

Diffraction of light by counting photons: an excuse to learn to measure

Difracción de la luz contando fotones: una excusa para aprender a medir

F. Zaldivar Escola^{1,2*}, E. Jan¹, G. A. Sanchez³, A. M. Lacapmesure^{2,3}, O. E. Martinez^{2,3}

1. Laboratorio de Haces Dirigidos, Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, U.B.A.

2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

3. Laboratorio de Fotónica, Instituto de Ingeniería Biomédica, Facultad de Ingeniería, U.B.A.

(*) E-mail: fzaldivar@fi.uba.ar

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received: 15/12/2022

Accepted: 04/05/2023

DOI: 10.7149/OPA.56.2.51123

ABSTRACT:

Performing laboratory practices during several days in which the students design the experiment allows them to delve into the concepts, focus on doubts and acquire more comprehensive notions of the subject. But above all it is more motivating and fun. With this in mind, a laboratory practice is proposed where students design and carry out an experiment where they acquire the diffraction pattern of a slit from counting individual photons, conducting a study on counting statistics and recovering, in the accumulation, the result expected by classical electromagnetism (optics). For this, they are offered a photomultiplier in photon counting mode together with simple, flexible and low-cost materials with which they can build their design, control the equipment and acquire the signals.

Key words:

Photon-counting, light diffraction

RESUMEN:

Realizar prácticas de laboratorio durante varias jornadas en las que los estudiantes diseñan el experimento les permite profundizar en los conceptos, focalizar las dudas y adquirir nociones más abarcativas de la temática. Pero por sobre todo es más motivante y divertido. Con esto en mente, se propone una práctica de laboratorio donde los alumnos diseñan y llevan a cabo un experimento para adquirir el patrón de difracción de una rendija a partir de contar fotones individuales, realizando un estudio sobre la estadística del conteo y recuperando, en la acumulación, el resultado esperado por el electromagnetismo clásico (la óptica). Para ello se les ofrece un fotomultiplicador en modo contador de fotones junto a materiales sencillos, flexibles y de bajo costo con el cual pueden armar su diseño, controlar el equipo y adquirir las señales.

Palabras clave:

Conteo de fotones, difracción de luz

REFERENCIAS Y ENLACES

[1] R. Eisberg, R. Resnick, *Quantum Physics 2nd Edition*, New York, John Wiley & Sons (1985).

[2] J. Solbes, V. Sinarcas, "Una propuesta para la enseñanza-aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias", *Revista de Enseñanza de la Física*. **23** (1), 57-84 (2010).

- [3] A. Segura, V. Nieto, E. Segura, “Un proceso de enseñanza-aprendizaje sobre fenómenos duales en la educación media”, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **6** (3) 482-486 (2012).
- [4] F. Savall Alemany, J. L. Domenech Blanco, J. Martínez Torregrosa, “La introducción del concepto de fotón en bachillerato”, *Enseño de Física* **35**(2), 2404-14 (2013).
- [5] Ö. Özcan, “What are the students’ mental models about the “spin” and “photon” concepts in modern physics?” *Procedia Social and Behavioral Sciences* **15**, 1372–1375 (2011).
- [6] Y. G. Berrios Saavedra, M. A. Ramos Bonilla “El experimento del efecto fotoeléctrico para la comprensión del concepto de cuantización de la energía de la radiación”. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*. (Bogotá, Colombia). 11. 175. (2016).
- [7] A. Cassini, M. L. Levinas, “La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico: un análisis histórico-epistemológico”, *Rev. latinoam. filos.* **34** (1), 1-15 (2008).
- [8] P. Koczyk, P. Wiewiór, C. Radzewicz, “Photon counting statistics -Undergraduate experiment”, *Am. J. Phys.* **63**, 240-245 (1996).
- [9] M.L. Martinez Ricci, J. Mazzaferri, A.V. Bragas, O.E. Martinez, “Photon counting statistics using a digital oscilloscope”, *Am. J. Phys.* **75**, 707-712 (2007).
- [10] E. J. Galvez, “Resource Letter SPE-1: Single-Photon Experiments in the Undergraduate Laboratory”, *Am. J. Phys.* **82**, 1018-1028 (2014).
- [11] J. F. Cyranski, “Measurement theory for physics”, *Foundations of Physics* **9**, 641–671 (1979).
- [12] Arduino in education, <https://www.arduino.cc/education>
- [13] O. E. Martinez, *Ondas es física*, Buenos Aires, Eudeba (2010).
- [14] Hoja de datos del contador de fotones, www.hamamatsu.com
- [15] Hoja de datos del fotodiodo, <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26251/VISHAY/BPW34.html>
- [16] Optical Cage Systems from Thorlabs, https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2002
- [17] Repositorio que contiene las piezas 3D y los códigos desarrollados en este trabajo, <https://github.com/EmilianoJan/PhotonCounter>
- [18] M. Tupac-Yupanqui, C. L.Vidal-Silva, A. Sánchez-Ortiz, F. Pereira, “Experiences and benefits of using Arduino in a first-year programming course”, *Formación Universitaria* **14**(6), 87-96 (2021).
- [19] Hoja de datos del CNC Shield , <https://github.com/staticboards/sb-cnc-shield>
- [20] Guia de Motores paso a paso, <https://www.staticboards.com/showpost.php?postID=36>
- [21] Hoja de datos del driver A4988, <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/455036/ALLEGRO/A4988.html>
- [22] Sitio web de Universal G-Code Sender, https://winder.github.io/ugs_website/
- [23] Repositorio de la biblioteca GRBL, <https://github.com/gnea/grbl>

1. Introducción

El aprendizaje de la física cuántica y en particular de la dualidad onda partícula de la luz [1], en los primeros años de la formación de estudiantes de grado de carreras de ingeniería o ciencias exactas presenta un gran desafío que, desde hace varios años, se intenta abordar incluso en la educación media [2-4]. Principalmente, esto se debe a que no existe un concepto cotidiano del comportamiento corpuscular de la luz [5]. Los cursos iniciales de ondas clásicas suelen hacer analogías con ondas de sonido o vibraciones mecánicas para entender los fenómenos de interferencia y difracción de la luz. Esto deja al alumnado con una base incompleta que se intenta corregir en cursos posteriores. Una de las formas de abordar el tema parte del estudio del efecto fotoeléctrico [6] y de la interpretación de Einstein [7] de la luz compuesta por cuantos de energía (fotones). Sin embargo, en ese famoso experimento explora el extremo opuesto en el cual no se observa el comportamiento ondulatorio de la luz. Lo mismo suele suceder en los laboratorios de enseñanza en universidades, en los cuales la discusión en experimentos de conteo de fotones es principalmente orientada a estudios estadísticos [8-10] que revelan la naturaleza cuántica de la luz, dejando de lado todo análisis ondulatorio, y se basan en configuraciones predefinidas donde los diferentes grupos de estudiantes no participan en el diseño.

Paralelamente, y afectando a muchas áreas de la formación, otro desafío reside en el aprendizaje de los alumnos en la teoría de la medida [11]. El aprender a medir no está vinculado directamente al entendimiento de un fenómeno particular, sino que la experiencia adquirida forma o refuerza las bases para enfrentarse a un nuevo problema.

En este contexto, la realización de prácticas de laboratorio extendidas en varias jornadas les da la oportunidad a los alumnos de diseñar, repetir y corregir un experimento, de forma de reforzar conceptos y perfeccionar sus aptitudes para la medición, así como en el entendimiento general del tema que se estudia.

El diseño de un experimento en sí puede darse como parte del aprendizaje, ya que requiere de un proceso en el cual se debe tener en mente que se desea observar y, para ello, cuáles son las condiciones para poder detectarlo. Así mismo, mientras más versátil sea el instrumental disponible, mayores serán las posibles configuraciones que se puedan diseñar.

Con el comienzo del nuevo siglo se ha desarrollado una nueva gama de plaquetas electrónicas multipropósito con microcontroladores, tales como el Arduino UNO [12], que presentan una herramienta versátil y de bajo costo para el diseño de experiencias de laboratorio. Además, la impresión 3D simplifica la construcción de experimentos, permitiendo fácilmente crear prototipos o simplemente módulos acoplables que los alumnos pueden intercambiar.

En este trabajo presentamos una configuración posible con la que los alumnos pueden adquirir el patrón de difracción de una rendija contando fotones individualmente. De esta manera, a partir de la acumulación, pueden observar el resultado de la óptica clásica y obtener conclusiones del comportamiento dual de la luz.

Tanto la estructura como la electrónica de control utilizada es de disponibilidad abierta, dándoles la oportunidad de realizar modificaciones y optimizaciones, discutir formas de poner en manifiesto el fenómeno, mejorar el proceso de medición y realizar un análisis estadístico de las mediciones.

El documento aquí presentado puede considerarse como una guía para docentes para la presentación de la experiencia de laboratorio a los alumnos. La discusión de las etapas de interacción con los alumnos es acompañada de ejemplos de medición concretos a partir de la configuración propuesta.

2. Presentación del problema

En todo proceso de aprendizaje, la motivación es fundamental para lograr los objetivos. La experiencia propuesta está dirigida a estudiantes de grado que hayan adquirido los conocimientos básicos de óptica física, física cuántica y estadística. Bajo este contexto, es natural la presentación de la problemática a partir de un conjunto de preguntas que permitan a los alumnos darles tiempo a ordenar, completar o corregir los conceptos que hayan adquirido previamente.

Partiendo del principal interrogante que se busca responder a través de esta experiencia: **¿Cómo es la transición de detectar un solo fotón en un experimento de difracción a ver toda la figura prevista por la óptica física?**, proponemos iniciar la discusión con un experimento clásico de difracción en el cual un láser de longitud de onda λ atraviesa una rendija rectangular de ancho d , y se observa el patrón en una pantalla colocada a una distancia lejana L , tal que se cumple la condición de Fraunhofer $d^2 \ll \lambda L$ [13]. En este experimento se verá que la intensidad en la pantalla varía en función del ángulo $\theta \sim y/L$ (ver figura 1) formando un patrón con máximos y mínimos, donde el m -ésimo mínimo cumple la relación:

$$\theta_m = m \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

a excepción del caso $m=0$, que es donde el patrón de difracción alcanza su máximo principal.

De esta manera, algunas preguntas para generar la discusión con los alumnos son, ¿qué sucedería si se enviara sólo un fotón a través de la rendija?, ¿cómo se explica el comportamiento ondulatorio en este caso?, ¿puede ser detectado por más de un observador?, ¿qué esperan ver a medida que se incrementa el flujo? Estas preguntas buscan iniciar una discusión constructiva entre y con los alumnos donde se desarrollen ideas que vinculen los paradigmas aprendidos. Desde el punto de vista de la ciencia moderna basada en evidencia, la discusión lleva en última instancia a las preguntas: ¿qué experimento proponen para poner a prueba estas ideas? y ¿qué necesitan para realizarlo? Las respuestas a estos interrogantes surgirán a lo largo de las siguientes etapas.

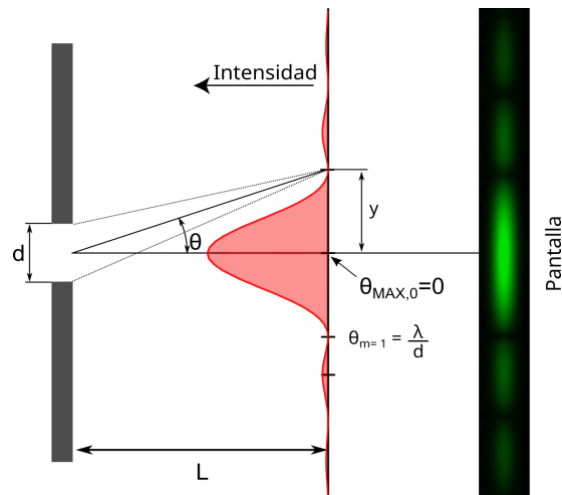


Fig. 1. Patrón de difracción de una rendija de tamaño d sobre una pantalla a distancia L . La fuente de luz posee una longitud de onda λ . A la derecha se ilustra el patrón de intensidades observado en la pantalla.

3. Descripción del material propuesto.

El reconocimiento de los alumnos del material disponible les da la oportunidad de comenzar a definir las ideas sobre los métodos que usarán para poner en manifiesto el fenómeno estudiado. La elección de los elementos definitivos es un ejercicio de sumo interés para la formación de los alumnos puesto que requiere investigar sobre las prestaciones de los equipos, identificar los parámetros relevantes para el experimento y las limitaciones experimentales que puedan existir. Por este motivo, durante el estudio preliminar de la práctica resulta provechoso introducir a los alumnos en la variedad de instrumental posible y guiarlos en la elección del material a utilizar. En esta sección se describen propuestas que permiten la versatilidad de los experimentos con una fuerte orientación al estudio de la difracción de luz y conteo de fotones, pero que no se agotan en tales aplicaciones.

3.a. Emisores y detectores de luz

Como en todo experimento de óptica cuántica, será necesario emplear emisores y detectores de luz. Aquí las opciones son variadas pero pueden reducirse, para la emisión, al uso de lámparas de filamento, LEDs, láseres o fuentes emisoras de fotón único y, para la detección, al uso de fotodiodos y de fotomultiplicadores que operan en modo analógico o en modo conteo de fotones.

En este trabajo se propone utilizar un láser como fuente de luz dado que facilita la observación del patrón de difracción debido a su alta coherencia. Dentro del amplio abanico de posibilidades, en particular los láseres de diodos presentan grandes ventajas debido a su alta disponibilidad en el mercado, bajo costo, pequeñas dimensiones y facilidades de control variando únicamente la corriente de alimentación. De esta manera, el diodo láser puede ser alimentado mediante una fuente DC regulada conectada a una resistencia en serie para limitar dicha corriente, lo cual permite variar la potencia de emisión a partir del cambio de la tensión DC. Cabe destacar que podrían producirse variaciones en la longitud de coherencia al cambiar la corriente de alimentación. Esto se vuelve más notorio cuando se lo opera cerca de su umbral de emisión, pudiéndose observar por ejemplo, con un espectrómetro, el paso del modo LED (del inglés *Light-Emitting Diode*) al modo láser, como una reducción en el ancho del espectro de emisión. Esto suma un interrogante para los alumnos, dado que pueden discutir qué efectos tendría en la figura de difracción este cambio en la coherencia.

A lo largo del desarrollo de este trabajo se utilizó un láser de Blu-Ray con una longitud de onda de 405 nm y una potencia máxima de 150 mW. Dependiendo de la configuración experimental y la cantidad de etapas que los alumnos consideren, esta potencia máxima podría ser innecesariamente elevada. Por razones de seguridad (tanto para los alumnos como para los detectores) y para garantizar que el diodo emita en el modo láser, se recomienda ofrecer a los alumnos diodos láseres con potencia de emisión en diversos rangos (por ejemplo 5mW, 50mW y 150mW), con el fin de que siempre utilicen el de menor potencia máxima que sirva para cubrir los requerimientos del experimento que diseñaron. Adicionalmente, dado que el circuito

propuesto de alimentación del láser incluye una resistencia limitadora de corriente en serie, podrá elegirse la misma de modo que se impida alcanzar valores de potencia peligrosos tanto para los alumnos como para el instrumental.

Para la detección de luz se propone utilizar dos tipos de detectores. Por un lado se utiliza un fotomultiplicador de alta calidad y bajo ruido de oscuridad Hamamatsu H7828-50 [14] para llevar a cabo el conteo de fotones. Este tipo de detectores presenta la sensibilidad necesaria para la detección de fotones únicos con buena eficiencia en el visible, mientras que facilita la instrumentación puesto que incluye los módulos electrónicos de discriminador y conformación de pulsos. Debe aclararse que, si bien el detector posee la sensibilidad mencionada, las fuentes más accesibles de fotones (láseres, leds o lámparas) no emiten fotones únicos de manera controlada, sino que emiten en estados con mayor o menor probabilidad de aglomeración de fotones en un dado intervalo de tiempo. Es por esto que, a medida que se aumenta la potencia que llega al detector (tasa de conteo), aumenta la probabilidad de perder cuentas por superposición de fotones dentro de la ventana de discriminación. Esto puede ser verificado por los alumnos, por ejemplo midiendo la tasa de conteo en función de la corriente inyectada al láser para ver cómo, a altas tasas, se pierde linealidad entre la potencia y la tasa de conteo.

Por otra parte se utiliza un fotodiodo económico de silicio Vischay BPW34 [15] para obtener una señal analógica de comparación. El contraste entre ambas tecnologías permite discutir sobre conceptos fundamentales respecto al trabajo experimental, como sensibilidad, ruido, límites de detección, rango dinámico, etc. La figura 2 muestra una fotografía de los detectores propuestos junto con su respuesta espectral provista por cada fabricante. El análisis de estas curvas y su comparación, permite a los estudiantes familiarizarse con las unidades y entender cómo es la conversión de flujo de fotones a Watts.

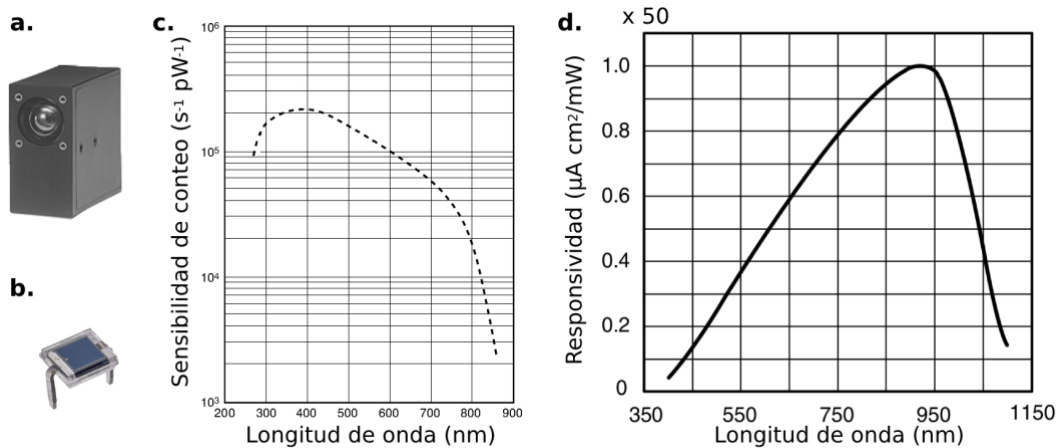


Fig. 2. Detectores utilizados y su respuesta espectral: módulo contador de fotones Hamamatsu H7828-50 (a. y c.) y fotodiodo BPW34 (b. y d.). Las curvas fueron adaptadas de las especificaciones provistas por los fabricantes.

Dada la sensibilidad de los detectores, la necesidad de reducir el ingreso de fotones ajenos a la fuente de emisión y para evitar el contacto de los alumnos con el láser, y así minimizar los riesgos, se recomienda que los experimentos sean realizados dentro de gabinetes cerrados, forzando a que el láser sólo pueda encenderse si la tapa se encuentra cerrada.

3.b. Componentes ópticos

Es necesario un conjunto de elementos ópticos básicos, tales como espejos, semiespejos y atenuadores, para poder direccionar hacia el detector una cantidad controlada de la luz emitida por la fuente. A su vez, para lograr la difracción es necesario obstaculizar parcialmente el haz. Esto puede lograrse de diversas maneras, siendo lo más simple, en experimentos introductorios del fenómeno de difracción, el uso de una única rendija (ver figura 1) o de arreglos periódicos de rendijas (redes de difracción). Sin embargo, esto último conlleva a la aparición de máximos secundarios cuya detección exige una mayor resolución angular en el experimento que en el caso de la rendija simple.

En este trabajo proponemos que los alumnos fabriquen por sí mismos una rendija simple, por ejemplo utilizando hojas de afeitar enfrentadas y adheridas a un soporte. Respecto a los espejos y semiespejos, se utilizan cubreobjetos recubiertos con diversos metales, mientras que para los atenuadores se utilizan plásticos coloreados. De esta manera, el conocimiento de los factores de transmisión, reflexión y atenuación puede ser determinado por los mismos alumnos.

3.c. Optomecánica

El armado mecánico de todas las piezas se realiza mediante la impresión 3D de piezas basadas en adaptaciones de los planos provistos por la empresa Thorlabs con la tecnología de estructuras tipo *cage system* [16], y algunos soportes específicos para los componentes particulares que se utilicen. De ser necesario, y a partir de la experiencia adquirida por los alumnos a lo largo de las diferentes jornadas, se imprimen nuevas piezas mejoradas. La figura 3 muestra el conjunto de las piezas optomecánicas propuestas, donde además se aclara su función. El ensamblaje se realiza mediante varillas de latón trefilado de 6mm de diámetro que se introducen en los orificios de las piezas (utilizando tornillos para sujetar la pieza si fuese necesario), de modo que el conjunto resulta económico, robusto y altamente versátil para armar, desarmar y reconfigurar los experimentos.



Fig. 3. Elementos de optomecánica fabricados mediante impresión 3D descargables desde [17] y varillas de latón empleadas para el ensamblado.

3.d. Electrónica de control y adquisición

Para la instrumentación del equipo proponemos un conjunto de electrónica de control y adquisición basada en tecnología de desarrollo libre y programación amigable, además del equipamiento típico presente en un laboratorio tal como osciloscopio, generador de funciones, fuentes de tensión regulables y multímetros. La figura 4 muestra una fotografía de los elementos propuestos.

Dado su bajo costo, conectividad y facilidad para ser programado, una excelente opción es el uso de las placas de código abierto Arduino UNO [18]. Estas placas poseen 14 pines digitales que pueden utilizarse como entrada o salida de los cuales 6 son configurables como PWM (modulación de ancho de pulso, por sus siglas en inglés), 2 son configurables como pines de interrupción (usados para la ejecución de tareas secundarias durante lapsos de interrupción de un hilo de ejecución), 2 como pines de conteo (útiles para contar pulsos), y 6 pines de entradas analógicas, todos programables con el entorno de desarrollo integrado Arduino IDE. La conexión con la placa puede establecerse con una PC o un dispositivo móvil tal como un celular o una tableta mediante un cable USB o mediante WIFI (dependiendo la versión). Además existen diferentes módulos acoplables que permiten extender las capacidades de la misma. En este contexto, es que proponemos la incorporación de los módulos CNC *shield* [19] y módulos controladores de motores paso a paso [20] como el A4988 [21]. En cuanto al motor paso a paso particular a utilizar, tanto las opciones posibles como su disponibilidad en el mercado son variadas. En este trabajo se utilizó un motor paso a paso modelo SUNCOR SC42STH33AC-1304AF. Este conjunto permite no solo la automatización de etapas sino el control preciso de desplazamientos.

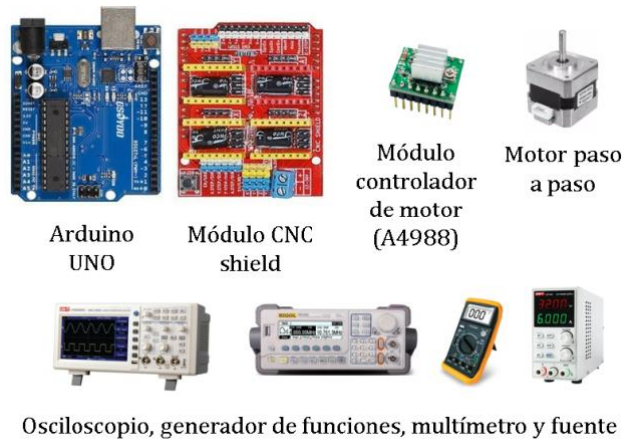


Fig. 4. Electrónica de control y adquisición propuesta.

4. Etapas básicas

4.a. Diseño

Una vez que los alumnos conocen el instrumental disponible, la etapa de diseño comienza con el planteo de un esquema que permite tener un panorama global y definir los parámetros libres. En esta etapa los alumnos tienen la oportunidad de pensar cómo generar el efecto de difracción que desean estudiar y qué usarán para detectarlo.

La figura 5 muestra la propuesta de un esquema preliminar para la medición de la figura de difracción de un haz de luz láser que atraviesa una rendija de ancho d , utilizando los dos detectores mencionados en la sección 3.a en forma simultánea. La luz difractada por dicha rendija es reflejada en un espejo montado sobre un soporte rotatorio motorizado, el cual permite barrer la figura de difracción sobre el detector. En el camino del haz hacia el detector se interponen atenuadores para evitar su saturación y un *pinhole* de diámetro D para reducir el ángulo sólido captado por el mismo. Asimismo se utiliza un semiespejo que divide el haz dirigiendo la mayor parte de su intensidad hacia el fotodiodo. Todos estos elementos se hallan dentro de una caja cerrada para favorecer la oscuridad, de la cual únicamente salen los cables de conexión con los instrumentos de control y adquisición.

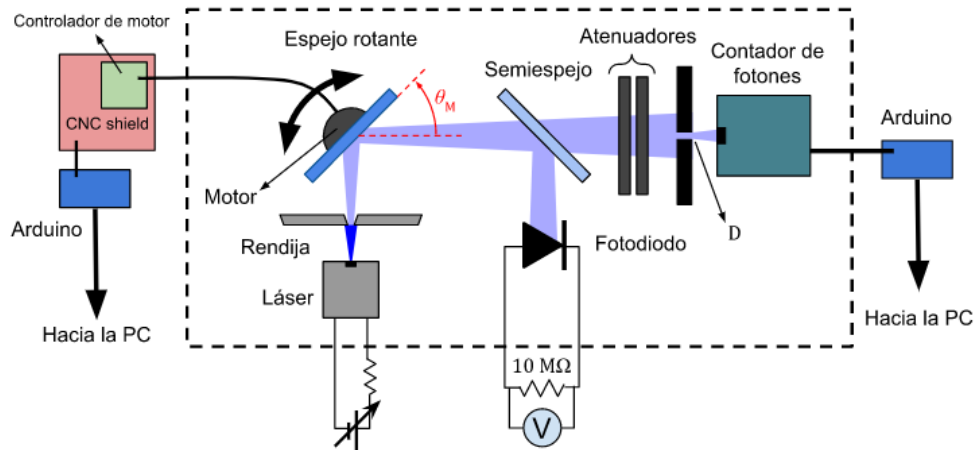


Fig. 5. Esquema propuesto para la medición de la figura de difracción contando fotones. Los elementos encerrados en el recuadro punteado se ubicaron en una caja estanca para favorecer la oscuridad.

4.b. Caracterización

Previo al armado del equipo con los elementos de la sección 3, los alumnos deben conocer las especificaciones de los componentes y realizar las caracterizaciones correspondientes para poder definir distancias entre los mismos, las dimensiones de las aberturas y las intensidades necesarias en orden de garantizar la correcta observación del fenómeno con una cierta resolución esperada. Basándose en el esquema propuesto de la figura 5, surgen un gran número de nuevas incógnitas que los alumnos deberán ir

resolviendo a lo largo de esta etapa. Podemos preguntarnos, ¿siempre que llegue un fotón al fotomultiplicador, este lo detectará?, ¿cómo se sabe que el fotón detectado por el fotomultiplicador, corresponde a uno emitido por el láser?, ¿de qué depende la resolución que puede lograrse para una dada configuración?, ¿qué sucede al variar el diámetro del *pinhole*?

Para ir respondiendo estos interrogantes, comenzamos con una descripción del detector Hamamatsu H7828-50, el cual, según el fabricante, posee una resolución de par de pulsos de 70 ns. La figura 6 muestra el promedio de 128 pulsos del detector adquiridos mediante un osciloscopio y una resistencia de 50 Ω en paralelo. Puede observarse una anchura de los pulsos a media altura (FWHM) de 28 ns y una amplitud pico de 3.6 V, lo cual es consistente con las especificaciones del fabricante. De esta manera, ya es posible notar un primer limitante para el conteo de fotones y es la posibilidad de que estos lleguen en tiempos menores a los que el detector puede interpretar. A una longitud de onda de 405 nm, 1 fotón cada 70 ns equivale a una potencia de 7×10^{-12} W incidiendo sobre el detector, por lo cual típicamente será necesario atenuar el haz con los atenuadores y controlando el diámetro del *pinhole*. Otro limitante será la velocidad de respuesta de la electrónica utilizada para el conteo, lo cual determinará la eficiencia con la que se realice dicho conteo. En el caso particular de un Arduino UNO, la eficiencia de conteo fue caracterizada inyectando, con un generador de funciones en un pin de conteo, una señal cuadrada de 1 MHz y ancho temporal variable para simular los pulsos del detector. Como puede observarse en la figura 7, para el ancho de pulso del detector utilizado, esta eficiencia es de aproximadamente un 50%.

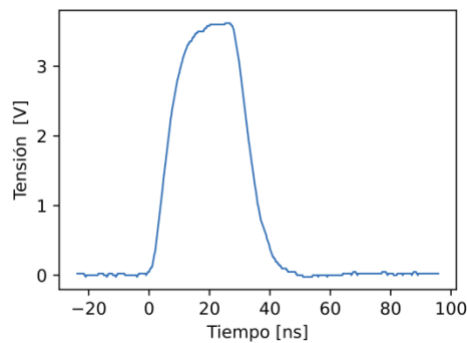


Fig. 6. Promedio de 128 pulsos del detector Hamamatsu H7828-50

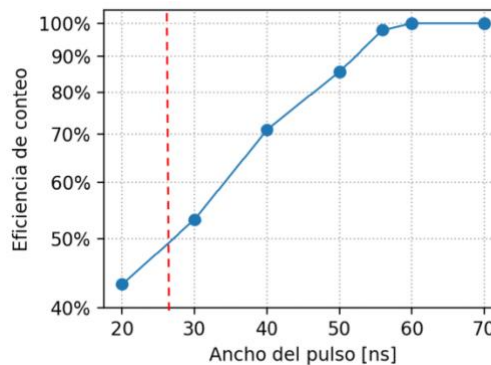


Fig. 7. Eficiencia de la placa Arduino para contar pulsos de distinto ancho temporal, a una tasa de arribos fija de 1 MHz. La línea de trazos indica el valor del ancho de pulsos del detector utilizado en los experimentos de conteo de fotones.

Para estimar cuántos fotones detectados corresponden a fotones emitidos por la fuente debemos conocer las cuentas de oscuridad y cuentas de fondo. Las cuentas de oscuridad corresponden a pulsos generados en el fotomultiplicador debido a fluctuaciones térmicas y no están asociadas directamente al ingreso de un fotón. Estas son especificadas por el fabricante, pero una caracterización minuciosa requerirá medir el número de pulsos emitidos por unidad de tiempo en condición de oscuridad, aislando el detector de perturbaciones externas. Para ello se realizó un experimento de conteo de pulsos en una habitación oscura y cubriendo la totalidad del detector con papel de aluminio, obteniéndose un valor medio de 55 cuentas/segundo. Por su parte, las cuentas de fondo corresponden a aquellas provenientes de cualquier fuente ajena a la señal que se quiere medir y tienen como valor mínimo las cuentas de oscuridad previamente medidas. Siendo que son dependientes de condiciones del laboratorio, es conveniente hacer

una medición de las mismas inmediatamente antes de una medición propia del experimento. En los experimentos mostrados en este trabajo, el valor medio de las cuentas de fondo resultó en 125 cuentas/segundo.

Para determinar la resolución espacial en la detección del patrón de difracción es necesario considerar las características del motor. El motor propuesto en la sección 3.d provee 200 pasos/vuelta, lo cual corresponde a una resolución por paso simple de $2\pi \text{ rad}/200 \text{ pasos} = 31,4 \text{ mrad/paso}$. Sin embargo, el módulo de control de motores permite operar el motor en modo multipaso, dividiendo cada paso en hasta un factor 16. Dado que, para el esquema propuesto, el haz se refleja sobre un espejo montado en el motor, el ángulo θ de desvío del haz (ver Fig. 1) será del doble del desplazado por el motor (θ_M , ver Fig. 5), obteniendo una resolución angular de $\Delta\theta = 3.9 \text{ mrad/paso}$. De esta manera, al realizar un barrido angular de la figura de difracción sobre el detector, se podrán adquirir $2N+1$ puntos del pico principal (definido entre sus valores mínimos) y N entre mínimos de difracción secundarios, con:

$$N \leq \frac{2\theta_{m=1}}{\Delta\theta} \quad (2)$$

Por otra parte, el ángulo colectado por el detector es definido por el diámetro D del *pinhole*, por lo que es conveniente tomar un valor dado por

$$D \leq 2L\Delta\theta \quad (3)$$

de modo de asegurar que siempre se colecte en una región de la figura de difracción menor o igual a la barrida.

5. Caso de estudio

En esta sección, se describe un ejemplo a través de un equipo armado en base al esquema propuesto de la figura 5, y utilizando el material descrito en la sección 3.

5.a. Armado de equipo

Las figuras 8 y 9 muestran un esquema tridimensional y una fotografía del equipo construido. La rendija fue construida enfrentando dos hojas de afeitar tal como se indicó en la sección 3.b, y pegándolas con un adhesivo polimérico de secado rápido sobre un porta filtro. Para conocer el ancho de la misma se realizó un experimento simple de difracción, como el de la figura 1, en el cual a partir de la medición del ancho del máximo principal del perfil de intensidad (distancia entre mínimos $(\theta_{m=1}-\theta_{m=-1})L$), se obtuvo $d = (14,6 \pm 0.4) \mu\text{m}$.

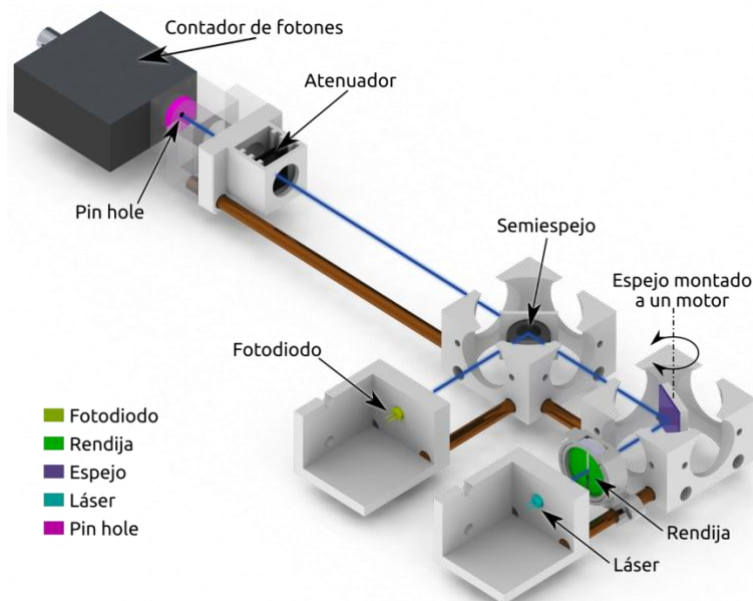


Fig. 8. Esquema del equipo construido.



Fig. 9. Fotografía del equipo construido.

El láser fue colocado a 30 mm de la rendija, de modo que la distancia equivalente desde la rendija al detector fue de $L = 277$ mm. A partir de la definición de las distancias d y L , se tiene que los parámetros definidos en las ecs. (1), (2) y (3), para este experimento resultan:

$$\begin{cases} \theta_m = m(2.8 \times 10^{-2} \text{ rad}) \\ N = 7 \\ D \leq 2.1 \text{ mm} \end{cases} \quad (4)$$

Además del contador de fotones se utilizó el fotodiodo mencionado en la sección 3.a para adquirir en simultáneo una señal analógica con la cual comparar la señal digital de conteo, permitiendo analizar las ventajas del modo de conteo en términos de la sensibilidad de detección y el ruido. Para ello se interpuso un semiespejo (transmisión $\sim 20\%$, reflexión $\sim 80\%$) tras la rendija que refleja la mayor parte de la potencia del haz hacia el fotodiodo, el cual fue ubicado a 198 mm de la rendija y tiene un área sensitiva de 3×3 mm², de modo que el ángulo efectivo de colección es de 15.2 mrad.

Se alimentó el láser por encima de su umbral de modo que su potencia óptica a la salida fuera de 4.3 mW, y la potencia del haz transmitido por la rendija fuera de 8 μ W, suficiente para ser detectado por el fotodiodo. El diámetro D del *pinhole* fue de 1 mm, lo cual cumple con la condición de la ecuación (4) y reduce el ángulo de colección del contador de fotones a 3.2 mrad, comparable con el paso del motor. Además se interpusieron dos atenuadores de transmisión $T=4\%$ frente al *pinhole* para evitar la saturación del detector.

La salida del contador de fotones fue conectada a uno de los pines digitales de la placa Arduino configurado como entrada. Para adquirir la señal se desarrolló un programa de Arduino que permite operar en dos modos distintos: uno para el conteo de los pulsos registrados y otro para la medición de tiempos entre arribos de pulsos, los cuales se describen en las secciones 5.a.1 y 5.a.2 respectivamente. El programa se puede configurar a través de constantes definidas al comienzo del código que determinan los tiempos de adquisición y los parámetros del procesamiento de datos. Esto facilita que los alumnos se interioricen en la instrumentación por software a partir de determinar dichos valores en función de los requisitos del experimento, incluso pudiendo realizar modificaciones y mejoras al código para extender el estudio más allá de lo propuesto, debido a que se trata de código abierto y a la facilidad de programar las placas Arduino UNO. El programa desarrollado se encuentra disponible en un repositorio de uso libre [17].

El control del motor se realizó mediante una segunda placa Arduino UNO utilizando un esquema análogo al de máquinas de Control Numérico Computacional (CNC) basadas en esta tecnología, ampliamente disponible en el mercado. El motor se conecta al controlador A4988 que recibe alimentación de una fuente externa para proveer de corriente a las bobinas del motor. Dicho controlador se conecta al módulo CNC *shield* que se ensambla directamente sobre la placa Arduino UNO. El software de control utilizado consiste en dos repositorios de código abierto: por un lado, el software de control Universal G-Code Sender [22] que se ejecuta en una PC para configurar y controlar el motor a partir del envío de comandos a la placa Arduino en lenguaje G-Code (de uso estándar en máquinas CNC) mediante una interfaz gráfica, y por otro la biblioteca GRBL [23], que se ejecuta en la placa Arduino y se encarga de leer dichas señales y controlar la corriente de las bobinas. Si bien el software descrito provee un gran número de funciones y prestaciones,

en este trabajo solo se utilizaron las mínimas funciones necesarias para barrer la posición del motor: configurar los puertos de entrada y salida, parámetros de alimentación del motor y el tamaño del paso del barrido, así como ejecutar el inicio y detención del movimiento.

Se desarrollaron dos códigos que se ejecutan en el Arduino UNO, un código permite contar la cantidad de fotones en intervalos regulares configurables, mientras que el segundo mide el tiempo entre fotones. Cargando los diferentes códigos a la placa controladora se pueden realizar las diversas mediciones.

5.a.1. Cuentas cada intervalos regulares

El código emplea para el conteo el pin número 5 (PD5) de la placa. Dicho pin tiene la capacidad de incrementar una variable de 16 bits cuando se detecta un flanco ascendente, sin la necesidad de que la cuenta sea realizada por el procesador. Este conteo independiente es logrado empleando lógica interna del microcontrolador, la cual usualmente se emplea para el reloj interno 1. El programa configura el conteo por flanco ascendente y luego espera un tiempo configurado. Una vez transcurrido el tiempo, se lee el registro TCNT1 en donde se encuentra la suma total de cuentas. Este registro puede almacenar números naturales desde 0 hasta el 65534. El límite de detección de pulsos para el Arduino UNO se encuentra en los 3MHz, con lo cual para un tiempo de conteo de 20ms, el registro en donde se almacena las cuentas nunca desbordará, estableciendo de esta forma un criterio para el tiempo de conteo. El valor del registro es enviado por puerto serie hacia la computadora y se reinicia el ciclo de conteo. La figura 10 muestra el diagrama de flujo del código.

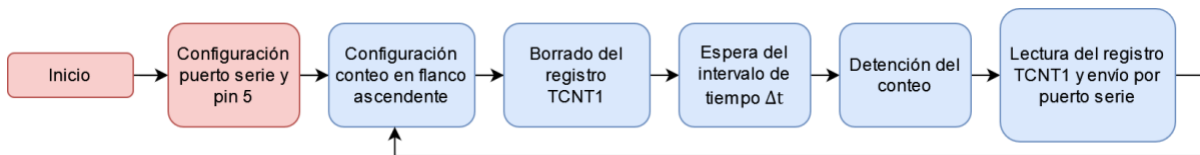


Fig. 10. Diagrama de flujo del código implementado en el Arduino UNO para el conteo de fotones. Cada 20ms se devuelve por puerto serie la cantidad registrada de fotones.

5.a.2. Tiempo entre fotones

Para realizar la medición del tiempo entre fotones se requirió programar una nueva lógica que pueda realizar dicho estudio. Como el objetivo es extraer un histograma del tiempo entre fotones se propuso que el Arduino UNO realice dicho histograma en vez de capturar los datos crudos y enviarlos por puerto serie. De dicha forma la comunicación por puerto serie solo se realiza luego de haber adquirido suficientes cuentas. El tiempo de medición puede configurarse desde el código siendo 10 segundos usualmente suficiente para observar tendencias en nuestras experiencias, aunque este es un valor que se espera que los alumnos definan a partir de sucesivas pruebas.

El código requiere que el pin 2 (PD2) sea conectado al contador de fotones dado que el pin tiene la facultad de generar una interrupción en el código. Cuando sobre este pin se detecta un flanco ascendente, el código que se está ejecutando es interrumpido, y la ejecución llama a la función encargada de medir la diferencia de tiempos entre flancos ascendentes. Dicha función cuenta el tiempo transcurrido desde la anterior llamada e incrementa la barra del histograma correspondiente. El histograma generado presenta una resolución de 10 μ s y 740 intervalos. Cada intervalo puede almacenar un número entero positivo hasta el 65534. Para intensidades de iluminación elevadas puede saturar. Una vez transcurridos los 10 segundos de medición, se envía por puerto serie la tabla que contiene al histograma. Una vez concluida la transmisión, se borran los datos y se inicializa una nueva serie. La figura 11 presenta el diagrama de flujo de la lógica.

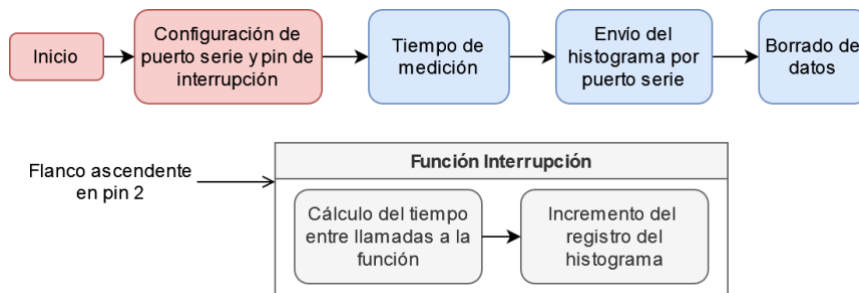


Fig. 11. Diagrama de flujo del código para la medición del tiempo entre fotones. Cada tiempos regulares se devuelve una tabla con las cuentas del histograma.

5.b. Medición del patrón de difracción

Para adquirir el patrón de difracción con ambos detectores se barrió el ángulo del espejo rotante en un intervalo que cubra el máximo principal de difracción y los primeros máximos secundarios a cada lado, utilizando el paso definido en la sección 4.b. Para cada ángulo, el programa de la placa Arduino UNO registra la cantidad de pulsos en ventanas temporales de ancho Δt configurable y escribe dicho valor en el puerto serie. El flujo del código se encuentra descrito en la sección 5.a.1. Al leer el puerto desde una PC con la herramienta provista en el software de Arduino IDE se obtiene una secuencia de valores correspondiente a los pulsos detectados en sucesivas ventanas, de modo que al sumar las cuentas de M sucesivas ventanas se puede variar el tiempo de integración efectivo $\tau = M\Delta t$ y así estudiar cómo varía el patrón observado debido a la estadística de arribo. Los parámetros M y Δt son definidos por los alumnos bajo las siguientes consideraciones: si Δt es muy pequeño, las cuentas de fotones serán despreciables respecto a las cuentas de oscuridad, mientras que si es demasiado grande se produciría el desbordamiento de los datos debido a la precisión de 16 bits en los valores enteros del código de Arduino. Asimismo M debe ser suficientemente grande para que la acumulación de cuentas permita distinguir los mínimos secundarios respecto del ruido. En nuestro trabajo se utilizó $\Delta t = 20$ ms y para cada ángulo adquirimos al menos $M = 100$ ventanas, correspondiendo a un tiempo de integración de al menos 2 s.

En la figura 12 se muestran los patrones de difracción reconstruidos para distintos tiempos de integración. Alumnos que hayan cursado materias de estadística, entenderán que el proceso de emisión de fotones puede modelarse mediante un proceso puntual de Poisson [9]. Si bien en la sección 5.c se discute en detalle la estadística del problema, veremos que sus efectos ya son percibidos en estas mediciones. Para tiempos de integración breves podemos ver que las fluctuaciones debido a la estadística de Poisson enmascaran los máximos secundarios bajo el ruido estadístico. Esto permite introducir al alumno las nociones de límite de detección en términos de la mínima intensidad de luz distinguible por sobre el ruido, el cual alrededor de los mínimos de difracción estará determinado por las fluctuaciones debido al fondo de señal. Para los valores de fondo indicados en la sección 4.b, la estadística de Poisson predice una desviación estándar de 1.6 cuentas/segundo que, tras corregir por la eficiencia de conteo de la placa Arduino y considerando la responsividad del detector, equivale a aproximadamente 1.7×10^{-18} W de potencia incidiendo sobre el detector.

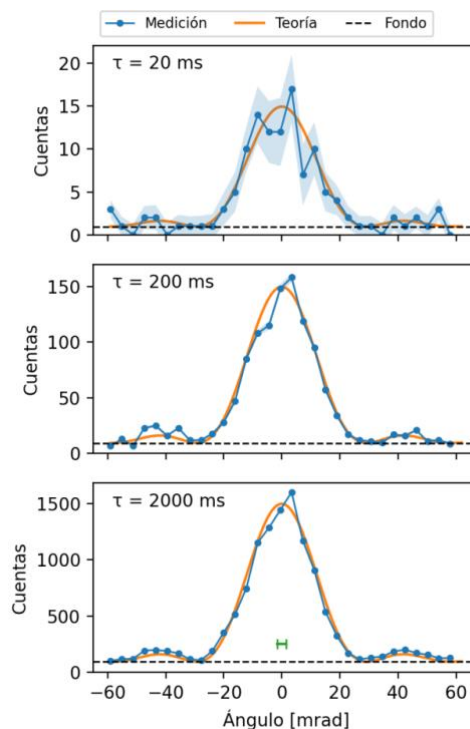


Fig. 12. Figura de difracción adquirida con el contador de fotones para distintos tiempos de integración. La línea naranja corresponde a la curva predicha por el modelo clásico. La región sombreada indica la incerteza estadística en el conteo, encerrando un intervalo de 2 desviaciones estándar alrededor de la curva medida. El segmento verde indica el ángulo colectado por el detector (3.2 mrad).

Al incrementar el tiempo de integración se puede ver cómo la acumulación reconstruye, en suma, la curva predicha por la teoría clásica de difracción, permitiendo vincular ambos paradigmas. Esto es una consecuencia directa de la estadística de Poisson, donde la incerteza relativa debido al error estadístico se reduce en un factor proporcional a $\sqrt{\tau}$. Vale la pena resaltar que, para tiempos de integración suficientemente altos, las diferencias entre la curva teórica y las mediciones ya no se explican por la incerteza estadística sino que responden a otros factores no tenidos en cuenta (errores sistemáticos, como pueden ser reflexiones espurias de luz externa). Esto abre la puerta a discutir posibles experimentos futuros para determinar la fuente de dichos efectos (por ejemplo, realizar barridos en condiciones de oscuridad para detectar la señal de fondo en función del ángulo de barrido).

En simultáneo se adquirió la misma figura de difracción mediante la señal analógica del fotodiodo. En esta configuración, el tiempo de integración estuvo determinado por el ancho de banda de la electrónica de adquisición (considerando la capacitancia del fotodiodo y la resistencia de carga de 10 M Ω provista por el multímetro), mientras que el límite de detección está determinado por la incerteza en la detección con el multímetro: 1 mV/10 M Ω = 0.1 nA, lo cual, considerando la responsividad del fotodiodo, equivale a aproximadamente 3×10^{-9} W en el detector. El patrón de difracción adquirido se muestra en la figura 13, donde puede verse que los máximos secundarios apenas logran apreciarse debido a la limitada sensibilidad del fotodiodo. Asimismo la posición de los mínimos y máximos secundarios se hallan desplazados respecto de lo esperado por la curva teórica debido a las distorsiones introducidas por el gran ángulo de colección (15.2 mrad, ver Sección 5.a). Esto presenta una relación de compromiso entre la resolución espacial y el límite de detección del fotodiodo: reducir el ángulo de colección significa una menor tasa de fotones, de modo que los máximos secundarios quedarían por debajo del límite de detección.

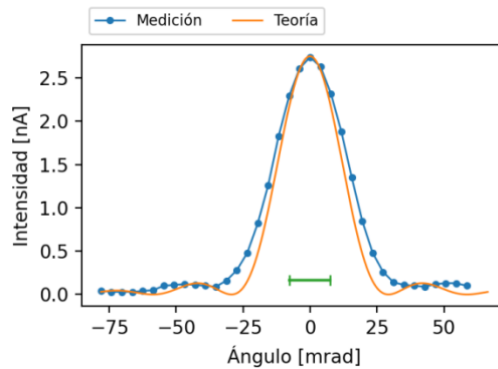


Fig. 13. Figura de difracción adquirida con el fotodiodo. La línea naranja corresponde a la curva teórica esperada. El segmento verde indica el ángulo colectado por el detector (15.2 mrad).

5.c. Estadística de conteo

5.c.1. Introducción a la estadística del problema

Tal como se comentó en la sección 5.b, la generación de fotones puede modelarse mediante un proceso puntual de Poisson [9]. Con el equipo propuesto se puede verificar que efectivamente el arribo de fotones sigue dicho proceso.

El proceso de Poisson caracteriza la ocurrencia de eventos o sucesos en un dominio continuo. En el caso de estudio los eventos son el conteo de fotones y el dominio continuo es el tiempo. El estudio de la distribución de fotones detectados permite dar una explicación estadística al comportamiento corpuscular de la luz y complementar los estudios de variables aleatorias vistas en cursos de probabilidad y estadística.

La placa Arduino UNO fue programada de forma tal que durante $\Delta t = 20$ ms cuente la cantidad de fotones. Una vez superado este intervalo, el valor es enviado por puerto serie, e inicia nuevamente el conteo. Los valores registrados seguirán una distribución de Poisson con una tasa λ_f que se encuentra asociada a la intensidad lumínica. Llamando X a esta variable aleatoria, tal que $X \sim \text{Poisson}(\lambda_f)$, entonces la función de probabilidad del proceso es:

$$P[X = k] = \frac{e^{-\lambda_f} \lambda_f^k}{k!} \quad (5)$$

donde P es la probabilidad que en una realización de la variable aleatoria X se hayan contado k fotones siendo λ_f la cantidad media de fotones registrados en Δt . Además, para dicha distribución la media $E[X]$ y la varianza $V[X]$ resultan:

$$E[X] = \sum_{k=0}^{\infty} k \frac{e^{-\lambda_f} \lambda_f^k}{k!} = \lambda_f \quad (6)$$

$$V[X] = E[X^2] - E[X]^2 = \lambda_f \quad (7)$$

que como puede observarse, ambas coinciden con la tasa de conteo de fotones, lo cual resultará práctico para estimar dicha tasa. El proceso de Poisson puede plantearse partiendo de una serie de variables aleatorias de distribución exponencial. La variable aleatoria exponencial modela el tiempo entre eventos y la concatenación de las realizaciones de las variables exponenciales genera el proceso Poisson.

Para verificar si efectivamente la distribución de cuentas sigue un proceso Poisson se proponen tres estudios que son detallados en las secciones 5.c.2, 5.c.3 y 5.c.4.

5.c.2. Media y Desvío

Empleando las ecuaciones (6) y (7) se busca analizar si la distribución de cuentas medidas presenta media y varianza iguales para diferentes condiciones de iluminación. A partir de las mediciones del patrón de difracción de la figura 12 se analizó para cada ángulo la media y varianza en la cantidad de cuentas, y se confeccionó la figura 14. Sobre los datos del gráfico se realizó un ajuste lineal el cual indica que la varianza puede establecerse en términos de la media. El valor obtenido para la pendiente del ajuste fue de 1.01 ± 0.04 . Se incentiva a los alumnos a determinar si es evidencia suficiente como para considerar que la ocurrencia de fotones sigue una distribución de Poisson, y si los datos empleados para el ajuste resultan satisfactorios. Además, se presenta la oportunidad de discutir cómo las fuentes de error están afectando esta medición.

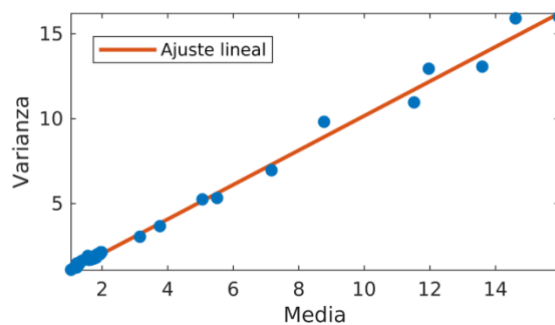


Fig. 14. Pares de varianza y media en el conteo de fotones para diferentes intensidades de luz. Los valores son extraídos del patrón de difracción de la figura 12.

5.c.3. Cantidad de eventos dado un intervalo de tiempo

Diferentes intensidades lumínicas provocan que la tasa del proceso de Poisson varíe. A mayor intensidad de luz, la tasa λ_f aumentará en forma lineal. Para un valor de intensidad se toma un conjunto de 700 mediciones y se estudia cómo se reparten la cantidad de cuentas, confeccionando de esta forma un histograma. Normalizando dicho histograma, se puede estimar la función de distribución de probabilidad. En caso de que el conteo siga una distribución de Poisson, las curvas del histograma y la función de probabilidad descrita en la ecuación (5) deberían ser semejantes. Se estudia la cantidad de eventos registrados para diferentes intensidades, y se busca extraer la función de probabilidad empírica partiendo de dichas mediciones. Del patrón de difracción se toman tres intensidades diferentes y se estudia la cantidad de cuentas registradas para cada una de ellas.

De la figura 15 se puede observar que para las tres intensidades estudiadas, la función de probabilidad se asemeja razonablemente a la distribución medida. Por ejemplo para la intensidad correspondiente al índice 12, la cantidad media de cuentas por intervalo de 20ms es de 5. La probabilidad de ocurrencia de 5 cuentas empleando la ecuación (5) es de 17.6%, mientras que de forma empírica se obtiene un 15.4%. Nuevamente

se abre la posibilidad de discutir cuales son las fuentes de error que llevan a la ligera discrepancia entre los valores medidos y estimados, y definir propuestas para mejorar dicha medición.

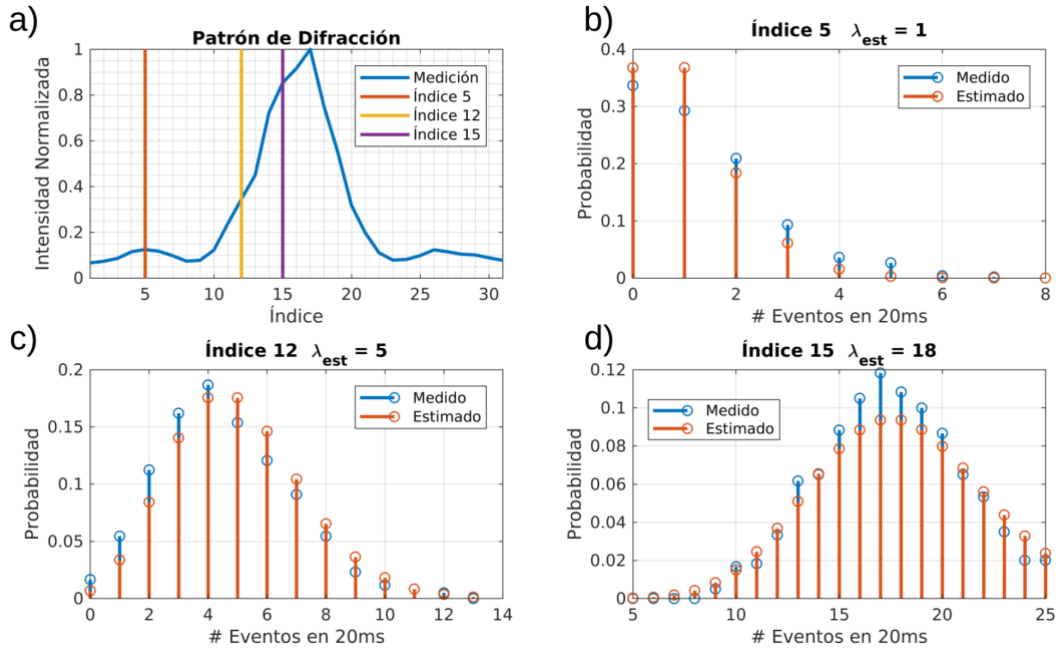


Fig. 15. a) Patrón de difracción medido, indicando tres intensidades de luz. b), c) y d) histogramas comparativos entre la distribución de cuentas medidas (en azul) y la probabilidad de ocurrencia empleando la función de probabilidad de la variable aleatoria Poisson. Para cada histograma se estima la tasa del conteo de fotones.

5.c.4. Tiempo entre arribos

Cargando el código descrito en la sección 5.a.2 puede medirse el tiempo entre fotones. Para lograrlo se debe modificar el conexionado eléctrico conectando la salida del contador de fotones al pin PD2. De tratarse de un proceso Poisson, la distribución observada debería ser la de una variable aleatoria exponencial sin importar la intensidad de la iluminación. El código propuesto fue configurado para que luego de 10 segundos de medición devuelva por puerto serie los valores del histograma con los cuales, luego de una normalización se estimará la función de densidad de probabilidad. En caso que el contador de fotones no se encuentre iluminado, el histograma debería mostrar una distribución que corresponda con los ruidos propios del contador de fotones.

La figura 16 muestra el histograma del tiempo entre cuentas iluminando el contador de fotones con el máximo principal de difracción. Sobre el histograma se grafica una curva de ajuste exponencial, y los valores fueron normalizados para corresponder con una distribución de probabilidad. Como puede observarse, la tendencia es la esperada para el proceso. Por otra parte, la figura 17 muestra el estudio análogo al de la figura 16, pero en el caso de que no se encuentre iluminado el contador de fotones. Se observa un fuerte cambio en la distribución del tiempo entre cuentas llevando a la desaparición de la tendencia exponencial.

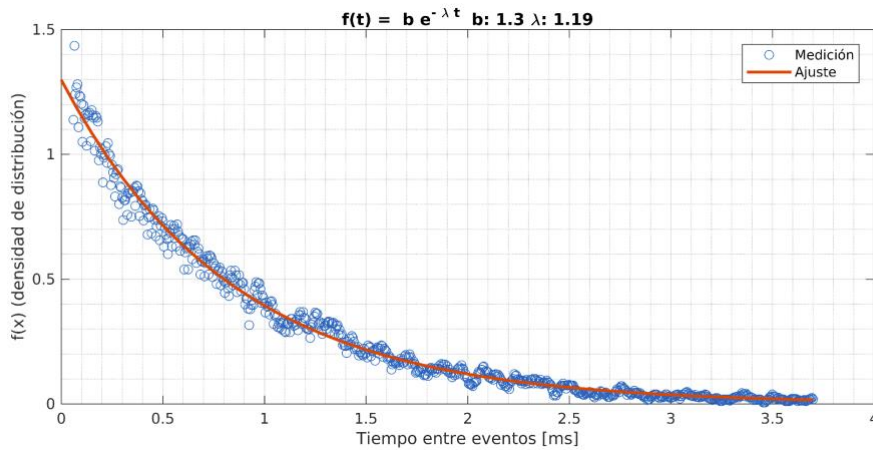


Fig. 16. Densidad de probabilidad empírica en función del tiempo, con una superposición de una función exponencial decreciente.

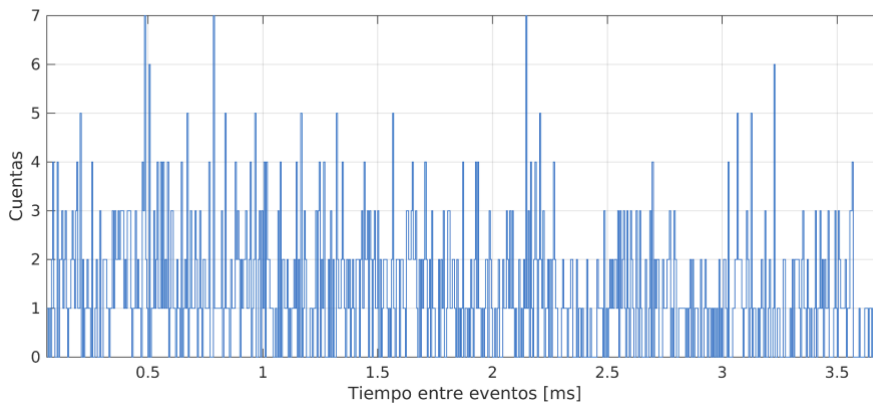


Fig. 17. Histograma del tiempo entre cuentas cuando el instrumento no se encuentra iluminado.

6. Conclusiones

Se ha presentado una configuración de muchas posibles para que los alumnos adquieran el patrón de difracción de una rendija contando fotones individualmente y que además puedan realizar un análisis estadístico de dichas mediciones. Para ello, enfatizando en que el diseño se espera que se realice por parte de los alumnos, se ha propuesto un conjunto de materiales que permitan la versatilidad de los diseños, así como de los experimentos que puedan idearse. Estos experimentos se van a realizar en diferentes jornadas, de modo que al atravesar las distintas etapas propuestas, los alumnos logren un mayor entendimiento del fenómeno, así como una mejora en sus aptitudes para la medición en general.

La motivación principal del trabajo se centró en la realización de experimentos que permitan de manera simultánea observar tanto comportamientos ondulatorios como corpusculares de la luz. Para ello, luego de un reconocimiento del material disponible, los alumnos podrán comenzar el diseño del experimento que deseen realizar a partir del planteo de un esquema. En dicho esquema verán los componentes particulares a utilizar y qué requerimientos se deberán satisfacer para garantizar la correcta observación del fenómeno. A su vez, esos requerimientos presentarán interrogantes que sólo podrán ser respondidos a través de la etapa de caracterización. Luego, y habiendo ganado experiencia en el manejo de los componentes de manera individual, procederán al armado de un equipo. Esta etapa puede ser extendida en función del tiempo disponible en el curso, pues una misma medición puede ser realizada de manera manual o automatizada, una vez o cientos de veces, etc. Si bien la automatización puede reducir los tiempos de adquisición, permitiendo realizar mediciones con conjuntos de datos mayores, conlleva un consumo de tiempo en el desarrollo de por ejemplo, los programas de control. Nuestra propuesta, incluye la utilización de placas Arduino UNO que, por su facilidad de programación y su adaptabilidad a módulos de control, permite reducir tiempos de desarrollo. El aumento de las aptitudes de los alumnos en la programación y control, es un beneficio que este tipo de experiencias les provee y que son de gran utilidad para su formación.

Seguidamente al armado del equipo, se realizarán las mediciones que pongan en manifiesto el fenómeno. Es importante destacar la diferencia entre indicarles qué medir y guiarlos para conseguir un objetivo. La propuesta es que los alumnos participen activamente de todas las etapas y que sean ellos los que definan, bajo la guía docente, cómo, qué y cuánto medir al realizar un experimento.

A lo largo del trabajo hemos mostrado, a partir de la configuración propuesta, un conjunto de posibles mediciones que muestran tanto comportamientos ondulatorios como corpusculares de la luz. Contando fotones se ha observado a partir de la acumulación, el resultado esperado por el electromagnetismo clásico. Asimismo se ha mostrado la capacidad de realizar estudios estadísticos que exponen su comportamiento corpuscular. Las posibilidades no se agotan en los casos mencionados. Los alumnos podrán elegir caminos diferentes, así como todo un nuevo conjunto de interrogantes que deseen responder. El rol docente en estas etapas es fundamental para motivarlos. Es la libertad que tienen, en este tipo de experiencias, la que les permite a los alumnos un acercamiento más didáctico y divertido al entendimiento de fenómenos físicos.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los alumnos de la carrera Ingeniería Electrónica de la FIUBA, que durante el primer cuatrimestre de 2022 realizaron las primeras pruebas de este desarrollo.

Partes de este trabajo fueron presentadas en la 107^ª Reunión de la Asociación de Física Argentina en el trabajo llamado “Difracción de la luz contando fotones: una excusa para aprender a medir”, 2022.