

# Building a spectrometer with a 3D printer and a webcam. Almost all optics in a single experiment.

## Construyendo un espectrómetro con una impresora 3D y una webcam. Casi toda la óptica en un solo experimento.

E. Jan<sup>1</sup>, F. Zaldivar Escola<sup>1,3</sup>, N. Mingolo<sup>1\*</sup>, O. E. Martínez<sup>2,3</sup>

1. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Lab. de Haces Dirigidos, Buenos Aires, Argentina.

2. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Lab. de Fotónica, IIBM, Buenos Aires, Argentina.

3. CONICET. Buenos Aires, Argentina.

(\*) E-mail: [nmingol@fi.uba.ar](mailto:nmingol@fi.uba.ar)

Received: 15/12/2022

Accepted: 05/06/2023

DOI: 10.7149/OPA.56.2.51124

### ABSTRACT:

Exposing the student to the challenge of designing an instrument throughout an entire semester course is proposed. The spectrometer has the virtue of involving almost all the concepts that appear in an optics course. The flexibility of the design allows handling different alternatives: improving the resolution by changing the observed order at the expense of loss of intensity, changing the distance and width of the slit, the grating input angle, etc. Learning includes testing the reliability of the instrument and understanding the importance of calibration (a practice that is necessary to acquire in the use of any instrument). To give versatility to the design, the use of a 3D printer has been chosen for this development. A webcam was selected for the detection not only due to its low cost, but mainly because it forces the user to look for signal processing mechanisms in order to compensate for distortions such as aberrations, spectral filters, and low dynamic range.

**Key words:** Spectrometer, Instrument design, teaching

### RESUMEN:

Se propone exponer al alumno al desafío de diseñar un instrumento a lo largo de todo un curso semestral. El espectrómetro tiene la virtud de involucrar casi todos los conceptos que aparecen en un curso de óptica. La flexibilidad del diseño permite manejar distintas alternativas: mejorar la resolución cambiando el orden observado a expensas de pérdida de intensidad, cambiar la distancia y ancho de la ranura, el ángulo de incidencia en la red, etc. El aprendizaje incluye testear la confiabilidad del instrumento y entender la importancia de la calibración (práctica que es necesario adquirir en el uso de cualquier instrumento). Para este desarrollo se ha elegido el uso de una impresora 3D para darle versatilidad al diseño. La detección con una cámara web aporta por un lado el bajo costo pero además fuerza a buscar mecanismos de procesamiento de la señal de modo de compensar distorsiones propias de dicho dispositivo como aberraciones, filtros espectrales y bajo rango dinámico.

**Palabras clave:** Espectrómetro, diseño de instrumentos, enseñanza.



---

## REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] E. K. Grasse, M. H. Torcasio, A. W. Smith, "Teaching UV-Vis Spectroscopy with a 3D-Printable Smartphone Spectrophotometer," *Journal of Chemical Education* 93 (1), 146-151 (2016).
- [2] E. P. Heideman, "Film-Canister Spectroscope", *TPT*, Vol. 28, #5, May 1990, p. 343
- [3] A. Scheeline, "Teaching, Learning, and Using Spectroscopy with Commercial, Off-the-Shelf Technology," *Appl. Spectrosc.* 64, 256A-268A (2010)
- [4] M. Farooq Wahab Estimating the Wavelength of Sodium Emission in Flame — The Easy Way *The Physics Teacher* 47, 367 (2009)
- [5] F. Wakabayashi, K. Hamada, "A DVD spectroscope: A simple, high-resolution classroom spectroscope," *J. Chem. Educ.* 83, 56-58 (2006).
- [6] F. Wakabayashi, "Resolving Spectral Lines with a Periscope-Type DVD Spectroscope," *Journal of Chemical Education*, v85 n6 p849-853 (2008)
- [7] E. Widiatmoko, Widayani, M. Budiman, M. Abdullah, Khairurrijal, "A simple spectrophotometer using common materials and a digital camera," *IOP Publishing Ltd Physics Education*, Volume 46, Number 3 (2011)
- [8] M.A. Lema, E.M. Aljinovic, M.E. Lozano, "Using a Homemade Spectrophotometer in Teaching Biosciences". *Biochem. Mol. Biol. Educ.*, 30 (2), 106-110 (2002)
- [9] S. J. Tavener, "Build your own spectrophotometer," *Education in Chemistry*; Royal Society of Chemistry, 2007
- [10] D. R. Albert, M. A. Todt, H. F. Davis, "A Low-Cost Quantitative Absorption Spectrophotometer," *J. Chem. Educ.*, 89 (11), 1432-1435 (2012)
- [11] E. Kehoe; R.L. Penn, "Introducing Colorimetric Analysis with Camera Phones and Digital Cameras: An Activity for High School or General Chemistry" *J. Chem. Educ.*, 90 (9), 1191-1195 (2013).
- [12] M. L. Kovarik, J. R. Clapis, K. A. Romano-Pringle "Review of Student-Built Spectroscopy Instrumentation Projects," *Journal of Chemical Education*, 97 (8), 2185-2195 (2020)
- [13] D. C. Christodouleas, A. Nemiroski, A. A. Kumar, G. M. Whitesides "Broadly Available Imaging Devices Enable High-Quality Low-Cost Photometry Analytical Chemistry" 87 (18), 9170-9178, (2015)
- [14] L. G. Pap, "An Inexpensive 3D-Printable Do-It-Yourself Visible Spectrophotometer for Online, Hybrid, and Classroom-Based Learning," *Journal of Chemical Education*, 98 (8) , 2584-2591, (2021).
- [15] R. Bogucki, M. Greggila, P. Mallory, J. Feng, K. Siman, B. Khakipoor, H. King, A.W. Smith. "A 3D-Printable Dual Beam Spectrophotometer with Multiplatform Smartphone Adaptor," *Journal of Chemical Education*, 96 (7), 1527-1531. (2019)
- [16] M. Calcabrini, D. Onna. "Exploring the Gel State: Optical Determination of Gelation Times and Transport Properties of Gels with an Inexpensive 3D-Printed Spectrophotometer," *Journal of Chemical Education*, 96 (1) , 116-123. (2019)
- [17] E. J. Davis, M. Jones, D. A. Thiel, S. Pauls "Using Open-Source, 3D Printable Optical Hardware To Enhance Student Learning in the Instrumental Analysis Laboratory," *Journal of Chemical Education* 95 (4), 672-677 (2018)
- [18] Los planos se pueden obtener de <https://github.com/EmilianoJan/Espectrometro/tree/main/Piezas>
- [19] Más planos disponibles en <https://www.thorlabs.com/>
- [20] Los programas están disponibles en <https://github.com/EmilianoJan/Espectrometro/tree/main/Codigos>
- [21] [https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/element\\_name.htm](https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/element_name.htm)
- [22] [https://www.usna.edu/Users/physics/vanhoy/files/SP425/LabDocs/Ocean%20Optics%202000/SpectraSuite/070131\\_1347%20R/documentation/Light%20Sources/hg1.pdf](https://www.usna.edu/Users/physics/vanhoy/files/SP425/LabDocs/Ocean%20Optics%202000/SpectraSuite/070131_1347%20R/documentation/Light%20Sources/hg1.pdf)
- [23] <https://www.lamparayluz.es/todo-sobre-iluminacion/que-son-los-grados-kelvin#:~:text=Bombilla%20hal%C3%B3gena%3A%202700%20%2D%203000%20K,del%20d%C3%ADa%3A%205500%20%2D%207000%20K>



## 1. Introducción

Se han publicado un número importante de trabajos donde se encaran distintos diseños de espectrómetros y espectrofotómetros de bajo costo para estudiantes de distintos niveles. Algunos de ellos proponen diseños muy simples fabricados con elementos comunes como cartones o impresiones 3D y usando la cámara del celular como detector [1-12] muchas veces orientados a estudiantes preuniversitarios o incluso de escuelas primarias. Este tipo de instrumentos dan un panorama muy rápido al alumno y permite una fabricación casi inmediata, pero deja poco margen para una medición cuantitativa y menos aún margen para la exploración de los parámetros de diseño, no permitiendo la profundización de una amplia gama de conceptos de óptica. Otros equipos un poco más sofisticados apuntan al diseño de un espectrofotómetro o fluorímetro para cursos avanzados de química, poniendo el énfasis en la práctica específica que se desea desarrollar relacionada con química cuantitativa [13-16]. Hay quienes presentan opciones cercanas a lo propuesto en este trabajo, esto es el uso de impresoras 3D y cámaras web como sensores para el diseño del instrumento [17]. Pero en general todos estos trabajos anteriores tienen objetivos distintos a los planteados en nuestra propuesta y que por ello requiere de algunas particularidades. Estos trabajos previos están dirigidos a una demostración en clase o una práctica de una sesión de varias horas y en la mayoría de ellos el espectrómetro ya está construido y es presentado a los estudiantes. Aun cuando el estudiante deba construirlo, ya tiene los parámetros de diseño provistos y solo debe ejecutar el proyecto. Lo que proponemos en este trabajo es el desarrollo de una experiencia de laboratorio de múltiples clases a lo largo de todo el semestre en el que se provee al grupo de alumnos de las herramientas necesarias para diseñar y construir el instrumento. Esto incluye la comprensión y caracterización de cada una de las componentes, lo que barre casi todos los aspectos de un curso avanzado de óptica. Por ejemplo debe entender el rol que cumple la ranura de entrada y porqué elegir una dimensión determinada, que afecta tanto el campo visual del detector, como la resolución espectral del instrumento. Debe caracterizar la óptica de la cámara, lo que lo lleva a entender la óptica geométrica para determinar distancias focales y campos visuales, pero además debe entender las limitaciones de este formalismo y cuando debe introducir el carácter ondulatorio de la luz y el fenómeno de difracción. Debe incluir atenuadores de distinta índole como polarizadores o difusores. Debe comprender la red de difracción. Aparecen múltiples fuentes como lámparas gaseosas, leds, lámparas incandescentes, láseres, fluorescencia y esto abre la puerta a discutir los distintos mecanismos de emisión. Además, algo que es particularmente demandante y complejo es la caracterización del sensor, que vuelve cuantitativa la medición. Los conceptos de linealidad, rango dinámico, calibración espectral y calibración en intensidad, ruido de la medición aparecen naturalmente y deben ser comprendidos. Finalmente, pero no menos relevante, el instrumento permite discutir conceptos de resolución, exactitud y precisión que son transversales a todas las ciencias exactas y las ingenierías.

Muchas de las actividades propuestas pueden ser desarrolladas en paralelo por distintos grupos de estudiantes, o algunas ser presentadas por el docente en clase para su discusión, dependiendo de la organización particular del curso y la disponibilidad y carga horaria de los laboratorios. Las etapas del trabajo son planteo del problema, la caracterización de las componentes (lentes, ranuras, cámaras, red de difracción, etc.), diseño y armado del equipo (donde se propone una posible solución), la calibración en longitudes de onda, mediciones espectrales y finalmente la calibración en intensidad a partir de un cuerpo negro.

Este trabajo pretende no solo ser una guía para profesores para organizar el laboratorio sino también para docentes auxiliares muchas veces no expertos en el área e incluso hay que prever que siendo una publicación de acceso abierto también será leído por estudiantes. Algunas secciones, como la caracterización de la cámara puede ser utilizada por estudiantes de grado o incluso por profesionales no expertos que requieren del uso de cámaras para sus experimentos. Es por ello que muchas secciones pueden parecer innecesarias para un experto, pero serán imprescindibles para los otros actores a quienes está dirigido el trabajo.

## 2. Planteo de objetivo e introducción fenomenológica

### 2.a. Presentación del problema

- Distintas fuentes tienen distintos colores (longitudes de onda) y los materiales absorben o emiten en distintos colores. Se desea poder medir en forma cuantitativa para extraer información de las fuentes y los materiales.

- Se necesita un equipo que mida la intensidad en función de la longitud de onda.

: Para ello se necesita

- 1- alguna manera de separar los colores (arco iris)
- 2- alguna manera de medir en cada color (detector)

- Se presenta fenomenológicamente la red de difracción si el grupo aún no ha estudiado el tema. Se muestra con una red por transmisión:

1- Que distintos colores son separados a ángulos distintos. Por ejemplo utilizando punteros láser de distinto color se visualiza un punto central que coincide con la posición del punto observado sin la red y se ven puntos a los costados, los cuales aparecen más alejados cuanto mayor es la longitud de onda.

2- Cuando se utiliza una fuente no tan bien colimada (una linterna, un led, un láser que tenga posibilidad de desenfocar) se ve que la mancha central es más difusa y lo mismo ocurre para los colores no tan bien separados.

3- Si se intercala una óptica que enfoca por ejemplo el LED se ve una mancha central más nítida y los colores mejor separados.

Quedan motivados los problemas centrales de diseñar el instrumento que se puede discutir con los alumnos en conjunto o por grupo:

- 1- ¿Cómo hacer que el enfoque no dependa de la fuente, que el instrumento sirva para cualquier fuente? Esto lleva como propuesta el uso de una abertura pequeña y hacer imagen de la misma en el detector, de modo de independizarnos de la colimación de la fuente.
- 2- ¿Qué detector usar que registre para distintas posiciones? Aquí surgirá usar un detector móvil como por ejemplo un goniómetro (complicación mecánica) o utilizar un arreglo de detectores que registre simultáneamente varias posiciones (cámara).
- 3- ¿Cómo manejar que hay fuentes más brillantes y otras más tenues? Que el detector no se "encandile" ni deje de ver. Discutir formas de atenuar como intercalar elementos absorbentes, dispersantes o polarizadores.

## 2.b. Diseño esquemático. Comprender un diseño preliminar semicuantitativamente

A partir de lo discutido se les presenta un diseño esquemático (Fig.1) de cómo podría ser un espectrómetro. La tarea es entonces la de identificar parámetros de diseño relevantes (rendija, distancias, distancia focal, campo visual, tamaño de pixel y de detector de la cámara). Esta discusión previa semicuantitativa permitirá valorar las componentes disponibles y sopesar posibles soluciones al problema de diseño. Es bueno que quede claro que a diferencia de los problemas típicos de guías de trabajo práctico en que todas las variables han sido definidas y la solución es única, para este diseño hay una enorme variedad de soluciones posibles cada una con sus ventajas, desventajas y compromisos. Es bueno que cada grupo llegue a variantes distintas para poder discutir estos aspectos.

Lo que sigue entonces es conocer en detalle y caracterizar las componentes disponibles, y de ser conveniente, procurarse de componentes alternativos.

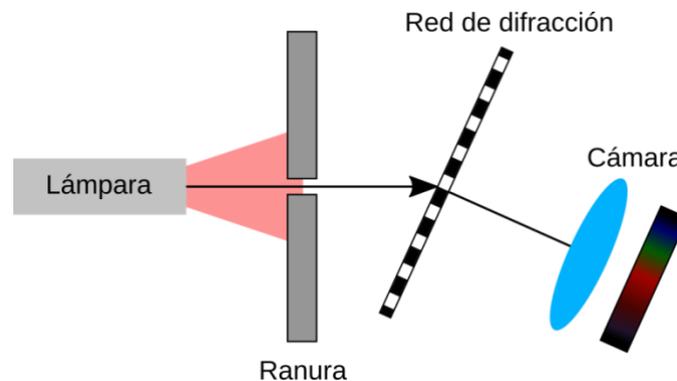


Fig.1. Esquema básico para la construcción de un espectrómetro.

## 2.c. Presentación de la infraestructura y componentes

Se presentan las distintas categorías de componentes:

- 1- Fuentes de luz
- 2- Detector: cámara web o similar
- 3- Red de difracción (nosotros utilizamos redes holográficas marca Edmund de 1000 líneas/mm y 500 líneas/mm)
- 4- Componentes optomecánicos para armado de sistema: componentes simil *cage system* de la empresa Thorlabs®, las cuales permiten una mecánica modular y pueden ser fabricadas con impresora 3D y varillas de latón o acero de 6mm de diámetro (o alternativamente de  $\frac{1}{4}$ ""). Ver Fig. 2 y para más planos ver [18,19]
- 5- Polarizadores, papeles difusores.
- 6- Rendijas o elementos para fabricarlas.

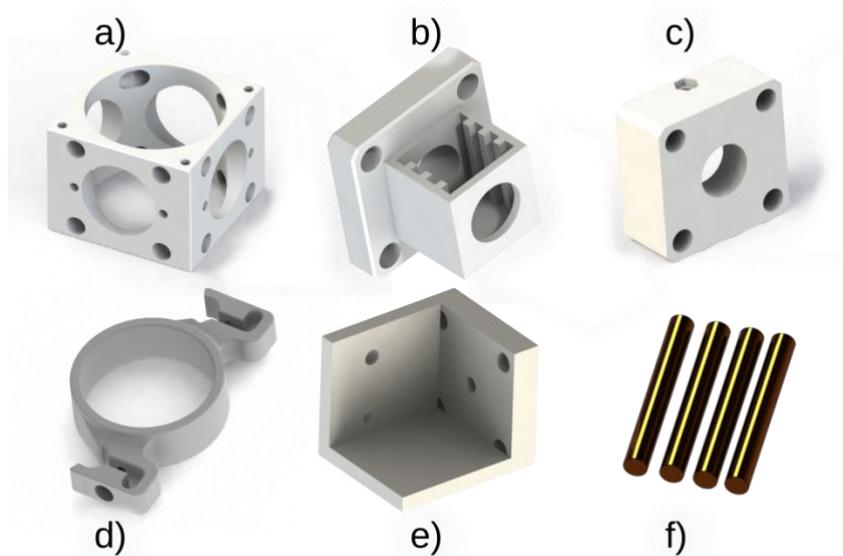


Fig. 2. Algunos componentes optomecánicos: a) cubos, b) portafiltras, c) soporte cage system para puntero láser, d) soporte diagonal fácil de intercalar, e) soporte de LED o fotodiodo f) varillas

## 3. Caracterizar las componentes y su rol en el instrumento

### 3. a. Efecto de la ranura

La ranura puede ser recordada en el curso si se vio con anterioridad o se la presenta en forma fenomenológica. Esta inversión del orden presentando un fenómeno antes de modelarlo desde primeros principios permite una ida y vuelta que refuerza los conceptos y hace más fácil la vinculación del modelo en el papel con la realidad.

Para la construcción de las ranuras utilizamos hojas de afeitar ( $\frac{1}{4}$  de hoja por lado) adheridas a un anillo de aluminio de 6mm de espesor y 25mm de diámetro que puede ser montado en algunos de los soportes tipo "cage". El diámetro del agujero pasante del anillo determina la altura  $h$  de la rendija. Un primer trozo de hoja es pegado centrado con cemento de contacto (no utilizar cianocrilatos) y una vez seco se coloca una gotita de cemento en el anillo y se arrima el segundo trozo. El tiempo de secado del cemento permite mover la hoja y ajustar el ancho mientras se observa a trasluz, en un microscopio o mirando la figura de difracción utilizando los montajes descritos. En la Fig.3(a) se muestra una rendija terminada.

Se muestra el fenómeno de difracción utilizando un puntero láser y proyectando sobre una pantalla. Se identifica la figura, con mínimos y máximos y se puede observar la distancia entre mínimos en función de la distancia a la pantalla como se muestra en la Fig. 3(b). Si distintos grupos fabricaron distintas rendijas se puede ver como depende el fenómeno del ancho de la rendija (que puede ser observado o medido en una lupa o microscopio). Eventualmente, de no disponerse del tiempo necesario, se lo presenta con rendijas ya fabricadas y fotografías de las mismas.

Se puede determinar que la distancia angular entre mínimos no depende de la distancia de la pantalla ni de la altura de la misma y sí depende del ancho de la rendija y se les presenta la ecuación que luego derivarán en clase en su momento para la posición de los mínimos:

$$\text{sen}(\theta_n) = \frac{n\lambda}{b} \quad (1)$$

Donde  $\theta_n$  son las posiciones angulares de los mínimos de difracción,  $b$  el ancho de la ranura y  $\lambda$  la longitud de onda del haz con que se la ilumina.

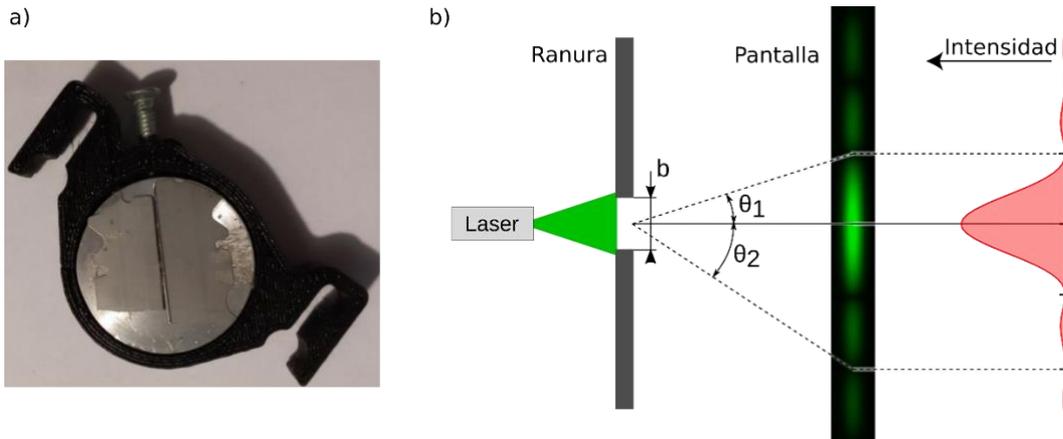


Fig. 3. a) Foto de una rendija armada. b) Esquema básico de difracción por una ranura de ancho  $b$ . Se indican las posiciones angulares de dos mínimos de difracción. Para el ejemplo primer orden y segundo orden

Se puede plantear la pregunta de qué pasa si la incidencia no es normal. Pueden hacer el experimento y ver que la posición del máximo y toda la figura se corre en consecuencia.

Aceptada esta expresión se puede utilizar para medir las ranuras fabricadas. Para lo que sigue nosotros utilizamos una ranura con  $b=73 \mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$ , de una altura  $h=13 \text{ mm}$ . Con esta ranura se obtiene un ancho angular entre mínimos de  $0,83^\circ$  para  $\lambda= 532\text{nm}$ .

### 3. b. La red de difracción

Se presenta o se recuerda la ecuación de la red identificando los parámetros en la Fig.4 esquemática, así como la ecuación de la red:

$$\text{sen}(\theta) - \text{sen}(\varphi) = \frac{n\lambda}{d} \quad (2)$$

Se discute el significado de esta ecuación y se la relaciona con las observaciones hechas al inicio en que se presentó el fenómeno. El manejo propuesto para esta etapa es similar a la descrita para la ranura.

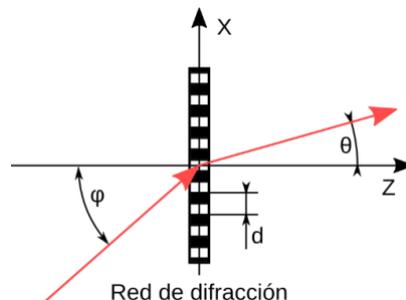


Fig. 4. Esquema mostrando la geometría para un experimento en que la incidencia del haz a la red de difracción no es normal ( $\varphi$  es el ángulo de incidencia y  $\theta$  es el haz emergente, ambas medidas respecto del eje óptico  $z$ ). Con  $d$  el parámetro de la red de difracción.

### 3. c. Caracterizar la cámara:

Una de las etapas del desarrollo del equipo que debe llevar adelante el alumno es la caracterización de la cámara (detector), constituida por el sensor propiamente dicho y la lente formadora de imagen. Nosotros utilizamos una cámara web disponible en nuestro laboratorio pero de necesitar comprar una unidad nueva puede ser conveniente revisar la amplia gama de módulos de cámaras con conexión USB disponibles en el mercado que al estar montadas sin carcasa puede ser más fácilmente incorporadas al equipo en construcción y su costo es del orden de los 10USD. Nuestra cámara es "GeniusFaceCam322" de 640x480píxeles, y al no disponer de las especificaciones técnicas de la marca, se midió el tamaño de pixel arrojando un valor de  $3.34 \pm 0.6 \mu\text{m}$ . Para ello se desarmó una cámara gemela y se midió el área activa de la cámara. Se le sacó el filtro IR ya que limita al instrumento. Discutir con los alumnos qué función cumple este filtro. Este estudio del chip es particularmente útil para que el alumno comprenda mejor como es el dispositivo del que dispone, por lo que es útil disponer de una cámara de sacrificio adicional, que puede incluso ser inspeccionada bajo un microscopio.

Una ventaja que encontramos en este modelo antiguo es que posee enfoque manual, lo que permite controlar fácilmente y de manera permanente la posición del foco del sistema.

#### 3. c-1. El programa de control

La mayoría de los programas disponibles para manejar cámaras de este tipo tienen muchos ajustes automáticos de distintos parámetros de control de la cámara como el gamma, contraste y brillo. Se optó por utilizar una app de Matlab® que permite el control manual de estos parámetros.

En la Fig.5(a) se muestra el menú para la configuración de la cámara y en la Fig.5(b) el menú de opciones de disparo (*Triggering*) para la toma de datos. En las mismas, se quita todo lo que es automático y las compensaciones por brillo y hue. Los alumnos pueden experimentar los efectos de cada parámetro y hacer búsquedas bibliográficas para reafirmar sus conclusiones. Se discutirán los efectos de cada parámetro. Se analiza el efecto de la nomenclatura propia del programa sobre el parámetro Gamma ( $\gamma$ ).

Un aspecto importante a controlar es la respuesta lineal del sensor, es decir que el número que entrega luego de una lectura sea proporcional a la energía luminosa colectada por el pixel leído. Es importante que comprendan que ningún instrumento es perfectamente lineal y que siempre hay un rango dinámico dentro del cual dicha linealidad es aceptable. Las cámaras son particularmente limitadas en este aspecto ya que es obvio que al tener un número limitado de bits en la digitalización (8 en nuestro caso) el número más pequeño no puede ser menor a 1 y el mayor no puede ser mayor a 255. Pero aun dentro de este rango dinámico limitado la respuesta podría ser no lineal.

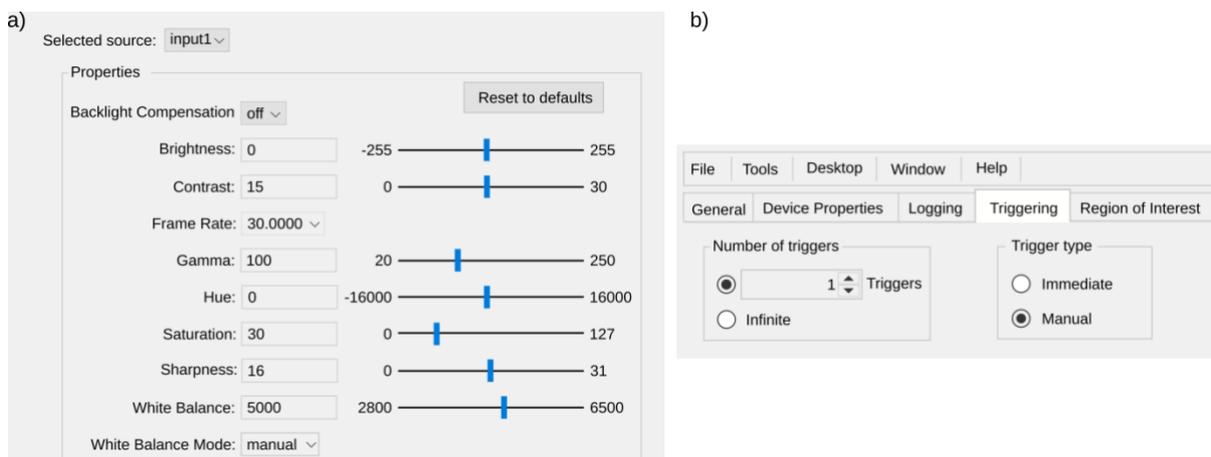


Fig. 5. Panel de control de la cámara. a) Configuración de la cámara, b) menú de opciones de disparo.

Para caracterizar la linealidad de la respuesta el primer paso es discutir que fuente de luz podemos utilizar cuya emisión pueda ser controlada. Esto es un debate útil que se les puede dejar como tarea, sobre todo sugiriendo que evalúen como es la emisión de una lámpara incandescente con la corriente y la emisión de un led. La profundidad de estas discusiones dependen fuertemente de la formación previa del grupo de estudiantes y de las carreras que cursan, por lo que alternativamente se les puede presentar directamente una posible solución explicando que el led emite un fotón por cada electrón inyectado (con una cierta eficiencia estadística) por lo que la potencia emitida será proporcional a la corriente circulante. Además el espectro emitido depende centralmente de la estructura del semiconductor utilizado, por lo

que no varía apreciablemente con la corriente. En cambio el filamento caliente por un lado cambia su temperatura con la corriente, con lo que no solo cambia la potencia emitida sino también el espectro de emisión. Esto será utilizado más adelante para intentar calibrar la respuesta del espectrómetro en intensidad para las distintas longitudes de onda.

Entendida que fuente se debe utilizar (ver Fig. 1 esquema) se ilumina la cámara con un led blanco al que se le controla la corriente externamente. Se toman imágenes a distintas corrientes. Como se discutió se asume que la intensidad emitida es proporcional a la corriente suministrada al led. Se busca ver cuán lineal es la relación entre intensidad en la imagen y la corriente aplicada al led dependiendo de los ajustes de cámara (gamma, brillo y contraste). Dada la alta sensibilidad de la cámara es necesario atenuar la radiación del led (se aprovecha esta etapa para discutir en detalle el efecto de los atenuadores). Se utilizan un papel difusor (utilizamos para ello papel manteca) y un par de polarizadores que pueden ser girados para ajustar el rango de iluminación deseado. La Fig. 6 muestra un esquema del dispositivo construido para la caracterización de la cámara.

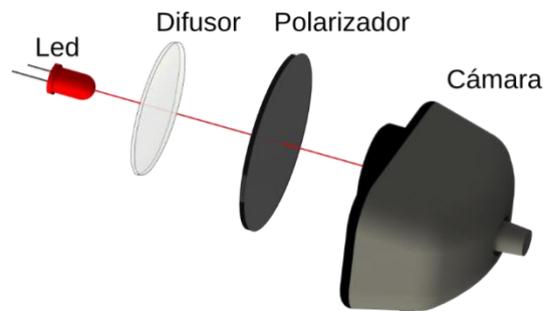


Fig. 6. Dispositivo empleado para configurar los parámetros en cámara. Se atenúa con un difusor y un juego de polarizadores.

La corriente se ajusta de manera simple con una fuente de tensión e interponiendo una resistencia variable y una fija sobre la cual se mide la corriente a partir de la caída de tensión. La Fig. 7 es la imagen obtenida con el led a máxima corriente (5mA). Los puntos marcados se corresponden con la selección efectuada para todas las configuraciones en las que se varía el gamma nominal (nomenclatura de la aplicación de cámara). En esta figura se indica con X,Y las coordenadas de los puntos analizados (en pixeles) y con RGB se indican las intensidades para cada color rojo, verde y azul. En esta instancia se aprovecha para discutir cómo generar colores con dicha combinación.

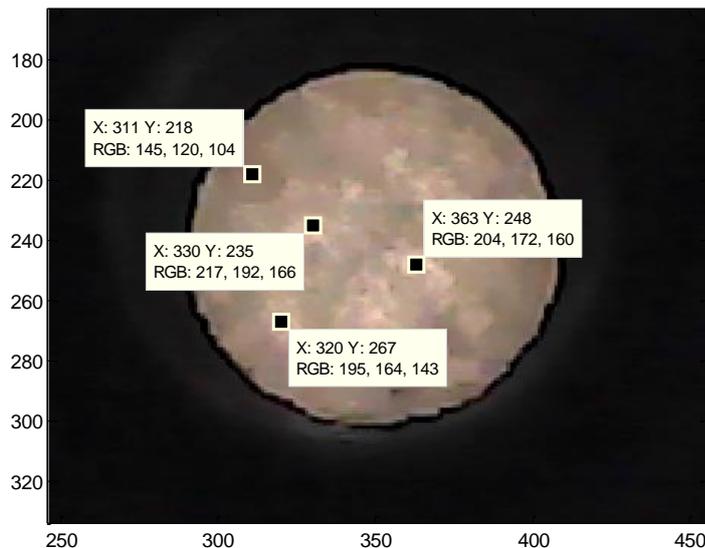


Fig. 7. Imagen de la zona iluminada por el LED cuando se le suministra máxima corriente. Se muestrean cuatro puntos. Los puntos analizados se denotan por v1 a v4 ; v1=[311 218]; v2=[363 248]; v3=[330 235]; v4=[320 267].

Las configuraciones analizadas para este ejemplo son configuración 1 a 3 que se corresponden con  $\gamma$  nominal= 100, 150 y 200. Para ver tendencias se realizan gráficos de intensidad vs. corriente para cada color y para cada posición para los tres valores de gamma.

A modo de ejemplo se muestra en la Fig. 8 el resultado para el canal rojo y gamma nominal 150 para los cuatro puntos. Se puede ver que la relación es aproximadamente proporcional para la posición v1. Se ve que para todas las posiciones hay una pérdida de linealidad particularmente a altos valores de corriente. Esto probablemente se deba a la no linealidad de la cámara por la tecnología CMOS.

La corriente se varió un factor 10 (de 0.55mA a 5.3mA) y en config1 ( $\gamma$  nominal=100) la imagen varió en un factor 5 (de 30 a 120 o de 50 a 200) mientras que en config2 ( $\gamma$  nominal=150) la imagen varió en un factor casi 10 desde 20 a 190. Para la config3 ( $\gamma$  nominal=200) se dio un factor mayor a 10 en el mismo rango.

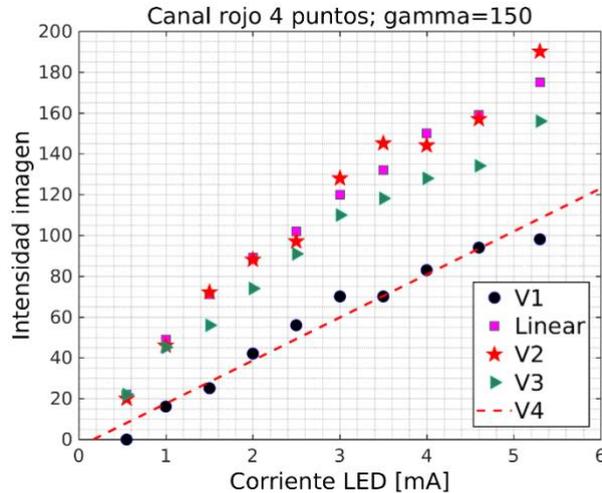


Fig.8. Intensidad en función de la corriente suministrada al LED para los 4 puntos de la Fig. 7 para un gamma nominal de 150. Solo se muestra el registro para el canal rojo.

Por otro lado como todas las imágenes van a ser usadas en formato grayscale (suma de los 3 canales RGB), se evalúa el gamma para grayscale. También se analiza por cada color. A modo de ejemplo se muestra en la Fig. 9 la respuesta a las tres configuraciones para la posición v1 en el formato grayscale. En nuestro caso particular utilizamos la herramienta de Matlab cftool con la que se ajustan las curvas obtenidas por  $f(x) = a \cdot x^b$  (General model Power1), donde  $x$  es la corriente suministrada al LED;  $f(x)$  es para la posición v1:  $Grayv1 = double(Rv1) + double(Gv1) + double(Bv1)$  (la suma de los tres canales para por ejemplo la posición v1). Cuando se suman colores hay que levantar la restricción  $max=255$  y hay que trabajar entonces en doble precisión. ( $Rv1$ ,  $Gv1$  y  $Bv1$  son respectivamente las intensidades de los canales RGB para la posición v1).

Los ajustes efectuados son entonces de la forma:  $I = a \cdot i^b$  donde  $I$  es la intensidad lumínica en cada punto e  $i$  es la corriente aplicada al LED (en mA), cuanto más parecida es  $\gamma=1$  el ajuste resulta lineal. El ajuste devuelve  $a$  y  $b$  con sus rangos de confianza (donde  $b$  es el gamma para este punto en la configuración evaluada). En la Fig. 10 se repite para la posición v3. En ambas figuras se observa que la respuesta es más lineal para la config 2 ( $\gamma$  nominal=150).

En la Tabla 1 se resume la estadística efectuada haciendo un promedio de las cuatro posiciones. Se registra  $\gamma_{medio}$  para cada color ( $\gamma_{RMedio}$ ,  $\gamma_{GMedio}$ ,  $\gamma_{BMedio}$ ) y para la suma de colores ( $\gamma_{Medio}$ ) en las tres configuraciones. Se puede notar que la respuesta del detector es diferente para cada color. Si nos concentramos en la imagen grayscale observamos que la config2 ( $\gamma$  nominal=150) es la que tiene el  $\gamma$  más próximo a uno, indicador de una respuesta lineal del sistema. A partir de este análisis se opta por trabajar con config2 ( $\gamma$  nominal=150). Debe notarse que en esta configuración el rango aceptablemente lineal se obtiene para lecturas en escala de grises entre 50 y 500, rango en que de ahora en más se considerará que la cámara tiene respuesta lineal cuando la cuantificación comparativa sea relevante.

TABLA 1. Resumen de los gamma promedio de las cuatro posiciones obtenidas para las tres configuraciones analizadas. Se incluyen los valores para cada canal (RGB) y para el grayscale.

Config1 (100)	Config2 (150)	Config3 (200)
$\gamma_{Medio}=0.59$	$\gamma_{Medio}=0.96$	$\gamma_{medio}=0.89$
$\gamma_{RMedio}=0.57$	$\gamma_{RMedio}=0.83$	$\gamma_{RMedio}=0.89$
$\gamma_{GMedio}=0.60$	$\gamma_{GMedio}=1.05$	$\gamma_{GMedio}=0.90$
$\gamma_{BMedio}=0.61$	$\gamma_{BMedio}=1.07$	$\gamma_{BMedio}=0.85$



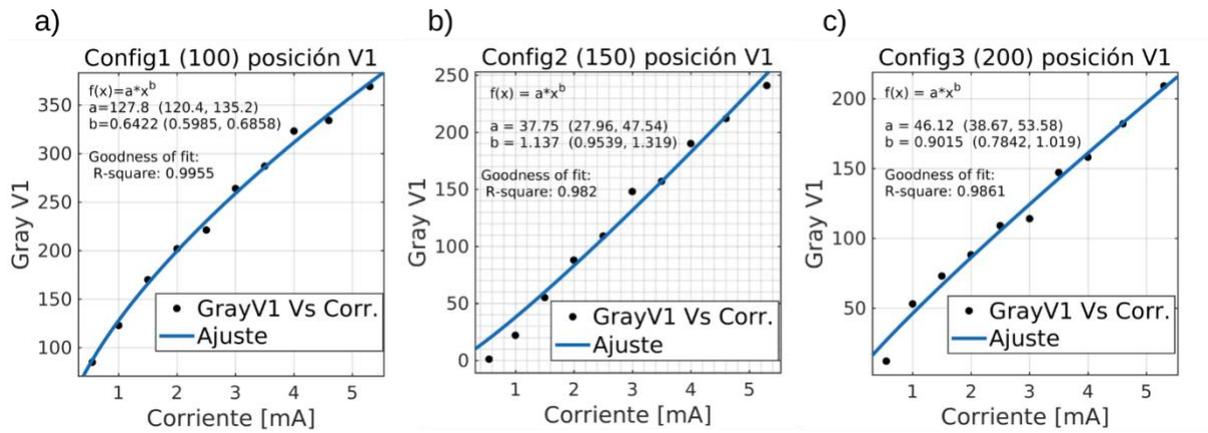


Fig. 9. Intensidad (suma de los tres canales) en función de la corriente en el LED para las tres configuraciones en la posición v1. a)  $\gamma_{\text{nominal}}=100$ , b)  $\gamma_{\text{nominal}}=150$ , c)  $\gamma_{\text{nominal}}=200$ .

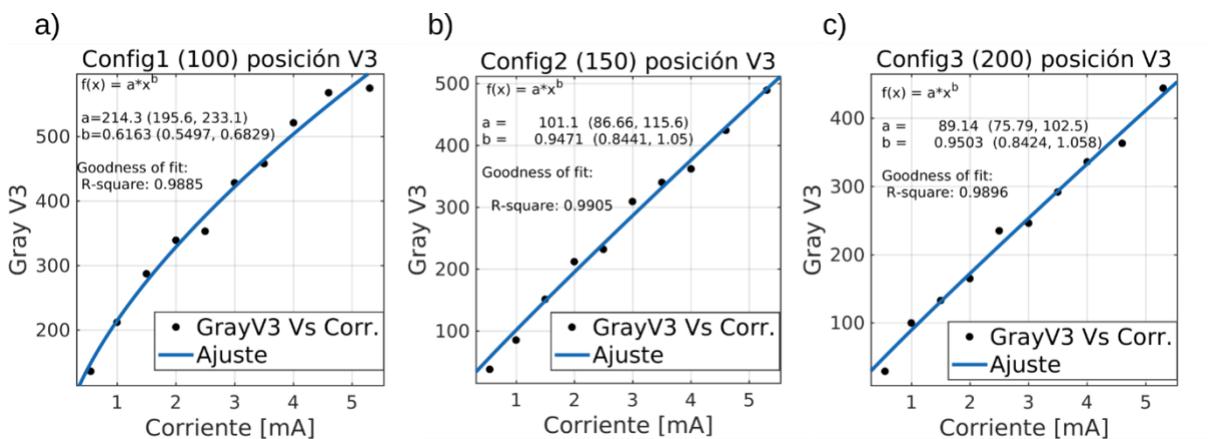


Fig. 10. Intensidad (suma de los tres canales) en función de la corriente en el LED para las tres configuraciones en la posición v3. a)  $\gamma_{\text{nominal}}=100$ , b)  $\gamma_{\text{nominal}}=150$ , c)  $\gamma_{\text{nominal}}=200$ .

### 3. c.2. Los filtros y la codificación de color

Esta es una oportunidad para presentarles a los alumnos el efecto de los filtros, y como se combinan colores para generar la sensación de un color distinto a los de base RGB. Discutir que son los colores primarios en esta circunstancia y la diferencia entre la ida y la vuelta.

Un problema es cómo generar en la pantalla de la computadora a partir de los tres colores primarios por ejemplo el amarillo (color aparente) y distinto es el problema inverso en el cual llega luz en la longitud de onda del amarillo (color real) y necesito que la cámara me entregue tres números que codifican la combinación RGB que produce la sensación de amarillo.

Las distintas actividades posibles son:

- Que los alumnos combinen tres números y vean que colores sintetizan en una imagen RGB. Un ejemplo es la Fig. 11 donde se creó un mosaico con varios colores y se puede identificar a que combinación corresponde cada cuadro.
- Que iluminen la cámara con leds de diferentes colores y observen que codificación resulta.
- Que combinen 3 leds (RGB) a distintas intensidades y traten de sintetizar la mayor gama de colores posibles (hay en el mercado leds de tres colores que se pueden encender en forma independiente. Más adelante pueden ver en el espectrómetro que esos colores que aparecen como sensación no están en el espectro, por ejemplo el amarillo).
- Que busquen en la bibliografía como son los juegos de filtro y como se combinan entre los pixel para lograr la codificación buscada.

En esta etapa se puede asignar a un grupo que investigue en mayor detalle y lo exponga a sus compañeros.

1	RGB 100	RGB 010	RGB 001
2	RGB 110	RGB 101	RGB 011
3	RGB 000	RGB 0.5 0.5 0.5	RGB 111
	1	2	3

Fig. 11: Mosaico de colores y su codificación. En el apéndice programas se muestra como se genera este ejemplo. [20]

### 3. c.3. Caracterización del ruido

A esta altura los alumnos habrán notado que al repetir una adquisición en condiciones fijas la lectura de la cámara no es siempre idéntica, sino que tiene fluctuaciones a las que denominamos ruido. Con el objeto de caracterizar el ruido de cámara se les puede proponer un esquema similar al de la Fig.6 sin el polarizador.

Con un led blanco se ilumina la cámara interponiendo un difusor de modo que la imagen no sature. Se orienta la cámara de modo que el led incida frontal. Para adquirir la imagen se utiliza la opción trigger manual y se toma una pila (stack) de 100 imágenes. Se genera una matriz de  $n \times m \times 3 \times N$  donde  $n \times m$  es la dimensión de la imagen en píxeles, 3 colores RGB y  $N$  es el número de imágenes de la pila.

Se estudia la dispersión entre las distintas imágenes adquiridas en iguales condiciones. A modo de ejemplo en la Fig. 12 se representan las imágenes (640x480 píxeles) para  $N=5$  y  $N=10$  donde se aprecia la dispersión en intensidad entre disparos.

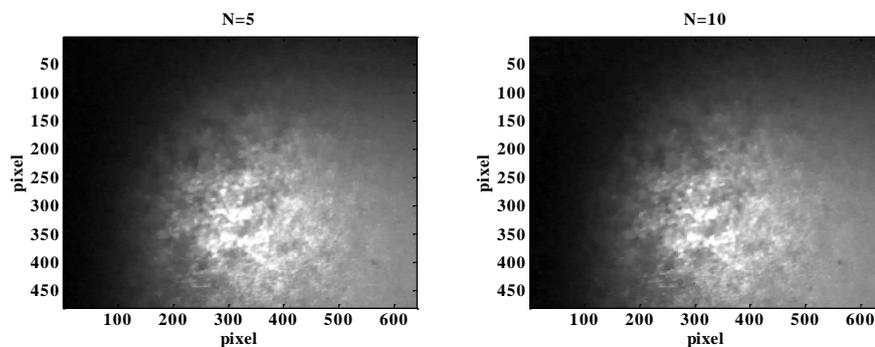


Fig.12. Dos imágenes capturadas (disparos  $N=5$  y  $N=10$ ) en la misma posición donde se puede observar la dispersión en intensidades.

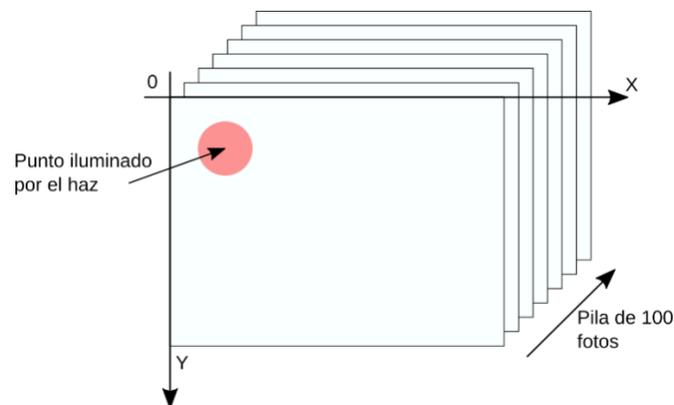


Fig. 13. Esquema ilustrando un conjunto de 100 imágenes capturadas en forma secuencial en el mismo punto.

Para cuantificar las diferencias se escribe un programa que a partir de la pila genera valores medios y varianza en forma de vector ordenado en valores medios, luego se suaviza. Los programas utilizados en este trabajo están disponibles en [20]. El protocolo utilizado es que para cada pixel se busca la media y varianza en los 100 cuadros como se esquematiza en la Fig. 13. En la Fig. 14 se muestran los resultados obtenidos.

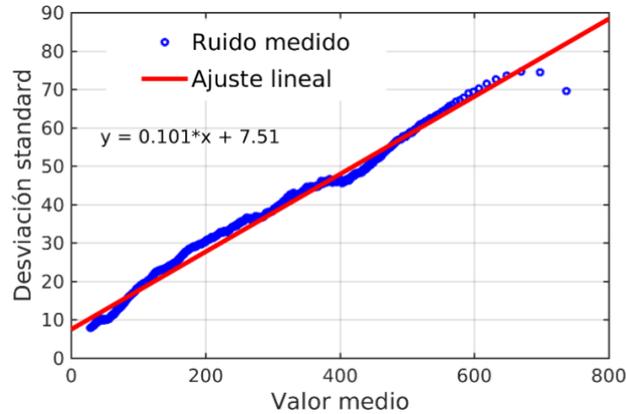


Fig. 14. Gráfico de desviación estándar vs. valor medio, obtenido a partir de la dispersión entre distintas imágenes adquiridas con la cámara en iguales condiciones. Se puede notar que para valores altos la cámara satura y la variabilidad disminuye en consecuencia.

Del gráfico de desviación estándar vs. valor medio (Fig. 14) se puede asignar una incerteza a cada medición de intensidad. Se observa del ajuste lineal que la incerteza es un 10% del valor medido más una constante de 7,5 cuentas que correspondería al ruido que se tiene como consecuencia de la electrónica aun cuando no está iluminada la cámara, denominado ruido de oscuridad. Esta información pasará a ser relevante si se desea extraer de una medición información cuantitativa de la potencia registrada, y no solamente identificar las longitudes de onda presentes en la radiación medida. Permitirá acotar la incerteza al comparar intensidades relativas en varios colores de una fuente dada.

Nota: Si los alumnos han tenido experiencia previa en manejo de distribuciones estadísticas se puede discutir a qué tipo de distribución puede corresponder esta medición. Por ejemplo si la incerteza proviniera de una estadística de conteo de fotones se esperarí una distribución de Poisson, la varianza y no la desviación estándar sería lineal con el valor medio. Se evidencia aquí la presencia de otras fuentes de ruido además del propio del conteo estadístico.

### 3. c.4. Caracterización de la lente de la cámara

Se plantea como medir la distancia focal de la lente de la cámara y el consecuente campo visual. Los alumnos conocen la ecuación del constructor de lentes:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Con los parámetros definidos en la Fig. 15 si pudiesen medir pares  $s, s'$  para los que se forma imagen podrían obtener la distancia focal a partir de la ordenada al origen en el gráfico de las inversas de  $s'$  en función de las inversas de  $s$ . Es útil que vean las dificultades experimentales y las incertezas introducidas si se intenta medir  $s'$ .

Se les plantea la alternativa de medir la magnificación ya que pueden medir con mucha exactitud tanto el tamaño del objeto que se fotografía ( $b$ ) como su distancia a la cámara ( $s$ ) y el tamaño de la imagen ( $a$ ) a partir del tamaño del pixel. En la Fig. 16 se muestra un ejemplo de dicha medición en la que se fotografía una regla (Fig. 16(a)) y se mide el tamaño en pixeles de la imagen arrojando  $f=2.8\text{mm}$  (Fig. 16(b)). La ecuación a ajustar queda a partir de la anterior ecuación (3):

$$\frac{b}{a} = \frac{s}{s'} = \frac{1}{M} = \frac{s}{f} - 1 \quad (4)$$

Donde  $M$  es la magnificación de la imagen. De la misma medición se estima el ángulo de apertura, obteniéndose un valor de  $21^\circ$ .

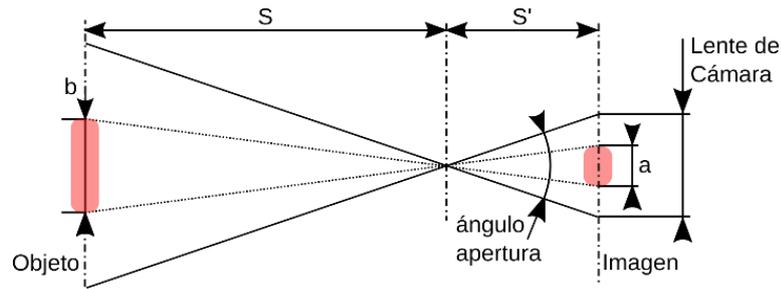


Fig. 15. Esquema indicando los parámetros característicos en la observación de un objeto a través de una lente.

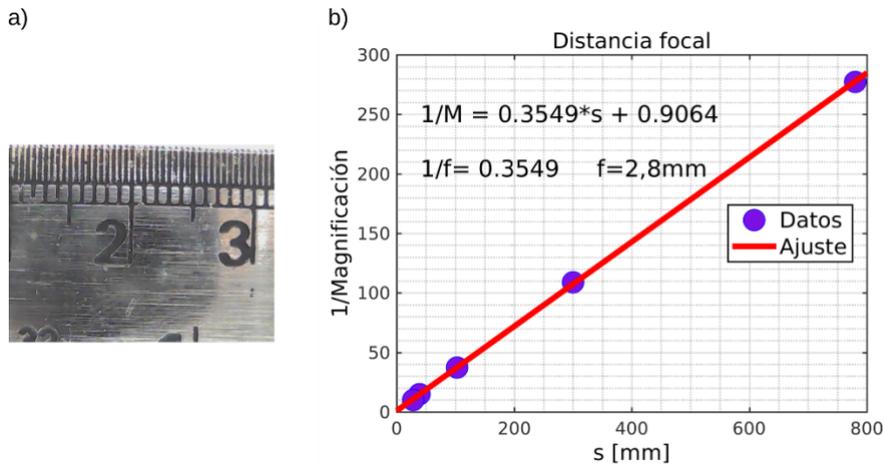


Fig. 16. a) Fotografía de una regla utilizada para conocer la magnificación de la cámara. b) Gráfico de  $s/s'$  en función de  $s$ . De la inversa de la pendiente se extrae el valor de la distancia focal.

Otro aspecto a determinar es el campo visual y su relevancia al experimento. Se le propone al grupo que estudie que zona de la red de difracción debe estar iluminada para que llegue luz a todo el ancho del sensor (de ser posible). Como se ve en la Fig. 17 luz roja o azul será difractada a ángulos distintos y la radiación que llega al sensor proviene de distintas zonas de la red dependiendo del color. Acá pueden aplicar la reversibilidad de los caminos y estudiar a la inversa los rayos que parten de distintos puntos del sensor en que zona de la red impactarían. Como se busca una estimación no es necesario el cálculo exacto, ya han visto del punto anterior que el objeto (ranura en el caso del espectrómetro) estará ubicado suficientemente lejos para hacer esta estimación suponiendo que está en el infinito y el sensor en el foco de la lente. Si los alumnos tienen dudas sobre esta aproximación es útil para el aprendizaje que estimen la diferencia con por ejemplo la fuente a 100mm de la red (los rayos paralelos que van de la lente a la red deberán ahora converger a 100mm y habría que calcular la distancia del sensor que ya no será  $f$ . De la figura se puede ver que el ancho de la zona iluminada  $H$  debe ser de al menos:

$$H \geq h \frac{L}{f} + \frac{D_L}{\cos(\alpha)} \quad (5)$$

Se puede observar que si hay regiones no iluminadas de la red habrá colores del espectro que no serán detectados. Más adelante podrán experimentar con este hecho utilizando ranuras que no dan lugar a una iluminación uniforme de toda la región calculada.

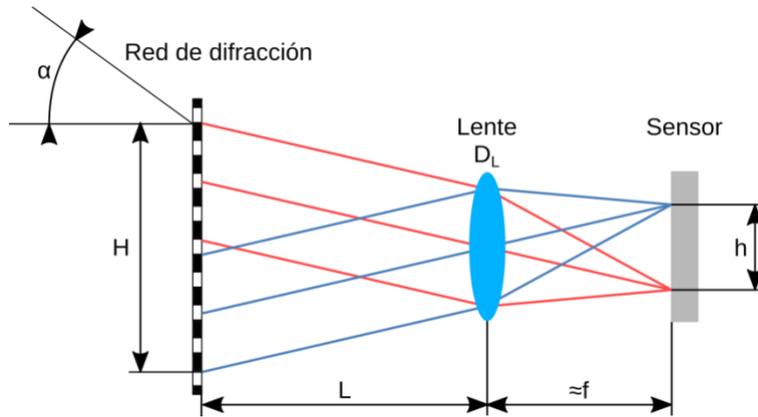


Fig. 17. Visualización del efecto del campo visual para la determinación de la zona de la red que debe ser iluminada desde la ranura.

### 3. d. Atenuadores

Debido al estrecho rango dinámico medido para la cámara será necesario llevar la intensidad luminosa que llega a la misma a valores adecuados para evitar la saturación. Se proponen distintos esquemas posibles como orificios de distinto tamaño perforados sobre un papel de aluminio (y regular la distancia del orificio a la ranura), o utilizar un papel difusor (por ejemplo papel manteca utilizado en la cocina) o para un control variable más fino rotar un polarizador respecto de uno fijo. Pueden utilizar una combinación de diversos métodos. Respecto a los polarizadores si fabrican un montaje graduado (es fácil incluir marcas angulares en la impresión 3D) pueden verificar la ley de Malus dentro de la precisión que provee la cámara. Puede ser interesante que algún grupo más adelante verifique el comportamiento espectral de los polarizadores y de ser posible su extinción al ser cruzados.

## 4. Diseño y armado del equipo

Una vez caracterizadas las componentes se les propone que con el material disponible diseñen un posible espectrómetro. Pueden fabricar otras piezas de su propio diseño o modificar los diseños entregados. A diferencia del esquema presentado en la Fig. 1 es necesario ahora ser más precisos, identificar los parámetros y definir o estimar sus magnitudes. Un posible ejemplo (el que realizamos nosotros) se muestra en la Fig. 18 en el que se optó por un montaje en que el eje de la cámara permanece perpendicular a la red. Este es un diseño sencillo pero es importante entender que no maximiza la resolución, por lo que quizás en función de objetivos específicos puede ser conveniente otra configuración. Se ve que los parámetros de control son: L1 (distancia fuente difusor); L2 (distancia difusor-ranura); L3 (distancia ranura-cámara); D y h (ancho y alto de la rendija)  $\varphi$  (ángulo de incidencia del haz respecto a la normal n a la red);  $\theta$  (ángulo dispersado por la red de difracción); d (espaciado de la red). El conjunto red de difracción-cámara puede rotar ( $\varphi$ ) para poder observar distintos órdenes de interferencia.

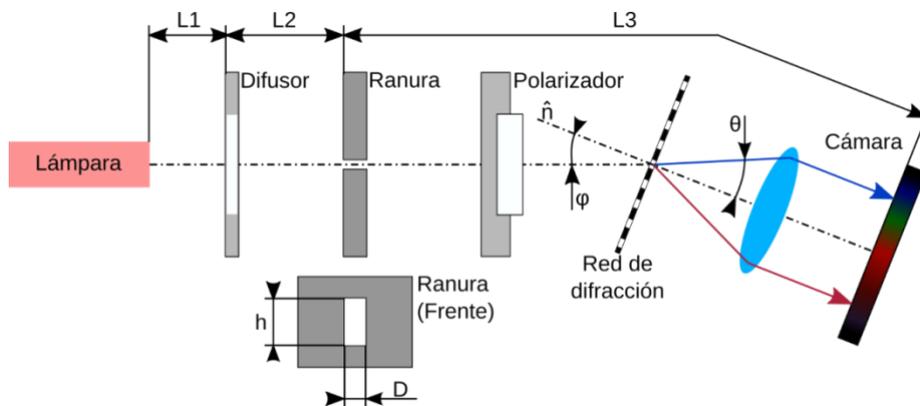


Fig. 18. Un posible esquema propuesto. El conjunto cámara red de difracción puede rotar un ángulo  $\varphi$  en búsqueda de los distintos órdenes de interferencia ( $\theta_n$ ). Normal a la fuente de iluminación es posible insertar atenuadores para evitar la saturación de la imagen y una ranura intercambiable para poder cambiar la zona iluminada en la red de difracción.

En la Fig. 19(a) se muestra un render 3D del equipo y en la Fig.19(b) una fotografía del conjunto armado. Para darle estabilidad al equipo es fijado a una placa de madera.

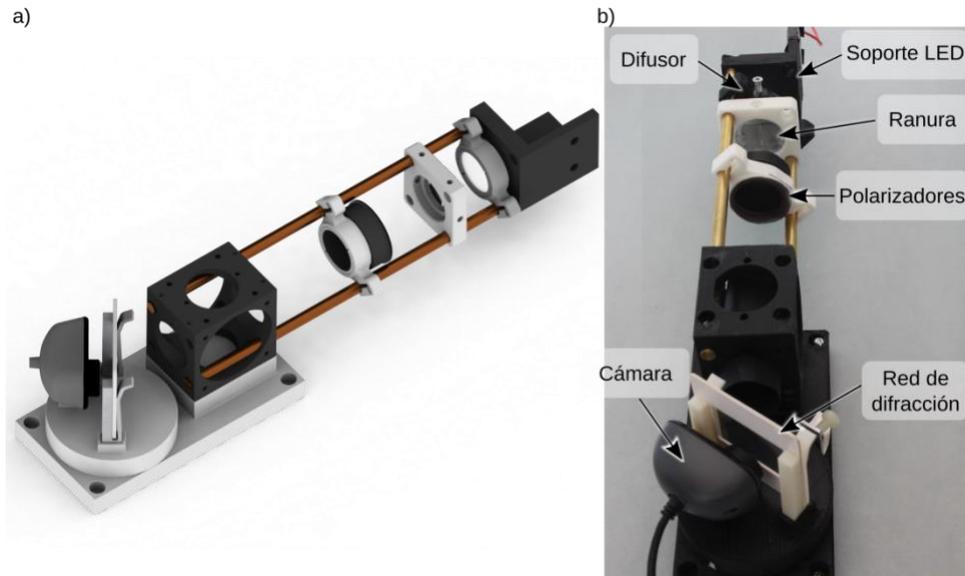


Fig. 19. a) Render del sistema utilizado, b) foto del dispositivo final.

Los alumnos deben ordenar algunas pautas de las metas que debe cumplir el instrumento. Por ejemplo: rango espectral que se desea cubrir, resolución deseada o posible y discutir que parámetros son determinantes para ello. Deben notar por lo visto antes que el tamaño de la ranura, por efecto de difracción, determina la región iluminada de la red. Por otro lado deben ver que al estar realizando una imagen de la ranura en la cámara, el tamaño de la misma también incidirá en la resolución (tamaño de la imagen para un haz monocromático comparado con separación de dos imágenes de distintas longitudes de onda). Surge el compromiso entre resolución y rango. El primer paso es entonces ver el rango espectral que cae dentro de la cámara en función de la configuración elegida. Para ello pueden explorar en un gráfico como el de la Fig. 20 cuál es el rango espectral que cae dentro del sensor para cada orden de difracción y en función del ángulo de incidencia en la red. En el ejemplo de la figura se selecciona el ángulo de incidencia de modo que el color de la línea del Na en 585nm caiga en el centro del sensor a orden  $n=-1$  en la ecuación (2). Se ve que todo el rango visible queda incluido en el sensor y que el segundo orden aparecerá en el extremo del sensor para los colores azules.

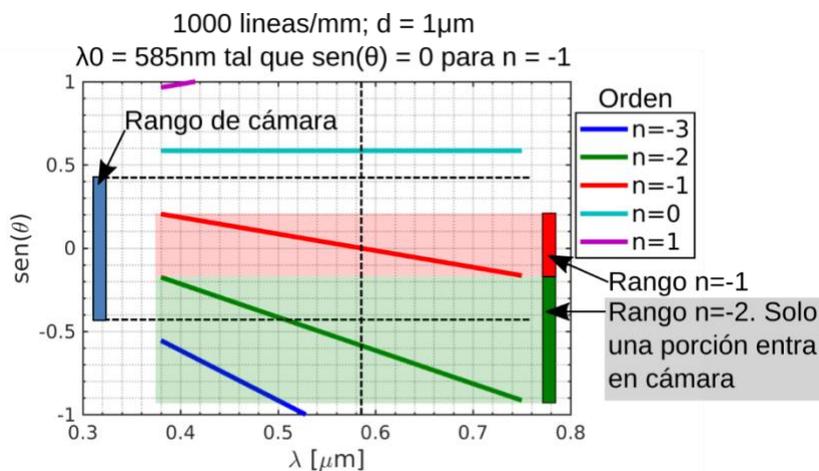


Fig. 20. Zona de la cámara en que inciden distintas longitudes de onda a distintos órdenes para una red de 1000 líneas/mm ( $d=1\mu\text{m}$ ), cuando se incide para que  $\lambda=585\text{nm}$  quede centrada en el sensor.

El paso siguiente es calcular el tamaño de la imagen de la ranura. Suponiendo la validez de las aproximaciones de la óptica geométrica se puede calcular dicho tamaño en función de la distancia. En este punto se debe discutir el astigmatismo introducido por la red de difracción por lo que una fuente puntual a una distancia  $L$  parecerá provenir de una distancia  $L'$  modificada por la relación entre los cosenos del ángulo de refracción  $\theta$  y del de incidencia  $\varphi$ . Este puede ser un ejercicio en la guía de problemas que ya tengan resuelto. De la magnificación calculada en ocasión de la caracterización de la lente pueden calcular para una dada ranura a que distancia su imagen será menor a 1 pixel de la cámara.

Por otro lado deben calcular (cuando ya conozcan el fenómeno de difracción en detalle) el tamaño de la mancha de difracción para una fuente puntual debido a la limitación en el tamaño de la lente. Vale acá discutir que si la lente es completamente iluminada por la difracción de la ranura, el limitante será la lente y no el tamaño de la ranura.

## 5. Calibrar el instrumento en longitudes de onda, discutir alternativas

Una vez elegidos los parámetros considerados adecuados se procede al armado del equipo diseñado y el paso siguiente es su calibración. Habiendo varias fuentes de luz disponibles distintos grupos pueden elegir distintas alternativas. Utilizar una lámpara gaseosa y calibrar la longitud de onda correspondiente a cada pixel a partir de la tabla de emisión de dicha lámpara por ejemplo provista por el NIST, y que se tomará como patrón. O alternativamente se pueden utilizar fuentes calibradas por nosotros con otro espectrómetro como punteros láser (patrón secundario). En lo que sigue optamos por este último esquema por presentar aspectos interesantes que se irán discutiendo.

Antes de proceder a la calibración es necesario discutir y prever las distintas distorsiones que podrían afectarla y como evitarlas. Podría interesar sumar muchos pixeles para una misma longitud de onda para mejorar la relación señal/ruido, evaluar el efecto que podría tener que la cámara estuviera rotada respecto de la red de difracción y las posibles aberraciones de la óptica que podrían curvar las líneas e introducir una relación no lineal entre en eje espacial y la longitud de onda. Estas distorsiones pueden ser evaluadas cuantitativamente tomando imágenes de hojas cuadrículadas, midiendo la inclinación del espectro de una fuente de luz blanca puntual (agujero en vez de ranura) y el ruido ~~ya ha sido~~ discutido en la sección 3. c.3. Caracterización del ruido.

Se les propone una serie de estrategias alternativas para determinar las posiciones de las líneas y para cada una de ellas se debe discutir los efectos de las distorsiones antes mencionadas. Se pueden seguir una o más estrategias según el tiempo que se destina a esta problemática:

1) Utilizar una sola fila de la cámara o un conjunto pequeño de ellas (la línea resulta tan angosta como lo permite la resolución del instrumento, puede resultar ser muy ruidosa) Dependiendo de cuan buena sea la alineación las líneas pueden estar inclinadas por lo que si se promedia sobre varias filas la línea aparece ensanchada. Las posibles aberraciones obligarían a utilizar líneas de calibración a lo largo de todo el rango espectral para ajustar con polinomios de orden mayor.

2) Proyectar. Se proyectan varias filas de modo de aumentar la estadística. (Se ensanchan las líneas, a cambio baja el ruido). De la medición de la inclinación se puede estimar el efecto de esta estrategia.

3) Mapear pixeles, sin promediar. (No se ensancha: cada  $x,y$  tiene un valor de pixel asignado; baja el ruido). Esta estrategia es más costosa en tiempo y esfuerzo pero compensa todos los inconvenientes antes mencionados.

Para poder asignar una longitud de onda a cada pixel se necesitan al menos tres patrones. De esta forma se puede confeccionar un mapa que asocie una longitud de onda a cada pixel empleando por ejemplo tres patrones de fuentes láser (verde, rojo y violeta). Para cada fuente se obtienen las posiciones  $x,y$  en las cuales se observa la máxima intensidad. Si se ajusta con una cuadrática (3 parámetros a determinar) se pueden interpolar todos los colores en el rango en que ilumina la ranura. De modo que si se mide un patrón desconocido al tener los valores de  $\lambda$  para cada pixel se puede establecer el espectro siempre que se mantengan las condiciones de iluminación (difusa o directa, tipo de ranura, red de difracción).

Según la altura de la ranura y el modo en que es iluminada el alto de la zona iluminada de la cámara puede variar. Debido al elevado campo visual de la cámara la ranura, aún iluminada completamente, solo aprovecha un número limitado de filas. Es por ello que se debe seleccionar una región de interés (ROI) que sea la zona de la cámara donde habrá información relevante, e ignorar el resto de los píxeles.

El rango elegido (ROI: rango de interés) es el que se usa para todas las imágenes, es la zona calibrada. En nuestro caso tomamos filas 211 a 240 (30 filas). Esto nos da 30 filas por 640 columnas=19200 puntos útiles.

Las fuentes elegidas son un puntero láser violeta con  $\lambda_1=405\text{nm}\pm 1\text{nm}$ , un láser rojo con  $\lambda_2=658\text{nm}\pm 2\text{nm}$  y como tercera fuente se utiliza el segundo orden del láser violeta que caerá en la posición del primer orden para una longitud de onda duplicada (ver ecuación (2)), o sea  $\lambda_3=810\text{nm}\pm 2\text{nm}$

Mostramos a continuación el resultado de calibrar pixel por pixel (opción 3 antes mencionada). Para ello usamos imágenes con RGB promediado (grayscale), y ajustamos fila por fila con un polinomio (en este caso de grado tres porque tenemos tres líneas). Con esto se obtiene una calibración tal que a cada punto (x,y) de la foto se le asigna un  $\lambda$  para las filas calibradas 211 a 240. Se construye una matriz  $L_{ij}$  que contiene la longitud de onda de cada pixel de fila  $i$  y columna  $j$ . Esto da 19200 valores muy ruidosos. Para suavizar se convierte la matriz en vector, se ordena (manteniendo la información de la biyección entre cada pixel y el elemento del vector) y se suaviza (promediando 20 o 30 vecinos). Esto da una calibración suavizada de mucho menor ruido. Luego se asigna a cada pixel una longitud de onda y cada línea se ajusta con una parábola y se obtiene una parábola media promediando los coeficientes de las 30 parábolas ajustadas de modo de tener una calibración rápida. Se puede notar de la figura que hay una cierta dispersión entre las filas de modo que se tiene mucha mejor precisión si cada fila se convierte con su propia parábola.

En la Fig. 21 se muestra la relación entre longitud de onda y pixel en el rango elegido, utilizando para la estadística 30 filas. Los puntos marcados son las longitudes de onda utilizadas como patrón con sus correspondientes imágenes.

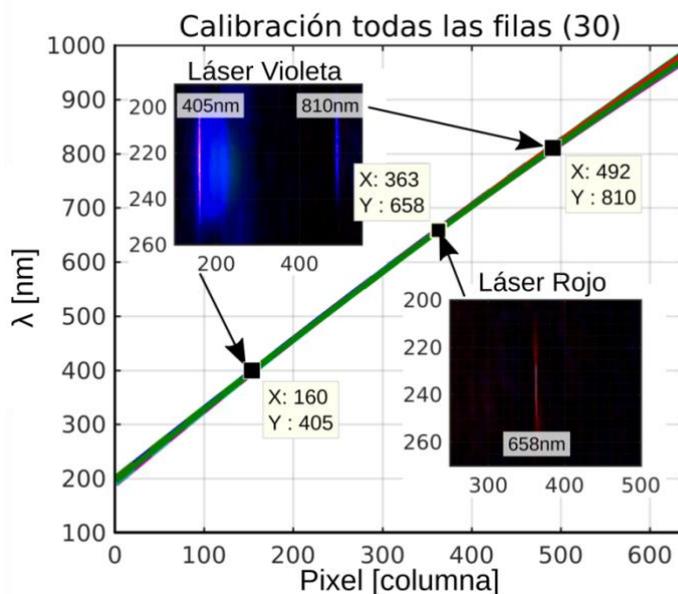


Fig. 21. Curvas de calibración (parábolas) para cada fila. Se ve una baja pero apreciable dispersión entre filas.

## 6. Mediciones

Una vez obtenido un método para calibrar las imágenes en longitud de onda se puede proceder a caracterizar distintas fuentes de luz. A modo de ejemplo utilizaremos fuentes que suelen hallarse

fácilmente en los laboratorios de docencia. Mostraremos procedimientos básicos para la toma de datos de modo de guiar a los estudiantes en los protocolos necesarios para generar el espectro de la fuente analizada. El primer paso es determinar la precisión, exactitud y resolución del equipo construido observando líneas de emisión de lámparas atómicas que pueden contrastarse con patrones publicados por centros de referencia. Para ello elegimos lámparas de Ar y Hg que cubren rangos distintos del espectro.

Para poder utilizar la calibración realizada es menester asegurarse que todas las mediciones se efectuaron en iguales condiciones, manteniendo la geometría establecida, esto implica que se procesarán imágenes en la misma ROI usada para generar la calibración.

El protocolo propuesto sería:

- 1) Cargar la imagen
- 2) ROI → generar la imagen recortada
- 3) Sumar los tres colores (grayscale). Pasar a doble precisión.
- 4) Asignar a cada pixel su longitud de onda, ordenar los vectores resultantes (longitud de onda, intensidad).
- 5) Suavizarlo para bajar el ruido promediando vecinos (de la misma forma que se realizó al calibrar).

En la referencia [20] se presentan los programas en matlab desarrollados y utilizados por nosotros.

En la Fig. 22(a) se muestra la fotografía de las líneas obtenidas para una lámpara de Ar, que según las tablas del NIST [21] tienen líneas en el rojo e infrarrojo cercano. Se ajustó la distancia de la lámpara a la ranura de modo de evitar la saturación de la cámara. Se observan líneas en la zona por encima de 800nm. Acá es importante discernir si corresponde a una línea infrarroja o es un segundo orden de una línea azul. Para ello es importante referir al estudiante a la imagen de la Fig. 21 en la que se ve que el segundo orden de 405nm excita el canal azul preponderantemente (se ve de color azul) mientras que las líneas de la lámpara de Ar excitan los tres canales por igual, como consecuencia de que para esta cámara los tres canales reciben luz infrarroja cercana (es por ello que la cámara tiene un filtro infrarrojo que fue removido oportunamente). Al levantar el espectro en este caso se suavizó promediando 30 vecinos para bajar el ruido de la medición. El resultado se ve en la Fig. 22(b) donde solamente se graficó la región de interés por encima de los 600nm donde, de acuerdo a la tabla del NIST [21] se encuentran las líneas de este elemento.

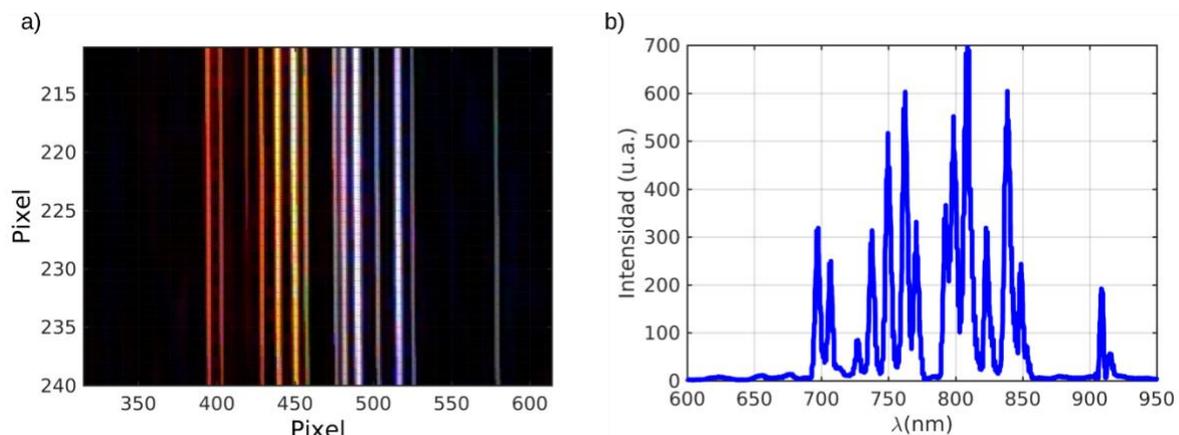


Fig. 22. Espectro de una lámpara de argón. a) imagen. b) Espectro suavizado 30 puntos.

Del espectro obtenido se pueden registrar las líneas (ver tabla 2). Para cada línea se determina el ancho (FWHM), que da una medida de la resolución del instrumento. Es oportuno que los alumnos discutan como esto se relaciona con la posibilidad de reconocer la existencia de dos líneas cercanas. Cursos más avanzados pueden discutir cómo se puede determinar con las líneas más delgadas (que no surjan de superposición de varias líneas espectrales cercanas) la respuesta del instrumento y tratar de implementar técnicas de deconvolución para mejorar la resolución. De la comparación con el patrón del NIST se determina la exactitud del instrumento. Es importante proponer que se repita la medición varias

veces para comparar los resultados y determinar la precisión del equipo. No son muchas las oportunidades que se presentan en los experimentos docentes en que se pueden discutir estos tres conceptos.

Tabla.2. Líneas para una lámpara de argón.

$\lambda$	intensidad	FWHM	$\lambda$ tabla NIST	intensidad tabla NIST	Exactitud
nm	u. a.	nm	nm		nm
697	267	4	696.5	300	0.5
706.3	240	3	706.7	300	0.4
726.5	80	4	727.3	60	0.8
737	276	4.5	738.3	300	1.3
749.6	517	4.7	750.4/751.4	600/400	1.3
762.5	600	4.6	763.5	700	1
770.7	326	4.5	772.4	400/30	1.7
792.7	315	4.6	794.8	600	2.1
798.5	550	5.6	800.6/801.4	600/700	2.5
809	710	4.7	810.3/811.5	600/1000	2
823	319	3.4	826.4	300	3.4
838.7	600	4.6	840.8/842.5	400/600	2.5
848.8	240	3	852.1	400	3.3
909	190	3	912.3	1000	3.3
915	56	5	922.4	400	7.4

Cabe mencionar que queda pendiente ver si la asignación de intensidades relativas entre distintas líneas es la adecuada. Se puede anticipar que hay regiones donde hay una fuerte discrepancia con la publicada por el NIST. Queda esta discusión para el final de este trabajo.

Se repite el protocolo para una lámpara de Hg. En la Fig. 23(a) se presentan la correspondiente imagen adquirida y en la Fig. 23(b) se muestra el espectro procesado. En la tabla 3 se listan las líneas obtenidas. Esta lámpara tiene aspectos de seguridad que es oportuno enfatizar con los estudiantes. Deben utilizar antiparras protectoras de la radiación UV o tomar las precauciones necesarias para no exponerse ni exponer a los compañeros. El mercurio tiene líneas relevantes por debajo de los 600nm pero los alumnos observarán la aparición de otras líneas, que si han medido la lámpara de Ar podrán asociar con dicho gas. Esto se debe a que las lámparas de Hg suelen tener también Ar [22]. En la Fig. 23(b) solamente se muestra el resultado hasta 600nm para obviar dichas líneas. Un experimento alternativo podría haber sido utilizar solamente esta lámpara e identificar los gases presentes en la descarga. En particular en la tabla y el espectro se observa una línea débil en 492nm que puede ser asignada al Ar doblemente ionizado, algo que puede o no discutirse con los alumnos.

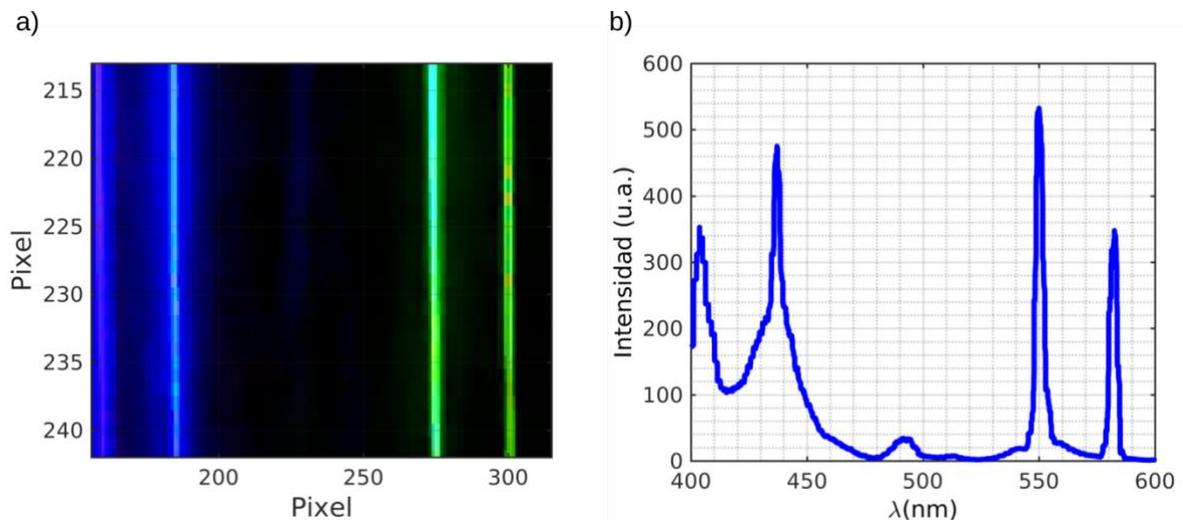


Fig. 23. Espectro de una lámpara de mercurio. a) imagen. b) Espectro suavizado 30 puntos.

Tabla.3. Líneas para una lámpara de mercurio

$\lambda$	intensidad	FWHM	$\lambda$ tabla NIST	asignación	intensidad tabla NIST	Exactitud
nm	u.a.	nm	nm			nm
360	67	10.4	365.0153	Hg	600	5
403.7	333	10	404.6	Hg	400	0.9
437	473	7.8	435.8	Hg	1000	-1.2
492	32	11.3	487.99	ArII	250	4
549.5	523	4.2	546.07	Hg	500	-3.4
582.5	346	3.6	576.96/579.06	Hg	50/60	-4.5

Se puede proponer a los alumnos que evalúen que factores limitan la resolución y como mejorarla. Por ejemplo tamaño de pixel, poca dispersión de la red, ancho de la ranura, etc. Que propongan un diseño que mejore esto (otra lente por ejemplo).

### 7. Calibrar en intensidad relativa.

Calibrar en intensidad presenta la dificultad de definir un patrón adecuado. No se pretende en este marco calibrar de manera absoluta la energía que llega a cada pixel. Simplemente se busca una calibración relativa de modo de determinar cómo se distribuye la potencia entre los distintos colores.

Es una oportunidad para trabajar con conceptos de cuerpo negro y elegir alguna fuente de referencia para calibrar en intensidad. En este caso ilustramos con mediciones efectuadas con lámparas halógenas. Según datos de fabricantes una lámpara halógena típicamente tiene un filamento con temperaturas entre 2700K y 3000 K [23]

Como la potencia emitida por un cuerpo negro escala con la cuarta potencia de la temperatura, y como solamente nos interesa la calibración relativa (unidades arbitrarias) en la Fig. 24 se ilustra la curva de Planck para estas dos temperaturas normalizadas a la emisión a 800nm en el rango de longitud de onda en la que se efectúa la calibración, donde por ejemplo para  $\lambda=600\text{nm}$  son  $I(2700\text{K})=0.40$   $I(3000\text{K})=0.51$ .

Para las calibraciones que se ilustran aquí usaremos  $T=3000\text{K}$ , teniendo presente que este es otro punto a discutir con los alumnos.

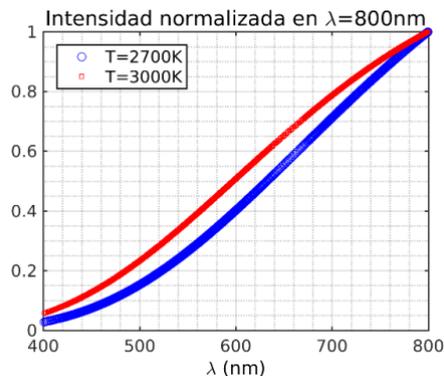


Fig. 24. Espectro de un cuerpo negro normalizado a 1 para  $\lambda=800\text{nm}$

Se mide entonces una lámpara halógena (incandescente) que afectada por los filtros de color de la cámara (ver Fig. 25(a)) y la respuesta espectral del sensor da una curva distorsionada que se ilustra en la Fig. 25(b). Es importante antes de procesar analizar el resultado de la medición y entender los inconvenientes que aparecen. A modo ilustrativo se inserta un recorte del espectro visible. En primer lugar se ve que por debajo de 400nm no se detecta una señal significativa por la falta de respuesta del sensor y por encima de 700nm también decae la señal cuando se esperaría que siga subiendo. Según el curso y contexto se puede discutir que la respuesta del Si que constituye el sensor tiene su pico en el infrarrojo cercano, por lo que esa caída debe ser consecuencia de los filtros. En cualquier caso de la caracterización del sensor se determinó que cuando la señal es menor a 50 se pierde linealidad, lo que restringe el rango a ajustar entre

400nm y 650nm. Otro defecto del sensor que se hace evidente es la ausencia de color amarillo en la imagen. Hay un hueco en el espectro en 580 nm que dará lugar a problemas en la reconstrucción en ese rango espectral.

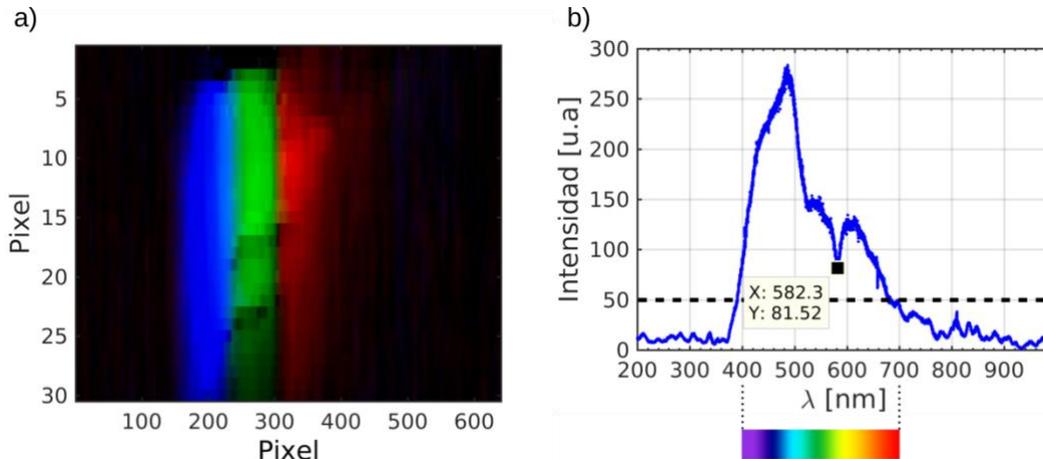


Fig. 25. Espectro medido de una lámpara halógena. a) imagen. b) Espectro suavizado 30 puntos.

Para describir como se hace la corrección supongamos que la lámpara emite con una densidad espectral  $I(\lambda)$ ; lo que mido es  $S$  (señal) y si  $R$  = respuesta del instrumento, será:

$$S(\lambda) = I(\lambda) * R(\lambda) \quad (6)$$

Entonces midiendo  $S(\lambda)$  para la fuente que se conoce y tomando como  $I(\lambda)$  la curva de Planck, puedo obtener la respuesta del instrumento

$$R(\lambda) = \frac{S_{medida}}{I_{conocida}} \quad (7)$$

De este modo tengo la respuesta del instrumento en ese intervalo de  $\lambda$  ( $R$  contiene a  $\eta$ : la eficiencia de la red de difracción).

Cuando mida otra luz (por ejemplo la fluorescencia que aparece al iluminar el papel difusor con el láser violeta o un LED blanco) al tener la respuesta del instrumento y si mido en mismas condiciones entonces:

$$I(\lambda) = S_{medida} * \frac{1}{R(\lambda)} \quad (8)$$

Y con esto se recupera el espectro corregido en intensidades relativas de los distintos colores. En la Fig. 26 se grafica la inversa de dicho término de corrección.

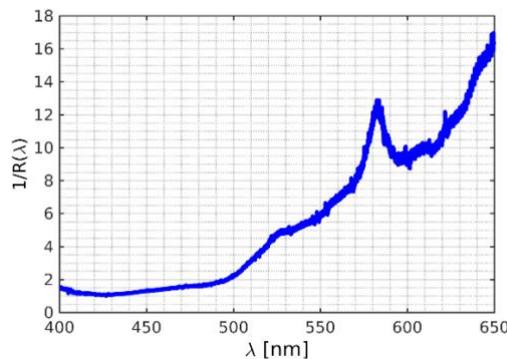


Fig. 26. Factor de corrección obtenido a partir de una lámpara halógena modelada por una curva de Planck. Notar el pico espurio en 580nm debido al hueco en la respuesta del sensor.

A partir de esta corrección podemos ver como se recomponen los espectros medidos de distintas fuentes. Un primer ejemplo es algo ya ilustrado en la Fig. 21(a) donde al medir el espectro del láser de 405nm, a longitudes de onda mayores apareció una luminiscencia que puede atribuirse al fenómeno de fluorescencia del papel utilizado como difusor. Esto puede confirmarse midiendo el mismo espectro sin

atenuar con dicho papel, situación en la que esa banda difusa en el azul desaparece. De observar el factor de corrección en la Fig. 26 se puede anticipar que el espectro probablemente se extienda más allá del límite aparente. Se vuelve a medir pero para aumentar la intensidad relativa de la fluorescencia se incide sobre el papel en ángulo de modo que la transmisión directa del láser no incida en la ranura. Se acerca el papel a la ranura y se registra el espectro (Fig. 27(a)). En la Fig. 27(b) se ilustra el espectro medido en el rango indicado en la Fig.27(a) y el resultado de la corrección. Se ve el hueco en la región amarilla pero todavía se vuelve a ver cierta señal hacia el rojo, indicando que el ancho de la fluorescencia es mayor al aparente. Con línea partida se indica cualitativamente la forma del espectro de no existir este defecto en el sensor.

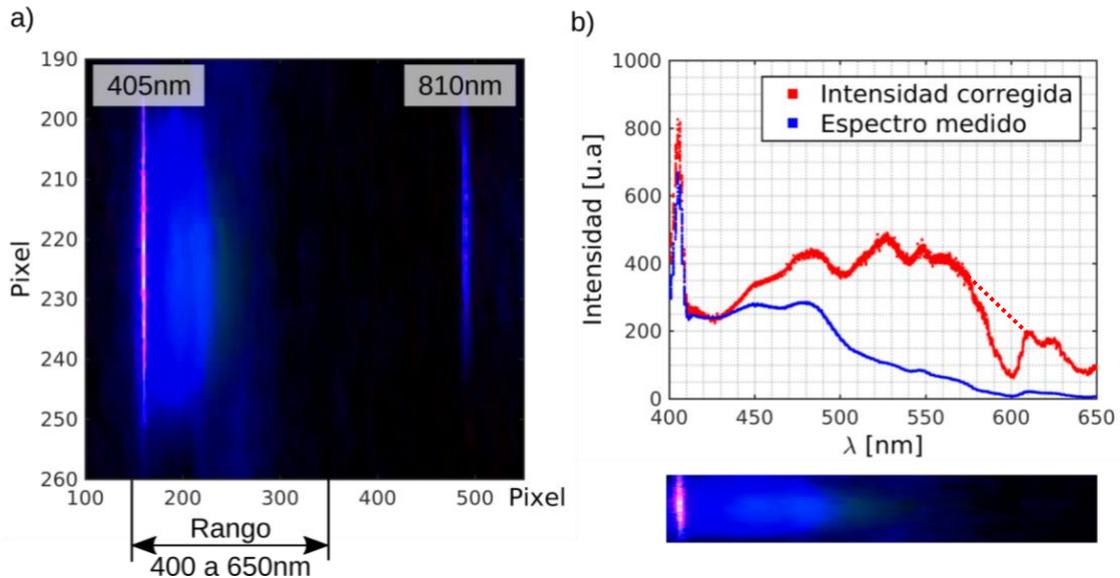


Fig. 27. a) Imagen y b) espectro de fluorescencia del papel difusor excitado con un láser de 405nm y su corrección con el factor 1/R

Como alternativa a la medición de fluorescencia del papel se puede proponer a otros grupos medir un led blanco. Cabe hacer notar que dicho led consiste en un emisor azul y un recubrimiento fluorescente que cubre el dispositivo y convierte la luz azul en otros colores del espectro (de mayor longitud de onda). En las Fig. 28(a) y Fig. 28(b) se ve el resultado de esta medición donde se aprecia el pico azul del LED original y el ancho espectro de fluorescencia. Nuevamente la corrección se evidencia necesaria para una correcta evaluación cuantitativa del espectro resultante.

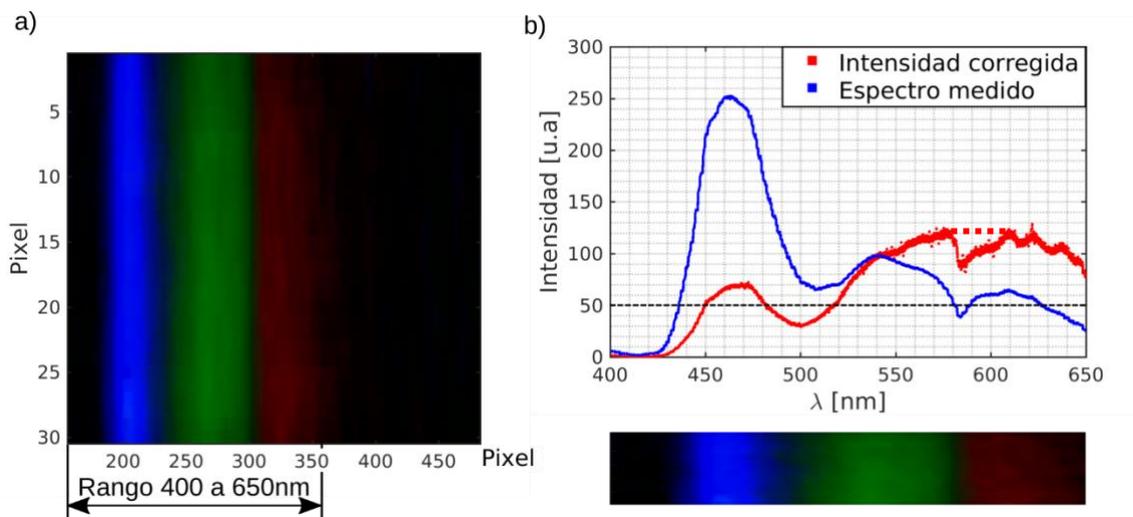


Fig. 28. a) Imagen y b) espectro de fluorescencia de un led blanco y su corrección con el factor 1/R

Otras alternativas podrían ser medir la fluorescencia de marcadores resaltadores comerciales (fluorescentes) excitados por distintos láseres (punteros violeta y verde según el color del marcador).

## 8. Conclusiones

Hemos presentado, a partir de la excusa de construir un instrumento, un recorrido a lo largo de varias clases de laboratorio, discusiones conjuntas y problemas para incorporar y visualizar los conceptos y fenómenos de la óptica. Se mostró que el espectrómetro tiene la simplicidad conceptual de poder dibujarse en un esquema sencillo y la complejidad conceptual de abarcar en cada detalle constructivo una gran diversidad de fenómenos a tener en cuenta. La multiplicidad de actividades es tan amplia que se recomienda distribuir algunas tareas entre diversos grupos de estudiantes y así además fomentar el intercambio de información, su documentación y aprender a una construcción colectiva del conocimiento. Lo presentado son solo algunos ejemplos y en la práctica muchos otros pueden aparecer. Por ejemplo no hemos discutido, y puede ser parte del trabajo, que si la cámara mira en forma perpendicular a la red de difracción, maximiza la linealidad de la respuesta espectral pero minimiza la resolución espectral. Como esto quedan muchos detalles para continuar la discusión.

### Agradecimientos

Partes de este trabajo fueron presentadas en el congreso 107a Reunión de la Asociación Física Argentina en el artículo "Construyendo un espectrómetro con una impresora 3D y una webcam. Casi toda la óptica en un solo experimento" año 2022.