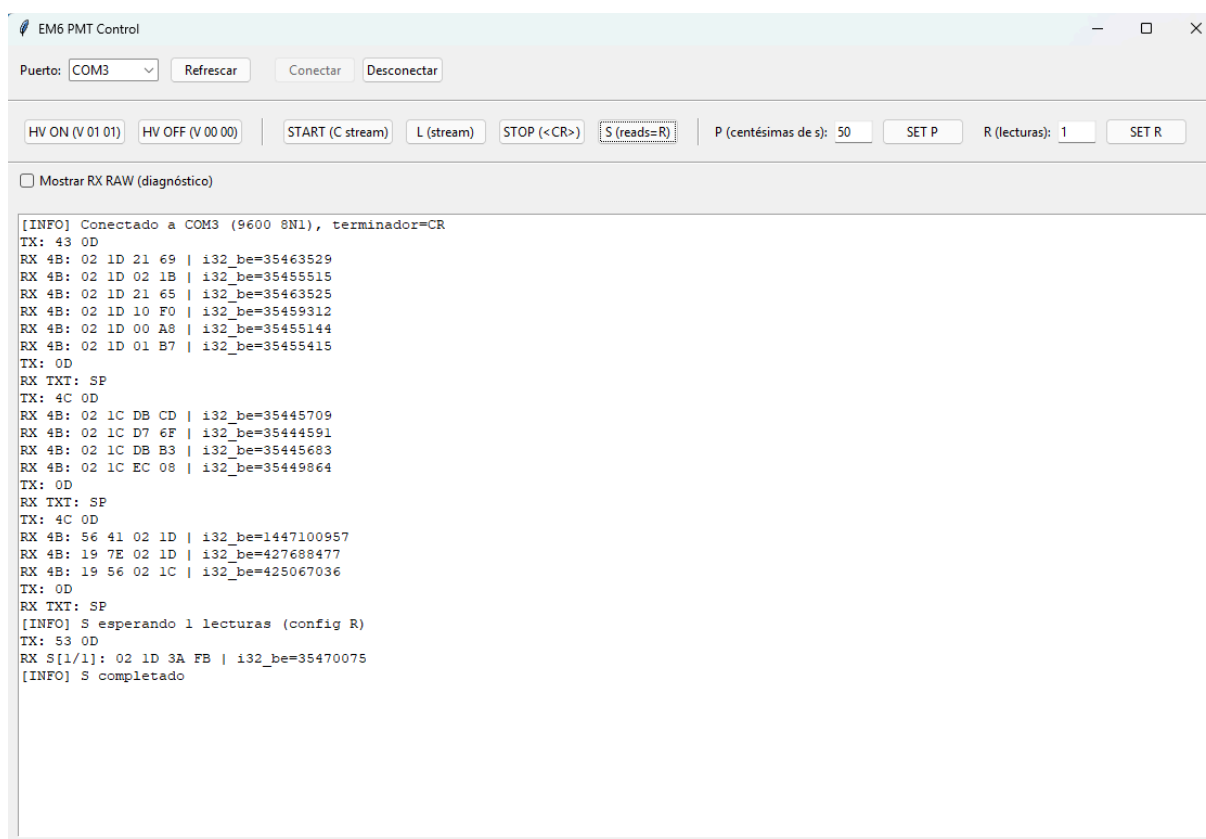
Este enfoque permite separar claramente la información científica de los mensajes de estado.

Comandos implementados

El software permite el envío de comandos específicos al dispositivo, entre los que destacan:

- Activación y desactivación del alto voltaje
- Inicio y parada de la adquisición
- Configuración de parámetros de medida (comandos P y R)
- Solicitud de lecturas individuales o múltiples

El software desarrollado constituye una herramienta completa para el control y adquisición de datos de un PMT. Integra comunicación de bajo nivel, procesamiento de datos y una interfaz de usuario intuitiva, proporcionando una base sólida para futuras ampliaciones e integración en sistemas experimentales más complejos. La aplicación ha constituido una herramienta imprescindible para probar eficazmente el funcionamiento del PMT y disponer de las funciones adecuadas para su integración en el software de control del equipo. La Figura 40 muestra un ejemplo de sesión de comunicaciones con el PMT.

Figura 40. Captura de una sesión del software EM6.

8.2. Control de DMD

El módulo DLP230NP puede operar en modo de entrada paralela, en el que el estado de los micro espejos reproduce directamente la señal de vídeo generada por un dispositivo externo (por ejemplo, una *Raspberry Pi*). En este modo, la imagen de salida del sistema se replica en el DMD en tiempo real mediante un bus de vídeo digital paralelo, independiente del canal de control (*I2C*).

La comunicación con el controlador DLPC3436 se realiza a través del bus *I2C*, el cual se emplea exclusivamente para la configuración inicial del sistema. Una vez completada dicha configuración, el flujo de vídeo se transmite íntegramente por el bus paralelo.

Texas Instruments proporciona un *script* en *Python*, denominado `init_parallel_mode.py`, que inicializa el modo de operación paralelo mediante las siguientes acciones:

1. Inicializa el bus *I2C* y registra las funciones de lectura y escritura.
2. Configura los pines *GPIO* de la *Raspberry Pi* para operar como interfaz de vídeo.

3. Activa una cortina de imagen negra para evitar artefactos visuales durante la configuración.
4. Selecciona la fuente de entrada como puerto paralelo externo.
5. Define la resolución de entrada (por ejemplo, 1920×1080 píxeles).
6. Configura el formato de vídeo como RGB666 (6 bits por canal de color).
7. Ajusta los parámetros de sincronización del bus paralelo.
8. Desactiva la cortina de imagen para iniciar la proyección.

En modo paralelo, cada píxel se transmite simultáneamente a través de múltiples líneas:

- 6 líneas para el canal rojo,
- 6 líneas para el canal verde,
- 6 líneas para el canal azul.

Esto constituye un formato RGB666, con un total de 18 bits por píxel. No obstante, en el instrumento que se presenta, solo se configura una imagen en blanco y negro mediante los microespejos.

Además de los datos de color, se utilizan señales de control fundamentales:

- *PCLK*: reloj de píxel, que indica cuándo deben muestrearse los datos,
- *HSYNC*: señal de sincronización horizontal,
- *VSNC*: señal de sincronización vertical,
- *DE (Data Enable)*: indica cuándo los datos son válidos.

El controlador DLPC3436 utiliza estas señales para reconstruir la imagen completa a partir del flujo de datos recibido.

Una vez finalizada la configuración, el sistema entra en un modo de operación continua en el que:

- El controlador ignora cualquier contenido interno,
- La imagen proyectada corresponde directamente a la señal recibida por el bus paralelo,
- Cualquier modificación en la salida de vídeo de la *Raspberry Pi* se refleja inmediatamente en el DMD.

Por tanto, el dispositivo actúa como un visualizador dependiente de una señal externa. Este modo de trabajo presenta las siguientes ventajas:

- Implementación sencilla y directa.
- Compatibilidad con la salida de vídeo de la *Raspberry Pi* sin *hardware* adicional.
- Baja latencia en la visualización.

Para el objetivo demostrativo del presente TFG, el modo paralelo constituye una solución adecuada debido a su simplicidad de implementación y al control directo de la imagen proyectada. Sin embargo, presenta limitaciones en términos de eficiencia y escalabilidad frente a interfaces más avanzadas como FPD-Link, que se plantean como línea futura de desarrollo.

8.3. Arquitectura software del sistema

El sistema software se implementa mediante una arquitectura distribuida en dos nodos independientes: un **nodo de adquisición**, encargado del control del DMD y del detector, y un **nodo de visualización** y procesado, encargado de la recepción y representación de los datos en tiempo real. Ambos nodos se comunican mediante una conexión TCP (*Transmission Control Protocol*).

El **nodo de adquisición** se ha implementado en el *script* **ef.py** que se ejecuta en una *Raspberry Pi* integrada en el instrumento, y realiza simultáneamente las siguientes tareas:

- Genera imágenes en pantalla completa mediante pygame.
- Aprovecha que el DMD ya ha sido configurado en modo de entrada paralela, de modo que el contenido visual generado por pantalla pasa directamente al DMD.
- Se comunica con el PMT a través de un puerto serie.
- Envía cada medida adquirida a un servidor remoto mediante TCP.

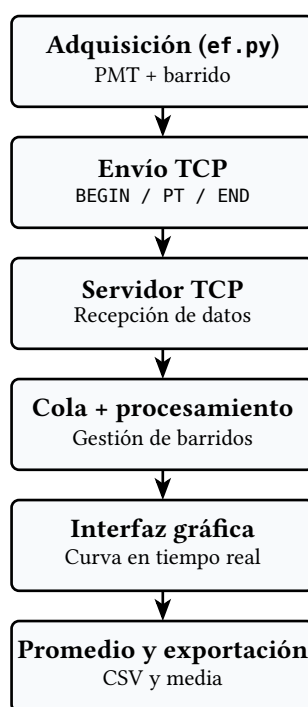
El **nodo de visualización** se ha implementado en el *script* **PMT pc_server_plot.py**, que se ejecuta en un PC y actúa como receptor de datos y como estación de monitorización con las siguientes funciones:

- Escucha conexiones entrantes en un puerto TCP.

- Recibe mensajes que indican el inicio, desarrollo y fin de cada barrido.
- Representa gráficamente la curva de medidas en tiempo real.
- Puede calcular un promedio entre barridos sucesivos.
- Permite exportar los resultados a ficheros CSV.

La Figura 41 muestra el flujo general de sistema que integra los nodos de adquisición y visualización.

Figura 41. Flujo global del sistema de adquisición y visualización.



8.3.1. Nodo de adquisición

En este apartado se describe en detalle el *script ef.py* (código fuente incluido en el Anexo B) que constituye el elemento central de software del experimento. Su funcionamiento combina tres subsistemas diferentes:

1. El subsistema de control del DMD mediante representación visual apoyada en el modo paralelo.
2. El subsistema de adquisición del PMT a través de la implementación del protocolo serie de control y obtención de medidas.
3. El subsistema de comunicaciones de red para la visualización y captura en tiempo real de las mediciones.

Este software se ejecuta en modo consola y no dispone de interfaz visual.

Generación de patrones visuales para el DMD

La parte visual del *script* se implementa con la biblioteca *pygame*. El programa inicializa una ventana en modo pantalla completa mediante:

- `pygame.init()`
- `pygame.display.set_mode((0, 0), pygame.FULLSCREEN)`

A continuación se crea una superficie de dibujo con las mismas dimensiones que la pantalla. Sobre ella se representa una barra luminosa blanca sobre fondo negro. Esta barra constituye el patrón óptico que se configura en el DMD.

La función encargada del dibujo es:

`draw_bar(surface, color, x, y, height, width, tilt=0)`

Esta función dibuja una línea vertical de anchura determinada, que en la práctica actúa como una franja iluminada. En cada iteración del barrido se borra la superficie anterior, se dibuja la nueva barra en la posición actual y se actualiza la pantalla mediante:

`screen.blit(surface, (0, 0)) pygame.display.flip()`

Dado que el sistema DLP ya ha sido configurado en modo paralelo, la imagen generada por la GPU del sistema pasa directamente a la electrónica del controlador. Por tanto, cada nueva posición de la barra mostrada por *pygame* corresponde a una nueva posición de activación de espejos en el DMD.

Barrido espacial

El barrido se realiza desplazando la barra desde la zona derecha de la pantalla hacia la izquierda. Para ello se define una posición inicial `start_x`, situada en el extremo derecho, una posición final `end_x`, situada en el extremo izquierdo, y un incremento negativo igual a `BAR_WIDTH`.

En cada paso del barrido:

- Se muestra la barra en la posición `x`.

- Se espera el tiempo necesario para respetar el tiempo de integración.
- Se adquiere una medida del PMT.
- Se envía esa medida al PC remoto.
- Finalmente se decrementa x.

De este modo, el sistema asocia una medida fotométrica a cada posición espacial de la barra. El resultado final es una curva intensidad frente a posición, equivalente a un perfil espacial de la señal óptica detectada.

Control del PMT mediante puerto serie

El mismo *script* **ef.py** incorpora las funciones necesarias para comunicarse con el PMT a través del puerto serie. Para ello emplea la biblioteca serial. La comunicación se realiza mediante el protocolo descrito en el Anexo A. Entre las funciones implementadas destacan las siguientes:

- **pmt_write**: envía bytes al PMT.
- **pmt_read_exact**: lee un número exacto de bytes con control de tiempo máximo de espera.
- **pmt_hv**: conmuta la alta tensión del PMT.
- **pmt_set_p_centisec**: fija el tiempo de integración.
- **pmt_single_read_i32_be**: solicita una lectura y recibe el resultado como entero de 32 bits en formato *big-endian*.

El procedimiento de inicialización del PMT es el siguiente:

- Se abre el puerto serie,
- Se limpian los buffers de entrada y salida,
- Se activa la alta tensión mediante `pmt_hv(ser, True)`,
- Se espera un tiempo de estabilización,
- Se fija el tiempo de integración con `pmt_set_p_centisec`.

El parámetro `P_CENTISEC` expresa el tiempo de integración en centésimas de segundo. Por ejemplo, un valor de 50 equivale a 0.50 s. Este tiempo controla cuánto integra el PMT antes de devolver una medida.

Una vez comenzado el barrido, en cada posición de la barra se llama a:

```
val = pmt_single_read_i32_be(...)
```

Con ello se lanza una adquisición individual y se obtiene un valor entero asociado a esa posición. Si se produce un tiempo de espera excesivo, el sistema registra un error de tipo *TimeoutError* y transmite un valor no válido.

Sincronización entre posición óptica y medida PMT

Un aspecto importante del script es la sincronización entre el estímulo óptico proyectado y la adquisición del PMT.

En cada paso del bucle principal ocurre lo siguiente:

- Se dibuja la barra en una posición x.
- La pantalla se actualiza.
- Se espera el tiempo mínimo necesario.
- Se realiza una lectura del PMT.
- La medida obtenida se asocia a esa posición x.

Esta estrategia permite construir una correspondencia directa entre coordenada espacial y señal fotométrica. En consecuencia, cada barrido genera dos listas:

- xs: posiciones espaciales.
- ys: medidas asociadas.

Estas listas constituyen la base del análisis posterior y de la representación gráfica en tiempo real.

Comunicación TCP con el ordenador remoto

Además de controlar el DLP y el PMT, **ef.py** incorpora un cliente TCP implementado en la clase `TCPClient`. Su misión es establecer una conexión con el ordenador remoto y transmitirle las medidas según se generan. La secuencia de comunicación está basada en líneas de texto terminadas en salto de línea. Se distinguen tres tipos de mensajes:

- **BEGIN**: indica el comienzo de un barrido.
- **PT**: transmite un punto individual del barrido.

- **END**: indica el final del barrido.

Al inicio de cada barrido se envía un mensaje de la forma:

BEGIN,nombre_de_sección,epoch_ms,P_CENTISEC,BAR_WIDTH

Este mensaje permite al servidor saber que comienza una nueva curva y le proporciona metadatos como el instante de inicio, el tiempo de integración y la anchura de la barra.

Durante el barrido, cada lectura del PMT se envía como: PT,x,valor donde x es la posición de la barra y valor es la medida fotométrica. Finalmente, al terminar el recorrido completo, se envía: END,nombre_de_sección. Este esquema de comunicación es suficiente para reconstruir remotamente cada barrido sin necesidad de protocolos complejos.

El script permite operar en dos modos:

- Modo manual, en el que el usuario pulsa INTRO antes de cada barrido,
- Modo continuo, activado con s, en el que los barridos se realizan de forma sucesiva.

También es posible finalizar el experimento escribiendo q o cerrando la ventana gráfica. Este diseño resulta útil en un entorno experimental, ya que permite alternar entre adquisición controlada y secuencias automáticas de medida.

El *script* incorpora además una función de análisis denominada *compute_fwhm*, que calcula la anchura a media altura de la curva obtenida.

La función:

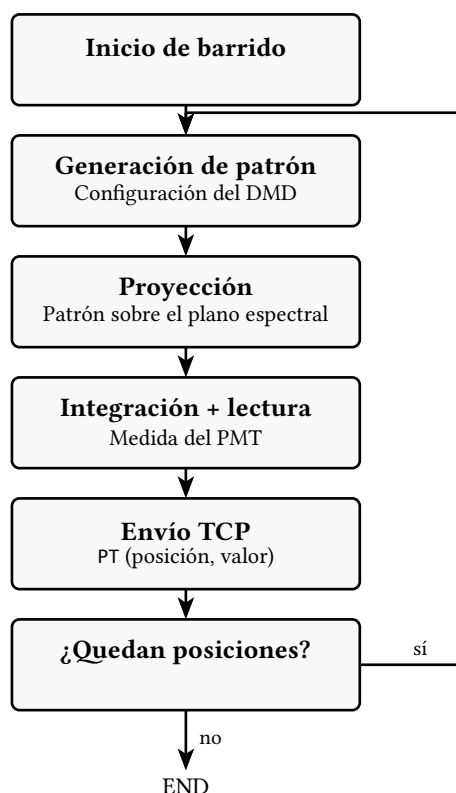
- Ordena los puntos por posición,
- Identifica el máximo,
- Estima una línea base a partir de un lado del perfil,
- Calcula el nivel de media altura,
- Busca por interpolación los puntos de cruce a izquierda y derecha,
- Devuelve el valor FWHM junto con información auxiliar.

Este cálculo se aplica al final de cada barrido cuando la variable enfoque está activada. Su finalidad es proporcionar una medida objetiva de la anchura del perfil detectado, útil por

ejemplo en tareas de alineamiento, enfoque o caracterización de la respuesta espacial del sistema.

La Figura 42 muestra cómo el proceso de adquisición se organiza como un barrido secuencial sobre el plano espectral. Para cada posición, el sistema genera el patrón correspondiente en el DMD y lo proyecta sobre la escena. A continuación, se espera el tiempo de integración y se realiza la lectura del fotomultiplicador (PMT), obteniendo una medida de intensidad asociada a dicha posición. Cada punto medido se transmite mediante un mensaje PT que incluye la posición y el valor registrado. Este proceso se repite iterativamente mientras existan posiciones pendientes dentro del barrido. Una vez completado, el sistema envía la señal de finalización (END), indicando el cierre del ciclo de adquisición.

Figura 42. Esquema funcional del método de adquisición.



8.3.2. Nodo de visualización

Este nodo opera de forma desacoplada del sistema de adquisición, permitiendo la visualización en tiempo real sin interferir en la captura de datos. El script **PMT pc_server_plot.py** ejecutado en el PC, proporciona visualización y análisis en tiempo real. Su función principal es recibir por red los datos enviados por el *script ef.py* y representarlos gráficamente.

Servidor TCP

El servidor se implementa en la clase *TCPServerThread*. Este hilo:

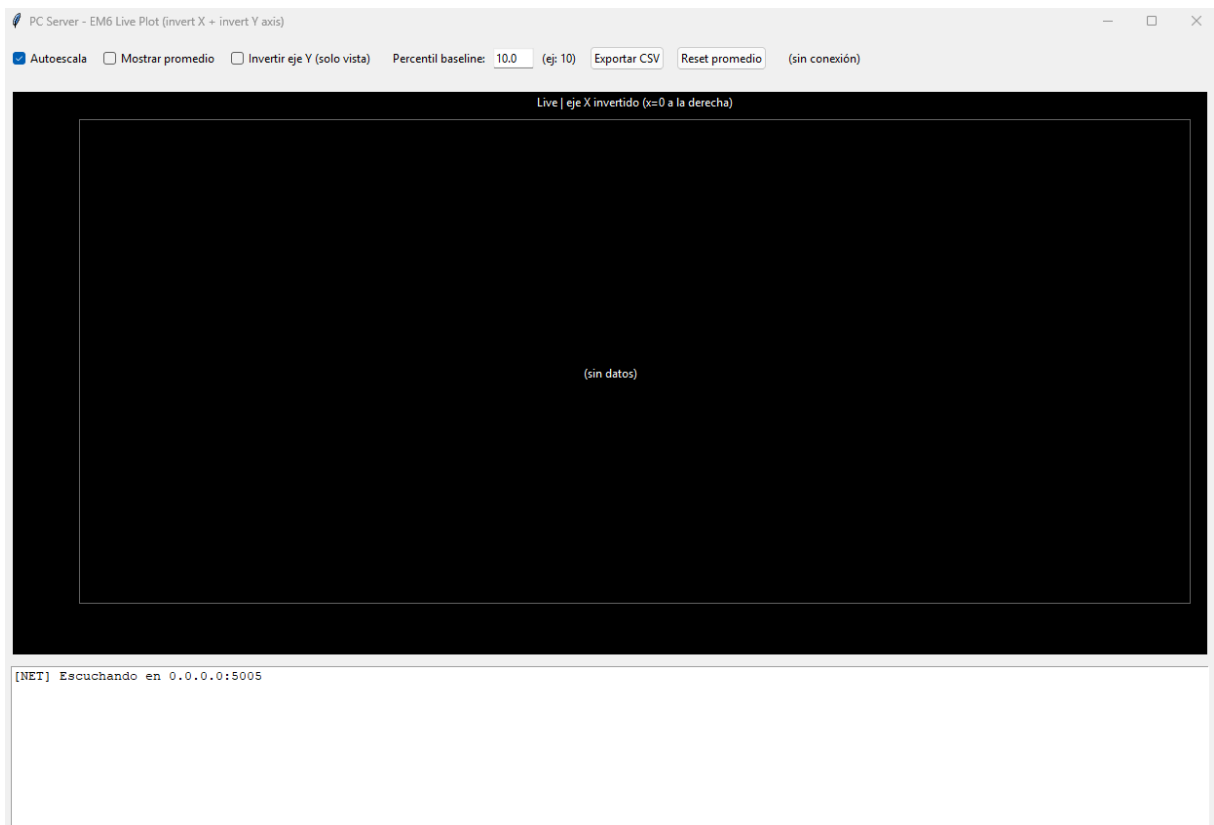
- Abre un socket TCP,
- Escucha conexiones entrantes en el puerto configurado,
- Acepta un cliente,
- Lee línea a línea los mensajes recibidos,
- Introduce en una cola los mensajes para que la interfaz gráfica los procese.

Este diseño desacopla la recepción de datos de la actualización de la interfaz. Gracias a ello, la comunicación de red no bloquea la representación gráfica.

Interfaz gráfica

La interfaz está construida con *tkinter*. La ventana principal incluye:

- Un área de representación basada en un Canvas.
- Controles para autoescala.
- Opción para mostrar el promedio.
- Opción para invertir el eje Y únicamente en la visualización.
- Selector del percentil usado para la línea base, botones para exportar datos y reiniciar el promedio, y un área de log para mensajes del sistema.

Figura 43. *Captura de la interfaz gráfica de visualización.*

La Figura 43 muestra la interfaz del software **PMT pc_server_plot.py**. El software opera como un servidor a la escucha a través del puerto TCP/IP 5005. Los mensajes recibidos se interpretan para su visualización en tiempo real.

La clase *SimplePlot* se encarga de dibujar la curva en el *Canvas*. El *script* calcula automáticamente:

- Límites de los ejes,
- *Ticks*,
- Etiquetas numéricas,
- Mapeo entre coordenadas físicas y píxeles de pantalla.

Un detalle relevante es que la representación invierte el eje X de forma visual, de modo que $x = 0$ aparece a la derecha. Esto no altera los datos ni su exportación; solo modifica la forma de visualizarlos para que el gráfico reproduzca mejor la geometría del barrido.

Procesamiento de mensajes recibidos

La clase App interpreta los mensajes de red en el método *handle_line*.

Cuando recibe BEGIN:

- Vacía la curva actual,
- Guarda la información descriptiva del barrido,
- Actualiza el estado de la interfaz.

Cuando recibe PT:

- Añade el nuevo punto a las listas xs e ys,
- Redibuja la curva inmediatamente.

Cuando recibe END:

- Marca el final del barrido,
- Actualiza el estado,
- Si la opción de promedio está activa, incorpora la curva actual al promedio acumulado.

De esta forma, el usuario puede observar la curva crecer punto a punto mientras el experimento se está realizando.

Promedio entre barridos y corrección de línea base

El *script* incorpora un mecanismo de promedio entre múltiples barridos. Para ello no promedia directamente los valores brutos, sino que primero calcula una línea base a partir de un percentil de la señal.

El procedimiento es el siguiente:

- Se ordenan los datos por posición.
- Se calcula una línea base mediante un percentil configurable, por ejemplo el percentil 10.
- A cada medida se le resta la línea base, obteniendo una señal corregida.
- Se acumulan las señales corregidas sobre una malla común de posiciones.
- Para la representación, se vuelve a sumar la última línea base estimada.

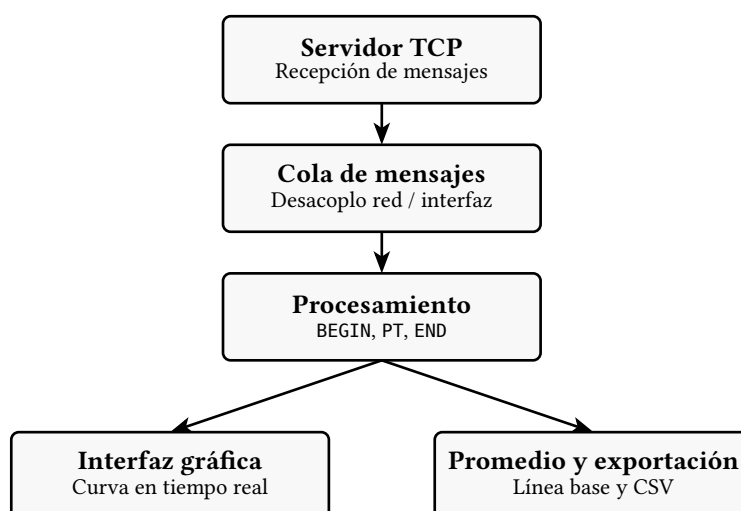
Este enfoque permite construir un promedio más robusto cuando existen *offsets* de fondo o fluctuaciones lentas del nivel base entre barridos.

Exportación de resultados

La aplicación permite exportar la curva actual en PMT.csv y, si existe, la curva promedio en PMT_avg.csv. Ambos ficheros se guardan ordenados por coordenada x ascendente, independientemente de cómo se visualicen en pantalla. Esto es importante porque separa claramente la representación gráfica de la integridad de los datos experimentales.

La Figura 44 muestra el esquema funcional del script: el programa recibe mensajes mediante un servidor TCP, los desacopla del refresco gráfico mediante una cola, procesa los eventos de cada barrido y actualiza la visualización en tiempo real, permitiendo además calcular promedios y exportar los resultados.

Figura 44. Esquema funcional script en PC.



8.4. Funcionamiento dual como fotómetro y espectrógrafo

La solución implementada integra en un único flujo la adquisición de la señal y la supervisión remota permitiendo observar los resultados en tiempo real sin interferir en el modo de adquisición. La solución adoptada simplifica la depuración del sistema al separar claramente el plano de control local y el plano de visualización remota y proporciona una base sólida para experimentos de alineamiento, perfilado espacial o medida fotométrica sincronizada con patrones proyectados. En conjunto, esta arquitectura convierte el sistema en una plataforma de medida activa, en la que el patrón óptico proyectado y la señal detectada por el PMT quedan sincronizados y registrados de forma estructurada.

Para que el desarrollo cubra los objetivos del TFG, es necesario que sea capaz de operar el instrumento tanto en modo fotómetro como en modo espectrógrafo. El software

desarrollado implementa los dos modos de funcionamiento dependiendo de la variable «*mode_photometer*»:

8.4.1. Modo espectrógrafo

En el modo espectrógrafo, la variable *mode_photometer* se fija a 0, activando un esquema de adquisición basado en el uso del DMD como selector espectral programable. En esta configuración, se define una franja vertical de micro espejos cuyo ancho es configurable por el usuario. Dicho ancho puede variar desde una única columna hasta un conjunto de varias columnas contiguas, lo que equivale a aplicar *binning* en la dirección espectral.

El procedimiento de adquisición consiste en desplazar secuencialmente esta franja a lo largo del eje de dispersión del espectro proyectado sobre el DMD. En cada posición, únicamente la radiación correspondiente a un intervalo espectral específico es reflejada hacia el detector, mientras que el PMT realiza una lectura sincronizada con dicha posición. De este modo, cada medida queda asociada a una región espectral bien definida.

Si se indexa cada posición del barrido mediante un entero n , la longitud de onda central correspondiente puede expresarse como

$$\lambda_n = \lambda_0 + n\Delta\lambda \quad (37)$$

donde λ_0 es la longitud de onda asociada a la posición inicial del barrido y $\Delta\lambda$ representa el incremento espectral entre posiciones consecutivas, determinado por la relación entre la dispersión óptica del sistema y la discretización espacial del DMD.

Cuando la franja activa tiene un ancho w (en número de columnas de micro espejos), cada lectura del PMT no corresponde a una longitud de onda puntual, sino a la señal integrada sobre un intervalo espectral dado por

$$\Delta\lambda_{\text{bin}} = w\Delta\lambda \quad (38)$$

Por tanto, el espectro se reconstruye como una sucesión de medidas discretas, donde cada punto representa la intensidad integrada en un intervalo espectral centrado en λ_n .

El parámetro w desempeña un papel fundamental en el rendimiento del sistema. Para $w = 1$, se obtiene la máxima resolución espectral permitida por el sistema, ya que cada medida corresponde al intervalo mínimo definido por una única columna de micro espejos. Sin embargo, al aumentar w , se introduce un *binning* espectral que reduce la resolución, pero incrementa la señal total recogida en cada medida.

Este compromiso resulta especialmente relevante en condiciones de baja señal, donde un mayor ancho de franja mejora la relación señal-ruido al integrar más fotones por lectura. Asimismo, el incremento de w permite reducir el número total de posiciones necesarias para cubrir un rango espectral dado, disminuyendo el tiempo total de barrido y aumentando la eficiencia de adquisición.

En consecuencia, el ajuste del ancho de franja w permite optimizar el sistema en función de las condiciones experimentales, estableciendo un equilibrio entre resolución espectral, sensibilidad, velocidad de adquisición y robustez frente al ruido.

8.4.2. Modo fotómetro

En el modo fotómetro, la variable `mode_photometer` se fija a 1, activando un esquema de adquisición basado en la selección de bandas espectrales discretas. A diferencia del modo espectrógrafo, en este caso no se realiza un barrido secuencial sobre el eje de dispersión, sino que se definen directamente uno o varios conjuntos de micro espejos que actúan como filtros espectrales.

Cada filtro se implementa como un subconjunto de columnas del DMD, previamente calibradas en longitud de onda. Estos subconjuntos no tienen por qué ser contiguos, sino que pueden construirse combinando diferentes regiones del espectro en función de las necesidades del experimento. De este modo, es posible tanto reproducir filtros fotométricos estándar (por ejemplo, sistemas tipo *Sloan*) como definir filtros personalizados optimizados para un objetivo observacional concreto.

Desde el punto de vista formal, cada filtro puede describirse como una función de transmisión discreta

$$T_{k(\lambda)}, \quad (39)$$

donde el índice k identifica el filtro. En el caso ideal, esta función toma valores unitarios en las regiones espectrales seleccionadas y nulos en el resto, pudiendo escribirse como

$$T_{k(\lambda)} = \sum_{i \in S_k} \Pi_{i(\lambda)}, \quad (40)$$

donde S_k es el conjunto de columnas de micro espejos asociadas al filtro k , y $\Pi_{i(\lambda)}$ representa la contribución espectral de la columna i , centrada en una longitud de onda λ_i con un ancho elemental $\Delta\lambda$.

La señal medida por el PMT para cada filtro puede expresarse entonces como

$$I_k = \int I(\lambda) T_{k(\lambda)} d\lambda \quad (41)$$

donde $I(\lambda)$ es la distribución espectral de la fuente. En la práctica, esta integral se aproxima mediante la suma discreta sobre las columnas activadas en el DMD.

El funcionamiento del sistema en este modo consiste en conmutar secuencialmente entre los distintos filtros definidos. En cada estado, el DMD activa el conjunto de columnas correspondiente a un filtro k , y el PMT realiza la medida integrada asociada a dicho filtro. Tras un tiempo de integración determinado, el sistema conmuta al siguiente filtro, repitiendo el proceso de forma cíclica.

En el desarrollo presentado se han implementado dos filtros, cuyas columnas han sido seleccionadas para aproximar las bandas fotométricas *Sloan g* y *r*, previa calibración de la correspondencia entre posición en el DMD y longitud de onda. No obstante, el sistema permite definir un número arbitrario de filtros y ajustar su forma espectral con gran flexibilidad.

Este modo de operación transforma el sistema en un fotómetro multibanda programable, en el que el DMD actúa como un generador dinámico de filtros espectrales. Frente al modo espectrógrafo, se pierde información espectral detallada, pero se gana en rapidez de adquisición y en relación señal-ruido, al integrar directamente sobre bandas de interés.

8.4.3. Modo mixto

El sistema permite un modo de operación mixto en el que, mediante configuración exclusivamente software, se combinan en una misma sesión medidas espectrométricas y fotométricas. Este modo explota la capacidad del DMD para reconfigurar dinámicamente los patrones de micro espejos, permitiendo alternar entre un barrido espectral y la selección de filtros discretos sin necesidad de modificaciones hardware.

Desde el punto de vista operativo, el modo mixto se implementa como una secuencia temporal de estados de adquisición. En unos estados, el sistema opera en modo espectrógrafo, realizando un barrido sobre el eje de dispersión y obteniendo una estimación de la distribución espectral $I(\lambda)$. En otros estados, el sistema conmuta a modo fotómetro, activando subconjuntos de columnas previamente definidos que implementan filtros $T_{k(\lambda)}$, obteniendo medidas integradas I_k .

La secuencia puede representarse de forma general como

$$\{M_1, M_2, \dots, M_N\}, \quad M_i \in \{\text{spec}, \text{phot}_k\} \quad (42)$$

donde cada estado M_i corresponde bien a una adquisición espectral o a una medida fotométrica en el filtro k .

La adquisición espectral proporciona muestras discretas de la forma

$$I(\lambda_n) = I(\lambda_0 + n * \Delta\lambda) \quad (43)$$

mientras que las medidas fotométricas se expresan como

$$I_k = \int I(\lambda) * T_{k(\lambda)} d\lambda \quad (44)$$

Una de las principales ventajas de este modo es que la planificación de la secuencia de adquisición no tiene por qué ser fija, sino que puede definirse dinámicamente mediante algoritmos que utilicen la información adquirida en tiempo real.

Por ejemplo, el sistema puede operar inicialmente en modo fotométrico, obteniendo valores I_k en distintos filtros. A partir de estos datos, pueden definirse criterios de decisión

que activen adquisiciones espectrales completas o parciales. Formalmente, puede considerarse una función de decisión

$$D : \{I_k\} \rightarrow A \quad (45)$$

donde A representa el conjunto de acciones posibles, tales como:

- realizar un barrido espectral completo
- realizar un barrido espectral parcial en un rango $[\lambda_a, \lambda_b]$
- mantener la adquisición fotométrica

De este modo, el sistema puede adaptar su comportamiento a las características de la señal observada. Por ejemplo, ante variaciones significativas en ciertos índices fotométricos, podría activarse automáticamente un barrido espectral para caracterizar con mayor detalle la distribución en longitud de onda.

Este enfoque, que en este TFG se plantea como opción conceptual pero no se ha implementado, convierte el sistema en un instrumento adaptable, capaz de optimizar en tiempo real el compromiso entre resolución espectral, velocidad de adquisición y relación señal-ruido. La combinación de ambos modos permite aprovechar las ventajas de cada uno: la rapidez y sensibilidad de la fotometría, junto con la capacidad de caracterización detallada del modo espectrógrafo.

8.5. Métodos avanzados de adquisición

El diseño del instrumento y su arquitectura de control permiten la implementación de técnicas avanzadas de adquisición y reconstrucción espectral que van más allá de los modos de operación descritos anteriormente. Si bien estas metodologías no han sido desarrolladas en el presente trabajo, se han tenido en cuenta en el diseño del sistema y se plantean como una línea natural de continuación para futuros desarrollos.

Entre estas técnicas destacan aquellas basadas en codificación espacial mediante el DMD, en las que, en lugar de seleccionar una única franja o conjunto de columnas, se proyectan patrones más complejos que modulan simultáneamente múltiples regiones espectrales.

Una de las aproximaciones más relevantes es la reconstrucción basada en matrices de Hadamard. En este enfoque, el DMD proyecta una secuencia de patrones binarios definidos por las filas de una matriz de Hadamard H , de modo que cada medida del PMT puede expresarse como

$$y_i = \sum_j H_{\{ij\}} x_j, \quad (46)$$

donde x_j representa la distribución espectral discretizada y y_i la señal medida en la proyección del patrón i . La reconstrucción del espectro completo se obtiene a partir del conjunto de medidas mediante la inversión de la transformación, aprovechando la ortogonalidad de las matrices de Hadamard.

Otra línea de especial interés es el uso de técnicas de **Compressive Sensing**, que permiten reconstruir señales a partir de un número de medidas inferior al número de grados de libertad del sistema, siempre que la señal sea dispersa o compresible en una base adecuada. En este caso, el proceso de adquisición puede modelarse como

$$y = \Phi x, \quad (47)$$

donde Φ es una matriz de medida definida por los patrones proyectados sobre el DMD. La reconstrucción de x se realiza resolviendo un problema de optimización del tipo

$$\min \|x\|_1 \quad \text{sueto a} \quad y = \Phi x, \quad (48)$$

o sus variantes en presencia de ruido.

La implementación de estas técnicas permitiría mejorar significativamente la eficiencia de adquisición, reduciendo el número de medidas necesarias para reconstruir el espectro, así como optimizar la relación señal-ruido en determinadas condiciones experimentales.

En consecuencia, el sistema propuesto no solo permite modos de operación de lectura secuencial, desarrollados y probados en este TFG, sino que constituye una plataforma flexible preparada para la implementación de técnicas avanzadas de reconstrucción espectral basadas en codificación y adquisición comprimida.

9. Conclusiones

Este trabajo ha permitido diseñar, implementar y validar de forma preliminar un instrumento óptico dual, basado en un Digital Micromirror Device (DMD) y un detector monopíxel, capaz de operar como espectrógrafo o como fotómetro mediante reconfiguración puramente software. La principal aportación del trabajo no reside únicamente en la construcción de un prototipo funcional, sino en haber demostrado que una arquitectura de instrumentación reconfigurable, inspirada en desarrollos avanzados de óptica computacional y detección monopíxel, puede trasladarse de forma realista al contexto de los telescopios pequeños.

Desde el punto de vista conceptual, el trabajo confirma que el uso del DMD como modulador espacial programable en el plano espectral constituye una alternativa sólida a los detectores bidimensionales convencionales cuando se busca versatilidad instrumental, bajo coste relativo y compatibilidad con detectores de muy alta sensibilidad. Esta arquitectura permite seleccionar dinámicamente regiones del espectro, implementar barridos secuenciales o definir bandas fotométricas sin necesidad de modificar la configuración óptico-mecánica del instrumento. En este sentido, el objetivo inicial de desarrollar un sistema con funcionamiento dual puede considerarse cumplido.

Desde el punto de vista del diseño óptico, la configuración crossed Czerny-Turner adoptada ha resultado adecuada para el propósito del trabajo. El modelado y la simulación han mostrado que la geometría elegida proporciona un plano focal prácticamente plano, baja distorsión y una huella del haz bien contenida dentro de la apertura útil. Estos resultados respaldan la validez del planteamiento teórico y justifican la selección de esta configuración como base del instrumento.

En el plano experimental, las pruebas realizadas permiten afirmar que el prototipo desarrollado no es únicamente una propuesta teórica, sino un sistema funcional. La verificación del DMD en banco de pruebas confirmó el comportamiento angular esperado de los micro espejos y su idoneidad como elemento modulador dentro del montaje. Posteriormente, las pruebas del prototipo con PMT demostraron la capacidad del sistema para adquirir espectros completos mediante barrido secuencial y para operar en modo fotométrico mediante conmutación entre bandas espectrales discretas, todo ello sin recurrir a movimientos mecánicos.

Los resultados obtenidos en modo espectrógrafo son especialmente relevantes. Tras el ajuste de enfoque y alineamiento, el sistema alcanzó una resolución espectral del orden de $R \approx 243$ en torno a 585 nm, con líneas bien definidas, buena estabilidad de la línea base y bajo nivel de ruido. Asimismo, el rango espectral cubierto en las medidas experimentales, aproximadamente entre 449 nm y 784 nm, confirma que el prototipo es capaz de trabajar sobre una fracción amplia del visible con prestaciones compatibles con aplicaciones experimentales y futuras extensiones astronómicas.

En modo fotómetro, el instrumento mostró una de sus características más prometedoras: la capacidad de alternar secuencialmente entre filtros espectrales programables sin ningún tipo de actuación mecánica. La demostración experimental con bandas equivalentes aproximadamente a *Sloan g* y *Sloan r* pone de manifiesto la flexibilidad de la arquitectura propuesta. Esta capacidad resulta particularmente atractiva para observaciones multibanda rápidas, instrumentación compacta y estrategias de observación donde la rapidez de conmutación y la simplicidad mecánica sean factores determinantes.

No obstante, las pruebas realizadas también permiten identificar con claridad las limitaciones actuales del sistema. La resolución efectiva depende de forma sensible del enfoque y del alineamiento angular entre rendija, espectro y DMD. Del mismo modo, la propia filosofía monopíxel implica una adquisición secuencial, con la consiguiente penalización temporal frente a un detector bidimensional. A ello se añade que la estabilidad de la señal, la calibración espectral precisa y la optimización de la eficiencia global del sistema siguen requiriendo un desarrollo adicional antes de considerar el instrumento preparado para uso astronómico sistemático en cielo.

En conjunto, el trabajo debe entenderse como una prueba de viabilidad tecnológica y metodológica. Se ha establecido una base sólida para el desarrollo de un instrumento astronómico reconfigurable basado en DMD y detección monopíxel, validando experimentalmente sus dos modos principales de funcionamiento en entorno de laboratorio. Aunque el prototipo requiere todavía mejoras en estabilidad, calibración, eficiencia global y validación en cielo, los resultados obtenidos confirman el interés de esta arquitectura como plataforma flexible y compacta para instrumentación óptica reconfigurable.

10. Líneas futuras

El prototipo desarrollado en este trabajo constituye una primera validación experimental de la arquitectura propuesta, pero deja abiertas varias líneas de evolución que permitirían transformar el sistema en un instrumento astronómico más completo y operativo.

Una primera línea de trabajo consiste en mejorar la estabilidad y calibración del instrumento. Para ello sería necesario optimizar el alineamiento entre la rendija, el espectro proyectado y el DMD, automatizar la calibración espectral, caracterizar la respuesta instrumental y evaluar de forma cuantitativa la eficiencia óptica global. Estas mejoras permitirían pasar de medidas instrumentales de laboratorio a observaciones calibradas y comparables con sistemas fotométricos o espectroscópicos estándar.

Una segunda línea de desarrollo es la implementación completa de técnicas avanzadas de adquisición y reconstrucción espectral. En este TFG se ha demostrado el funcionamiento mediante barrido secuencial, pero la arquitectura es compatible con codificación Hadamard y métodos de adquisición comprimida. Su implementación permitiría estudiar posibles mejoras en relación señal-ruido, tiempo de adquisición y selección óptima de regiones espectrales de interés.

Otra línea especialmente relevante es la explotación del modo mixto. En este modo, el instrumento podría combinar en una misma sesión medidas espectroscópicas y fotométricas, alternando entre espectros completos, bandas fotométricas definidas por software y regiones espectrales seleccionadas dinámicamente. Esta capacidad abriría la posibilidad de estrategias de observación adaptativas, en las que el patrón aplicado al DMD se modifique en función de la información obtenida en tiempo real.

Finalmente, resulta imprescindible realizar una validación astronómica en cielo. Esta fase permitiría evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de observación, incluyendo guiado, seeing, fondo de cielo, estabilidad temporal y respuesta frente a fuentes astronómicas de distinto brillo. Esta validación permitiría determinar con mayor precisión el campo de aplicación del instrumento en telescopios de pequeña o mediana apertura y establecer sus prestaciones reales como plataforma de instrumentación astronómica compacta y reconfigurable.

Anexo A. Protocolo de comunicación serie del PMT Sens-Tech EM6

Parámetros físicos de la comunicación

La comunicación serie presenta las siguientes características:

- Velocidad: **9600 baudios**
- Bits de datos: **8**
- Paridad: **ninguna**
- Bits de parada: **1**
- Control de flujo: **ninguno**
- Terminador de comando: <CR> (0x0D)

No se utiliza <LF>. Todos los comandos finalizan exclusivamente en <CR>.

Formato general de los comandos

Todos los comandos siguen el formato: <CMD> [payload] <CR>, donde:

- <CMD> es un carácter ASCII (1 byte),
- [payload] es opcional y depende del comando,
- <CR> es el byte 0x0D.

Los parámetros numéricos se transmiten como **bytes binarios**, no como ASCII.

Comando V: control de alta tensión (HV)

Comando para activar o desactivar la alta tensión del PMT: V <state> <CR>, donde: <state> adquiere los siguientes valores:

- 0x01 significa HV encendida

- 0x00 significa HV apagada

Ejemplos:

- Encender HV: 56 01 01 0D
- Apagar HV: 56 00 00 0D

El equipo responde habitualmente con el *token ASCII VA* como acuse de recibo.

Comando P: periodo de integración

Configura la duración de la ventana de integración: *P <period> <CR>*, donde:

- *<period>* es un byte sin signo (0x00–0xFF)
- La unidad es «centésimas de segundo» (10 ms)

Por tanto:

- P = 1: 10 ms
- P = 100: 1.00 s
- P = 255: 2.55 s (máximo)

Este comportamiento concuerda con la capacidad interna del contador y con el rango dinámico observado experimentalmente.

Comando R: número de lecturas

Define cuántas lecturas se devolverán al ejecutar una adquisición puntual, *R <count> <CR>*, donde:

- *<count>* es un byte sin signo (0x00–0xFF)
- Valor por defecto: 1

Este parámetro afecta directamente al comando S.

Comando S: adquisición puntual. Inicia una adquisición puntual y devuelve un número de lecturas igual al valor configurado mediante R: *S <CR>*. Cada lectura consiste en un valor binario de 4 bytes.

Comando C: adquisición continua. Inicia el modo de adquisición continua: `C <CR>`. El dispositivo comienza a transmitir valores de medida de forma continua hasta que se recibe un comando de parada.

Comando de parada de adquisición. La adquisición continua se detiene enviando únicamente el terminador:

Formato de los datos de medida. Los datos de medida se transmiten como palabras binarias de 4 bytes:

- Tipo: entero con signo de 32 bits
- Endianness: *big-endian*

b0 b1 b2 b3 (int32)

Experimentalmente se ha observado que:

- El byte más significativo raramente supera 0×02 ,
- El valor no siempre crece monótonamente con el flujo luminoso, lo que sugiere efectos de saturación, compresión o post-procesado interno.

Esto indica que el valor transmitido no es necesariamente el conteo bruto, sino un resultado condicionado por la electrónica y el firmware del equipo.

Comandos no caracterizados

Se han identificado los siguientes comandos adicionales:

- `E <CR>`
- `L <CR>`
- `O <CR>`
- `T [payload] <CR>`

Su formato ha sido identificado, pero no ha sido necesario determinar su funcionalidad para el uso previsto. Por tanto, no se incluyen interpretaciones funcionales en este documento.

Anexo B. Script de control del equipo

```
import os
import struct
import time
import socket

import pygame
from pygame.locals import *

import serial

# -----
# ANALISIS DE DATOS
# -----

import numpy as np

import numpy as np

def compute_fwhm(xs, ys,
                 baseline_side="right",
                 baseline_quantile=0.2,
                 min_baseline_pts=6,
                 smooth_win=3,
                 stop_on_rise=True):
    """
    FWHM robusto cuando solo un lado tiene baseline válido.
```

- Baseline estimado SOLO con puntos del lado elegido.
- Cruces a media altura por interpolación.
- Si el lado contaminado no baja a half antes de volver a subir, retorna None.

Retorna: (fwhm, x_left, x_right, x_peak, y_peak, baseline, half)

"""

```

xs = np.asarray(xs, float)
ys = np.asarray(ys, float)
m = np.isfinite(xs) & np.isfinite(ys)
xs, ys = xs[m], ys[m]
if xs.size < 7:
    return (None,) * 7

# ordenar por x
o = np.argsort(xs)
xs, ys = xs[o], ys[o]

# suavizado ligero solo para localizar pico (opcional)
if smooth_win and smooth_win > 1:
    w = int(smooth_win)
    if w % 2 == 0:
        w += 1
    pad = w // 2
    ypad = np.pad(ys, (pad, pad), mode="edge")
    ker = np.ones(w) / w
    ysm = np.convolve(ypad, ker, mode="valid")
else:
    ysm = ys

i_peak = int(np.argmax(ysm))
x_peak = float(xs[i_peak])
y_peak = float(ys[i_peak]) # pico real

# --- seleccionar puntos para baseline unilateral ---

```

```

    if baseline_side == "right":
        y_side = ys[i_peak+1:]
        x_side = xs[i_peak+1:]
    else:
        y_side = ys[:i_peak]
        x_side = xs[:i_peak]

    if y_side.size < min_baseline_pts:
        return (None,) * 7

    # Si hay otra subida rápida en el lado "contaminado", aquí no afecta
    # Baseline: tomar el 20% más bajo del lado limpio (robusto)
    k = max(min_baseline_pts, int(baseline_quantile * y_side.size))
    baseline = float(np.mean(np.partition(y_side, k-1)[:k]))

    half = baseline + 0.5 * (y_peak - baseline)
    if not (baseline < half < y_peak):
        return (None,) * 7

    # --- buscar cruce a media altura a derecha ---
    x_right = None
    for k in range(i_peak, len(xs)-1):
        y0, y1 = ys[k], ys[k+1]
        # cruce
        if (y0 >= half and y1 <= half) or (y0 <= half and y1 >= half):
            t = (half - y0) / (y1 - y0) if (y1 - y0) != 0 else 0.0
            x_right = float(xs[k] + t * (xs[k+1] - xs[k]))
            break

    # opcional: parar si vuelve a subir antes de cruzar (indicio de
    otro pico)
    if stop_on_rise and k > i_peak+1 and ys[k-1] > ys[k] < ys[k+1] and
    ys[k] > half:
        # mínimo local por encima de half => no habrá cruce limpio
        break

    # --- buscar cruce a media altura a izquierda ---

```

```

x_left = None
for k in range(i_peak, 0, -1):
    y1, y0 = ys[k], ys[k-1]
    if (y1 >= half and y0 <= half) or (y1 <= half and y0 >= half):
        t = (half - y0) / (y1 - y0) if (y1 - y0) != 0 else 0.0
        x_left = float(xs[k-1] + t * (xs[k] - xs[k-1]))
        break
    if stop_on_rise and k < i_peak-1 and ys[k+1] > ys[k] < ys[k-1] and
ys[k] > half:
        break

if x_left is None or x_right is None or x_right <= x_left:
    return (None,) * 7

fwhm = float(x_right - x_left)
return fwhm, x_left, x_right, x_peak, y_peak, baseline, half

# -----
# PMT / protocolo (EM6)
# -----
CR = 0x0D

def pmt_write(ser: serial.Serial, data: bytes) -> None:
    ser.write(data)

def pmt_read_exact(ser: serial.Serial, n: int, timeout_s: float) -> bytes:
    deadline = time.time() + timeout_s
    buf = bytearray()
    while len(buf) < n:
        chunk = ser.read(n - len(buf))
        if chunk:
            buf.extend(chunk)
        continue

```

```

        if time.time() > deadline:
            raise TimeoutError(f"Timeout leyendo {n} bytes (recibidos
{len(buf)})")
        return bytes(buf)

def pmt_hv(ser: serial.Serial, on: bool) -> None:
    # ON : V 01 01 CR
    # OFF: V 00 00 CR (confirmado por ti)
    pmt_write(ser, bytes([ord("V"), 0x01, 0x01 if on else 0x00, CR]))

def pmt_set_p_centisec(ser: serial.Serial, p: int) -> None:
    if not (0 <= p <= 255):
        raise ValueError("P fuera de rango (0..255)")
    pmt_write(ser, bytes([ord("P"), p, CR]))

def pmt_single_read_i32_be(ser: serial.Serial, timeout_s: float = 3.5) -
> int:
    pmt_write(ser, bytes([ord("S"), CR]))
    raw = pmt_read_exact(ser, 4, timeout_s=timeout_s)
    return struct.unpack(">i", raw)[0]

# -----
# TCP helpers
# -----

class TCPClient:
    def __init__(self, host: str, port: int, timeout_s: float = 5.0):
        self.host = host
        self.port = port
        self.timeout_s = timeout_s
        self.sock = None
        self.f = None

    def connect(self):
        self.sock = socket.create_connection((self.host, self.port),
timeout=self.timeout_s)

```

```

        self.sock.setsockopt(socket.IPPROTO_TCP, socket.TCP_NODELAY, 1)
        self.f = self.sock.makefile("w", encoding="utf-8", newline="\n")

    def send_line(self, line: str):
        # Enviar una línea completa
        self.f.write(line + "\n")
        self.f.flush()

    def close(self):
        try:
            if self.f:
                self.f.close()
        except Exception:
            pass
        try:
            if self.sock:
                self.sock.close()
        except Exception:
            pass
        self.f = None
        self.sock = None

# -----
# Gráficos (pygame)
# -----
def draw_bar(surface, color, x, y, height, width, tilt=0):
    pygame.draw.line(surface, color, (x, y), (x + tilt, y+height), width)

# -----
# Main
# -----
def main():
    # ---- Config red (PC servidor) ----
    PC_HOST = "192.168.1.132"    # <-- CAMBIA a la IP de tu PC
    PC_PORT = 5005               # <-- debe coincidir con el servidor del PC

```

```

# ---- Config serie (PMT) ----
PORT = "/dev/ttyUSB0"
BAUD = 9600

# ---- Config experimento ----
P_CENTISEC = 50      # 100 = 1.00 s
BAR_WIDTH = 10
TILT = 0
MIN_DT = 0.10        # mínimo entre posiciones (s)

BG = (0, 0, 0)
FG = (255, 255, 255)

# ---- Abrir serie ----
ser = serial.Serial(
    PORT,
    BAUD,
    bytesize=8,
    parity="N",
    stopbits=1,
    timeout=0.1,
)

# ---- TCP connect ----
client = TCPClient(PC_HOST, PC_PORT)

pygame.init()
screen = pygame.display.set_mode((0, 0), pygame.FULLSCREEN)
total_width, total_height = screen.get_size()
surface = pygame.Surface((total_width, total_height))

y=0
#y=200
height = total_height
#height = 20
start_x = total_width - BAR_WIDTH

```

```

#start_x=1600
#end_x=1000
end_x=0

no_stop=0
enfoque=1

mode_photometer = 0 # fotómetro o espectrógrafo
range_photometer = 0 # para alternar entre dos filtros en modo fotómetro

try:
    ser.reset_input_buffer()
    ser.reset_output_buffer()

    # PMT init
    pmt_hv(ser, True)
    time.sleep(2.0)
    ser.read(ser.in_waiting or 0)

    pmt_set_p_centisec(ser, P_CENTISEC)
    time.sleep(0.3)
    ser.read(ser.in_waiting or 0)

    # TCP init
    print(f"[NET] conectando a {PC_HOST}:{PC_PORT} ...")
    client.connect()
    print("[NET] conectado")

    running = True
    sweep_num = 0

    while running:

        if no_stop==0:
            # Espera explícita a INTRO antes de cada barrido (excepto el
            primero si quieres)

```

```

inp = input("\nPulsa INTRO para iniciar una vuelta (q + INTRO
para salir, s + INTRO para lectura continua): ")
if inp.strip().lower() == "q":
    break
if inp.strip().lower() == "s":
    no_stop=1

sweep_num += 1
sec_name = "medidas "+str(sweep_num)

xs = []
ys = []

# Notifica al PC inicio de vuelta
epoch_ms = int(time.time() * 1000)
client.send_line(f"BEGIN,{sec_name},{epoch_ms},{P_CENTISEC},
{BAR_WIDTH}")

# Barrido
x = start_x
while True:
    # Eventos pygame
    for event in pygame.event.get():
        if event.type == QUIT or (event.type == KEYDOWN and
event.key == K_ESCAPE):
            running = False
        if not running:
            break

    if not mode_photometer:
        # Dibuja barra modo barrido
        surface.fill(BG)
        draw_bar(surface, FG, x, y, height, BAR_WIDTH, tilt=TILT)
        screen.blit(surface, (0, 0))
        pygame.display.flip()
    else:

```

```

        # Dibuja barra modo fotómetro
        surface.fill(BG)
        if range_photometer==1:
            # sloan g
            draw_bar(surface, FG, 0, 0, total_height, 570)
            range_photometer = 0
        else:
            # sloan r
            draw_bar(surface, FG, 570, 0, total_height, 1420)
            range_photometer = 1
        screen.blit(surface, (0,0))
        pygame.display.flip()

dt_int = P_CENTISEC / 100.0
if dt_int < MIN_DT:
    time.sleep(MIN_DT - dt_int)

# Lee medida
try:
    val = pmt_single_read_i32_be(ser, timeout_s=max(1.0,
dt_int + 2.0))

    # TCP
    client.send_line(f"PT,{x},{val}")
    print(f"x={x:4d}  val={val}")
except TimeoutError as e:
    client.send_line(f"PT,{x},NaN")
    print(f"x={x:4d}  [TIMEOUT] {e}")

# Analisis
if enfoque==1:
    xs.append(x)
    ys.append(val)

# Siguiente
x -= BAR_WIDTH

```

```

        if x <= end_x:
            break

# Fin de vuelta
try:
    csv_file.close()
except Exception:
    pass

client.send_line(f"END,{sec_name}")
print("[INFO] vuelta terminada (esperando INTRO para la siguiente)")

if enfoque==1:
    fwhm = compute_fwhm(xs, ys)
    print("FWHM =", fwhm)

finally:
    # HV OFF
    try:
        pmt_hv(ser, False)
    except Exception:
        pass

    try:
        ser.close()
    except Exception:
        pass

    try:
        client.close()
    except Exception:
        pass

    pygame.quit()

if __name__ == "__main__":
    main()

```

Bibliografía

- Ansys Inc. (2025). *Ansys Zemax OpticStudio User Guide*.
- BASS Project. (2026). *BassSpectro@groups.io*. <https://groups.io/g/BassSpectro>
- Bronzi, D., & others. (2014). SPAD-based single-photon counting: trends, challenges and applications. *Sensors*, 14(1), 323-343. <https://doi.org/10.3390/s140100323>
- Buil, C. (2019). *UVEX Spectrograph Project*.
- Candès, E. J., Romberg, J., & Tao, T. (2006). Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(2), 489-509. <https://doi.org/10.1109/TIT.2005.862083>
- Cimatti, A., & others. (2009). *SPACE: a mission concept for spectroscopic cosmology*.
- Czerny, M., & Turner, A. F. (1930). Ein neues Prinzip für monochromatoren. *Zeitschrift für Physik*, 61, 792-797. <https://doi.org/10.1007/BF01340245>
- Donoho, D. L. (2006). Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4), 1289-1306. <https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582>
- Duarte, M. F., Davenport, M. A., Takhar, D., Laska, J. N., Sun, T., Kelly, K. F., & Baraniuk, R. G. (2008). Single-pixel imaging via compressive sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(2), 83-91. <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.914730>
- Dudley, D., Duncan, W. M., & Slaughter, J. (2003). Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications. *Proceedings of SPIE*, 4985, 14-25. <https://doi.org/10.1117/12.479702>

- Edmund Optics. (s. f.). *64-402: 150 Grooves/mm, Bare Aluminum, Ruled Reflective Diffraction Grating*. Recuperado 4 de junio de 2026, de <https://www.edmundoptics.com/>
- Efron, U. (ed.). (1995). *Spatial Light Modulator Technology: Materials, Devices, and Applications*.
- Eisaman, M. D., Fan, J., Migdall, A., & Polyakov, S. V. (2011). Invited Review Article: Single-photon sources and detectors. *Review of Scientific Instruments*, 82(7), 71101. <https://doi.org/10.1063/1.3610677>
- Eppeldauer, G. P. (1991). Silicon photodiode radiometers for the 200 nm to 400 nm spectral range. *Applied Optics*, 30(31), 4665-4670. <https://doi.org/10.1364/AO.30.004665>
- Fellgett, P. B. (1969). The multiplex advantage. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 2(12), 1102-1108.
- Ferruit, P., & others. (2012). The Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec) on the James Webb Space Telescope. *Proceedings of SPIE*, 8442.
- Fossum, E. R. (1997). CMOS Active Pixel Image Sensors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 395(3), 291-297. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00812-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00812-7)
- Gibson, G. M., Johnson, S. D., & Padgett, M. J. (2020). Single-pixel imaging 12 years on: a review. *Optics Express*, 28(19), 28190-28208. <https://doi.org/10.1364/OE.403195>
- Hamamatsu Photonics. (2007). *Photomultiplier Tubes: Basics and Applications*. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf
- Hamamatsu Photonics. (2019). *Avalanche Photodiodes (APD) Technical Information*.
- Hamamatsu Photonics. (2023). *Photomultiplier Tubes: Basics and Applications*.
- Harwit, M., & Sloane, N. J. A. (1979). *Hadamard Transform Optics*.
- Lee, B. (2018). *Introduction to 12 Degree Orthogonal Digital Micromirror Devices (DMDs). DLPA8B*. <https://www.ti.com/lit/an/dlpa008b/dlpa008b.pdf>
- Loewen, E. G., & Popov, E. (1997). *Diffraction Gratings and Applications*.

- MacKenty, J. W., Greenhouse, M. A., Green, R. F., Ohl, R. G., Winsor, R. S., Smith, W. S., Beaton, R. L., Muench, A. A., & Trowbridge, C. D. (2003). *IRMOS: an infrared multi-object spectrometer using a MEMS micro-mirror array*. 4841. <https://doi.org/10.1117/12.461484>
- Meyer, R. D., Kearney, K. J., Ninkov, Z., Cotton, C. T., Hammond, P., & Statt, B. D. (2004). *RITMOS: a micromirror-based multi-object spectrometer*. 5492, 200-219. <https://doi.org/10.1117/12.549897>
- MKS Instruments. (2020). *Diffraction Grating Handbook*.
- O'Shea, D. C., & Bentley, J. L. (2024). *Designing Optics Using Zemax OpticStudio*. <https://doi.org/10.1117/3.100004>
- Schroeder, D. J. (2000). *Astronomical Optics*.
- Texas Instruments. (2018). *DLP Technology Reliability and Lifetime*.
- Wang, C., Chen, H., Zhang, Y., Chen, S., Guo, P., & Wang, L. (2019). Optical design of a crossed Czerny–Turner spectrometer with a linear array photomultiplier tube. *Optics Express*, 27(25), 36405-36418. <https://doi.org/10.1364/OE.27.036405>