

Caracterización de tubo fotomultiplicador HAMAMATSU HC135-02 y análisis estadístico de fotodetección

Bolaños M. R., Pujol J. M.

Resumen

Se caracterizaron las propiedades de importancia de un tubo fotomultiplicador HAMAMATSU HC135-02 para su utilización en experiencias de conteo de fotones. Las cantidades caracterizadas fueron el comportamiento de las cuentas oscuras para diferentes arreglos, el fondo, el rango de linealidad, y la eficiencia para un láser de He-Ne. Por último, se utilizó el mismo fotomultiplicador para analizar la estadística de detección de fotones para tres tipos de fuente distintas: láser, LED, y pseudo-térmica.

I. INTRODUCCIÓN

El conteo de fotones es una técnica comúnmente utilizada para medir luz de muy baja intensidad.[1] Esta técnica tiene una gran variedad de aplicaciones, tales como comunicación por fibra óptica, medicina, e información cuántica. Para la realización de experimentos con conteo de fotones, es necesario disponer de un detector lo suficientemente sensible como para registrar eventos individuales. Algunos fotomultiplicadores de tubo (*PMT* por sus siglas en inglés) cumplen con esta condición, y pueden ser usados con este fin. En estos casos, ciertas características toman mayor importancia que en un *PMT* convencional.[2] Estas son:

- Cuentas de oscuridad: Cuentas registradas sin ningún tipo de luz incidente. Determina la mínima cantidad de cuentas por segundo para el cual la señal esta predominantemente causada por fotones reales. La mayoría de estas cuentas son de origen térmico, por lo que pueden reducirse enfriando el detector.
- Punto de saturación: Debido a la sensibilidad del aparato, una exposición al mismo con una intensidad suficientemente alta como para saturarlo por mas de aproximadamente 10 segundos es capaz de causar daño permanente.
- Rango de linealidad: Incluso sin saturar, es probable que la detección del *PMT* pierda linealidad respecto de la intensidad de la luz incidente. Esto establece un limite superior a la intensidad para la cual la medida deja de ser confiable.
- Fondo: Al igual que las cuentas de oscuridad, se busca reducir al mínimo las cuentas de fondo. Para ello, es necesario no solo mantener las luces apagadas, si no también eliminar cualquier tipo de luz distinta a la fuente que se busca analizar.
- Eficiencia de conteo: Porcentaje de fotones incidentes sobre el *PMT* que son registrados por el mismo.

Teniendo en cuenta que el efecto fotoeléctrico, fundamental en el funcionamiento del *PMT*, es un proceso estocástico, es de esperar que la detección de

fotones también lo sea. La probabilidad de registrar n cuentas durante un intervalo de tiempo T viene dada por la formula de Mandel: [3]

$$P(n) = \int_0^\infty \frac{(\alpha W)^n}{n!} e^{-\alpha W} P_W(W) dW, \quad (1)$$

donde $\alpha = \frac{QE}{h\nu}$, QE es la eficiencia cuántica, h es la constante de Planck, ν es la frecuencia de la luz, $P_W(W)$ es la densidad de probabilidad de W , y W se conoce como intensidad integrada y viene dada por

$$W = \iint_A \int_t^{t+T} I(x, y, \xi) d\xi dx dy, \quad (2)$$

donde $I(x, y, \xi)$ es la intensidad de la luz en el punto (x, y) y tiempo ξ , y A es el área iluminada del fotocátodo. Incluso para un haz con intensidad constante, las cuentas registradas no son constantes. Esto puede verse fácilmente a partir de de la ecuación (1) suponiendo que

$$P_W(W) = \delta(W - \langle W \rangle) \quad (3)$$

donde $\langle W \rangle$ es la intensidad integrada promedio (en este caso constante). Esta integral da como resultado una distribución de Poisson

$$P(n) = \frac{\langle n \rangle^n}{n!} e^{-\langle n \rangle}, \quad (4)$$

donde $\langle n \rangle$ es el promedio de cuentas.

En este punto, es necesario introducir el concepto de tiempo de coherencia. Para una onda electromagnética, el tiempo de coherencia τ_c es el tiempo durante el cual la onda puede ser considerada coherente. [4] Para una luz térmica, $P(W)$ depende del tiempo de medida utilizado. Se analizan dos casos limites: Para $\tau_c \gg T$, la distribución de las cuentas registradas viene dada por la formula de Bose-Einstein:

$$P(n) = \frac{1}{1 + \langle n \rangle} \left(\frac{\langle n \rangle}{1 + \langle n \rangle} \right)^n, \quad (5)$$

mientras que para $\tau_c \ll T$, la distribución viene dada nuevamente por la ecuación (4).[5] Para luces térmicas, τ_c es extremadamente corto (usualmente menor a 1 ps), por lo que por limitaciones técnicas no se puede medir $P(n)$ para $\tau_c \gg T$. Sin embargo, es posible crear una fuente pseudo-térmica a partir de un patrón de *speckle* dinámico. Un patrón de *speckle* se logra dispersando luz láser a través de un gran número de centros de dispersión. Al mover estos centros de dispersión, el patrón de *speckle* evoluciona temporalmente, creando la fuente pseudo-térmica. En este trabajo se tratará con dos métodos para crear este tipo de fuentes. El primero consiste en dispersar la luz a través de un recipiente transparente a la luz del láser con bolas de plástico de tamaños menores a $1 \mu\text{m}$ suspendidas en agua.[6] En el segundo, se dispersa la luz a través de un vidrio esmerilado móvil.[7] La ventaja del segundo método respecto del primero, es que es posible controlar el tiempo de coherencia regulando la velocidad del vidrio (a mayor velocidad, menor tiempo de coherencia).

En este trabajo, se buscó poner en funcionamiento un tubo fotomultiplicador HAMAMATSU HC135-02. Para ello, se determinaron las cuentas de oscuridad y las de fondo, el rango de linealidad, y la eficiencia de conteo para un láser de He-Ne. Una vez determinadas todas estas características, se estudió la estadística de fotodetección para distintas fuentes de luz: láser, LED y pseudo-térmica. Se crearon fuentes pseudo-térmicas utilizando los dos métodos mencionados y se evaluó la validez de cada uno para nuestro arreglo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se dividió en 3 partes: en la primera, se analizaron las características del *PMT* que no necesitan de una fuente de luz, es decir, el fondo y las cuentas de oscuridad; en la segunda se caracterizó la eficiencia y el rango de linealidad para un láser de He-Ne; y en la tercera se analizó la estadística de fotodetección para tres tipos de fuente: láser, LED y pseudo-térmica. Se utilizó un software desarrollado por el CIOp (Centro de Investigaciones Ópticas) para registrar las medidas en una PC.

II-A. Cuentas de oscuridad y fondo

Para medir las cuentas de oscuridad, se encendió el *PMT* tapando la entrada con un obturador para evitar que entre luz al mismo. Para esta parte, el *PMT* se utilizó con una ventana temporal de 10 ms, y un tiempo de medida de aproximadamente 1 minuto. Se registraron las cuentas de oscuridad variando el voltaje aplicado al *PMT* en intervalos de $\Delta V = 25 \text{ V}$, desde $V_i = 725 \text{ V}$ hasta $V_f = 1100 \text{ V}$. Además, se registró cómo se modificaban las cuentas de oscuridad en función del tiempo de encendido del aparato. Para ello, se mantuvo el *PMT* encendido por 210 minutos y se registraron las cuentas de oscuridad cada 30 minutos. Se analizó este comportamiento para $V = 800 \text{ V}$ y

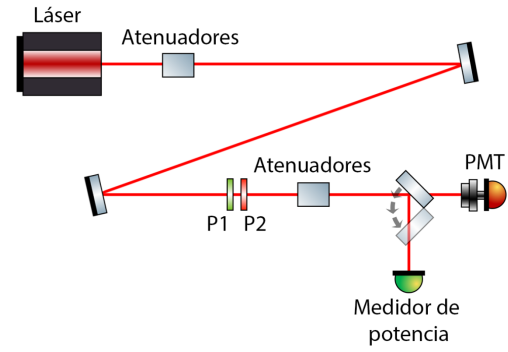


Figura 1: Arreglo experimental utilizado para la primera parte del experimento.

$V = 1100 \text{ V}$ para determinar si la evolución temporal depende del voltaje aplicado.

Para registrar el fondo, se destapó el *PMT* y se midieron las cuentas mientras las luces del laboratorio se mantenían apagadas. Este mismo proceso se realizó nuevamente variando la diferencia de potencial aplicada al *PMT* desde $V_i = 725 \text{ V}$ hasta $V_f = 1100 \text{ V}$ con $\Delta V = 25 \text{ V}$.

II-B. Rango de linealidad y eficiencia de conteo

Se dispuso de un arreglo como el mostrado en la figura 1. Se utilizó un láser de He-Ne de ThorLabs como fuente de luz, espejos regulables para facilitar la alineación del láser, placas polarizadoras y atenuadores para poder regular la potencia de la luz, y un radiómetro Newport 880 *Universal Shutter System* para medir dicha potencia. Para que la potencia registrada por el radiómetro sea la misma que ingresa al *PMT* se utilizó un diafragma regulable previo a ambos para seleccionar el diámetro del haz. Con este arreglo, se hicieron medidas modificando la potencia incidente rotando las placas polarizadoras para registrar el rango de linealidad del aparato. Finalmente, dividiendo la potencia por la energía de un fotón, se obtuvo la cantidad de cuentas registradas en función de los fotones incidentes, pudiendo determinar la eficiencia de conteo a partir de esto.

II-C. Estadística de fotodetección

Para el análisis de la estadística de detección de fotones se tomaron medidas utilizando tres fuentes de luz: un láser, un LED y una fuente pseudo-térmica. Para analizar el láser, se utilizó el mismo arreglo que el mencionado en la sección II-B, también con el láser de He-Ne de ThorLabs. Las medidas se realizaron con un tiempo de medida de 1 minuto. Se realizó una serie de medidas manteniendo $T = 10 \text{ ms}$ fijo y variando la potencia entre $P_i = 5 \text{ pW}$ y $P_f = 346 \text{ pW}$, y otra manteniendo la intensidad fija en $P = 5 \text{ pW}$ y variando la ventana entre $T = 10 \text{ ms}$ y $T = 500 \text{ ms}$. Luego, se registraron las cuentas utilizando un LED verde ubicado detrás del diafragma.

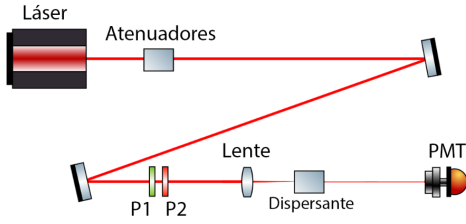


Figura 2: Arreglo utilizado para estudiar la estadística de fotodetección para una fuente pseudo-térmica. Como dispersante, en primera instancia se utilizaron partículas de látex suspendidas en agua, y luego se utilizó un vidrio esmerilado móvil.

Para generar la fuente pseudo-térmica se utilizaron los dos métodos mencionados en la sección I. Para ambos, se modificó el arreglo de la sección II.B agregando una lente para enfocar el láser (fig. 2). Por limitaciones técnicas, no fue posible medir la potencia incidente en el PMT. Para el primer método, se utilizaron partículas de látex suspendidas en agua dentro de un recipiente de plástico transparente. Las medidas debieron realizarse inmediatamente después de agregar las partículas de látex, debido a que las mismas se disipan rápidamente y se pierde la capacidad de generar un patrón de *speckle*. Para el segundo método se utilizó un vidrio esmerilado que se desplazó perpendicularmente al haz del láser a una velocidad de $v = 2,4$ mm/s utilizando un motor ThorLabs MTS50-Z8.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se registraron las cuentas oscuras y se graficó la media de cuentas en el intervalo de tiempo de medida en función de voltaje (fig. 3). Posteriormente, se realizó el mismo proceso para las medidas de cuentas oscuras en función del tiempo de encendido (fig. 4). Se observó que, si bien para el tiempo medido no se puede asegurar que estabilicen, la velocidad de crecimiento disminuye lo suficiente como para que sean despreciables frente a las cuentas de fondo para un tiempo de medida usual. Luego, se destapó el PMT y se registraron las cuentas de fondo en función del voltaje (fig. 5). Incluso siendo incapaces de eliminar completamente la iluminación de la habitación, se obtuvo que las cuentas de fondo eran aproximadamente el doble que las cuentas de oscuridad. Aun así, las cuentas de fondo son aproximadamente dos órdenes de magnitud menores a las medidas realizadas con fuentes de luz, por lo que pueden despreciarse frente a las cuentas provenientes de las fuentes utilizadas. Además, al comparar los gráficos de cuentas de oscuridad en función de voltaje y de fondo en función de voltaje, se encuentra que ambos presentan un comportamiento similar.

Manteniendo un voltaje constante de $V = 900$ V, se graficó la media de las cuentas registradas en función de la potencia de la luz incidente (fig. 6). Se

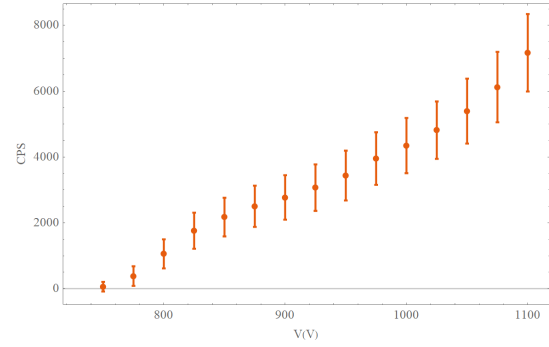


Figura 3: Cuentas de oscuridad en función del voltaje del tubo.

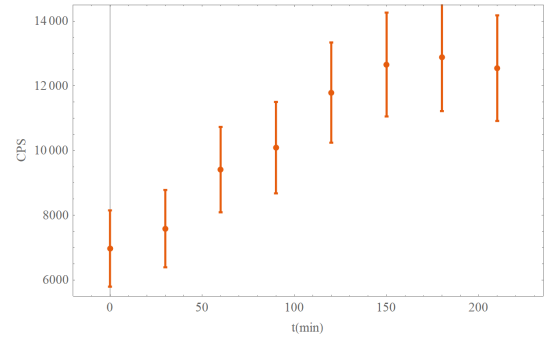


Figura 4: Cuentas de oscuridad en función del tiempo de encendido del equipo, utilizando un voltaje de 1100 V.

observó que para el rango de potencias medido (5 pW – 346 pW), las cuentas aumentan linealmente con la potencia. Conociendo la intensidad incidente, se puede calcular el flujo de fotones incidente $\phi_p = \frac{P}{h\nu}$ sobre el tubo. Mediante un ajuste a estos datos, se calculó la eficiencia de conteo del PMT $CE = 2,86(1)\%$ para una longitud de onda de $\lambda = 632,8$ nm, que coincide con la indicada por el manual del instrumento. [8]

Se obtuvieron las distribuciones para conteo de fotones en las distintas fuentes y se las comparó con las esperadas. Las medidas de $P(n)$ para diferentes potencias incidentes se encuentran en el apéndice A. Para las medidas del láser de He-Ne, se obtuvo que la probabilidad de ocurrencia de las cuentas registradas sigue una distribución normal (fig. 7). Si bien se esperaba una distribución Poissoniana, se puede demostrar que cuando $\langle n \rangle \rightarrow \infty$, esta distribución tiende a la distribución normal. [9] Además, se observó que a medida que se aumenta T , el ancho de la distribución se reduce (fig. 8). Para la medida realizada utilizando una fuente LED, se obtuvo un comportamiento similar al láser (fig. 9). Este resultado era de esperarse, pues tanto la intensidad del láser como la del LED pueden considerarse constantes.

Para el primer método de creación de fuente pseudo-térmica, se realizaron una serie de medidas modificando T (fig. 10). Se observó que a medida que T aumenta, $P(n)$ deja de comportarse como una distribución de Bose-Einstein y se comporta progresivamente

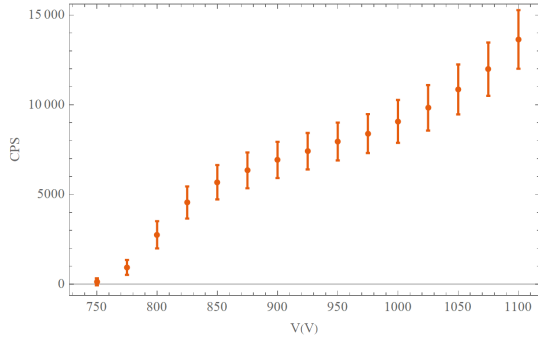


Figura 5: Cuentas de fondo en función del voltaje, variando el mismo entre 750 y 1100 V.

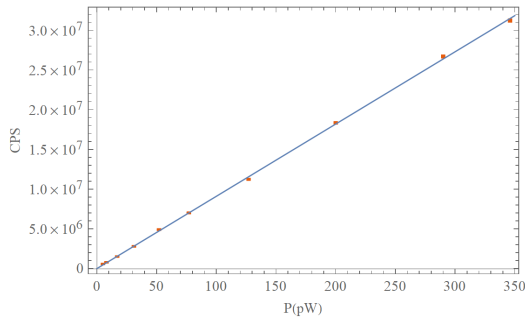


Figura 6: CPS en función de la potencia incidente, utilizando un láser de He-Ne. En azul, el ajuste correspondiente.

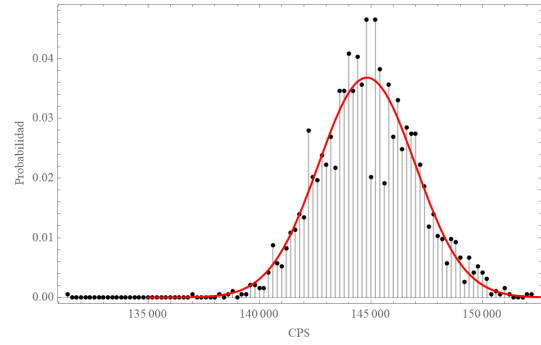


Figura 7: $P(n)$ del láser de He-Ne para $P = 5$ pW y $T = 10$ ms. En rojo, el ajuste correspondiente.

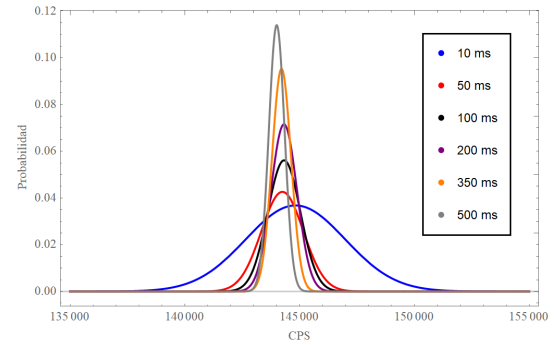


Figura 8: Ajustes para $P(n)$ para una potencia $P = 5$ pW y $T = 10, 50, 100, 200, 350, 500$ ms.

más como una distribución normal. Los gráficos de $P(n)$ para distintos T se encuentran en el apéndice B. Atribuimos esto a que al agrandar T , se rompe el límite $\tau_c \gg T$, por lo que la aproximación de Bose-Einstein pierde validez. Además, utilizando este método, no hay manera de modificar ni predecir τ_c , lo que demuestra la poca precisión del mismo. Para el segundo método, se realizó una serie de medidas modificando la potencia entre dos valores (fig. 11). Se observó que ninguna de las distribuciones de probabilidad se comportaba como Bose-Einstein. Atribuimos esto a que la velocidad del motor utilizado no fue la correcta como para generar una fuente con $\tau_c \gg T$.

Para establecer que el comportamiento estocástico de la fotodetección proviene no solo de la emisión de fotones, si no también del mismo aparato, se realizó un gráfico de $P(n)$ para las cuentas oscuras (fig. 12). Se observó que incluso en ausencia de fotones reales, la generación/detección de cuentas oscuras se comporta estocásticamente.

IV. CONCLUSIONES

Se caracterizaron propiedades de importancia de un tubo fotomultiplicador HAMAMATSU HC135-02 para su uso en conteo de fotones. En particular se observó el comportamiento de las cuentas oscuras, las cuentas de fondo, el rango de linealidad y la eficiencia de conteo del equipo para un láser de He-Ne.

Para las cuentas oscuras, se vio que las mismas crecen en función del voltaje, llegando a valores pro-

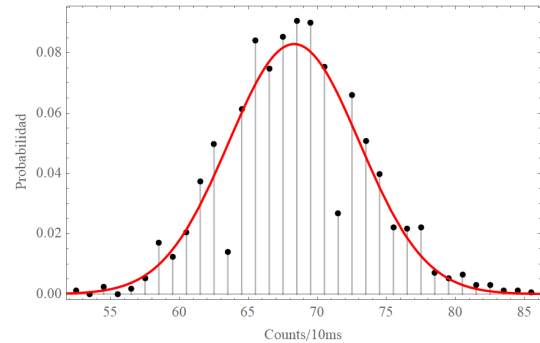


Figura 9: $P(n)$ para un LED verde, con $T = 10$ ms. En rojo, el ajuste correspondiente.

medio de alrededor de 7000 cuentas por segundo para el voltaje más alto (1100 V). Además, se observó que las cuentas de oscuridad aumentan a medida que el PMT pasa mas tiempo encendido. Si bien no podemos garantizar su estabilización en el tiempo medido, las cuentas de oscuridad siempre se mantienen al menos dos ordenes de magnitud por debajo de las cuentas provenientes por las fuentes de luz utilizadas. En el caso de las cuentas de fondo, se observó que presentan un comportamiento similar al de las cuentas de oscuridad en función del voltaje. Además, los valores obtenidos fueron de aproximadamente el doble de los obtenidos para las cuentas de oscuridad.

Al medir cuentas en función de potencia de la luz incidente, se obtuvo que el equipo se comporta lineal-

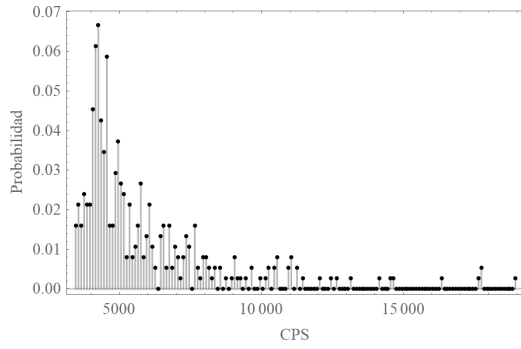


Figura 10: $P(n)$ para una fuente pseudo-térmica generada suspendiendo partículas de látex en agua.

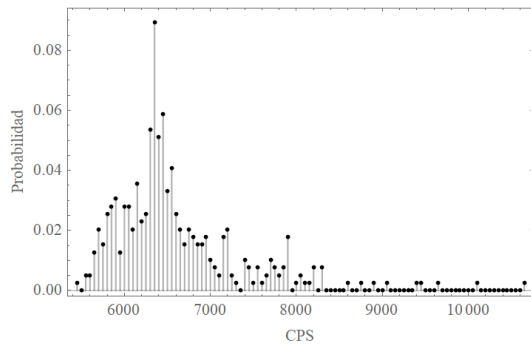


Figura 11: $P(n)$ para una fuente pseudo-térmica generada con un vidrio esmerilado moviéndose a $v = 2,4$ mm/s.

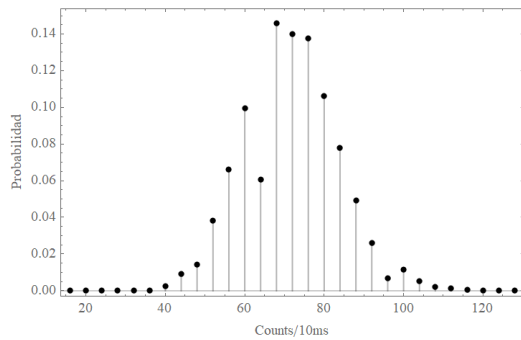


Figura 12: $P(n)$ para las cuentas oscuras registradas a $V = 1100$ V.

mente en el rango de potencia utilizado, entre 5 pW y 346 pW. Con esta misma medida, se calculó la cantidad de fotones incidentes y se la graficó con la cantidad de fotones detectados. A partir de un ajuste lineal, se obtuvo una eficiencia de conteo de $CE = 2,86(1)\%$ para una longitud de onda de $\lambda = 632,8$ nm. Esto coincide con los valores reportados en el manual del instrumento.

Por último, se utilizó el *PMT* para estudiar la estadística de fotodetección de distintos tipos de fuentes de luz: láser, LED, y pseudo-térmicas, estas últimas generadas por dos métodos distintos. Al usar un láser de He-Ne, se obtuvo una distribución de probabilidad normal. Si bien se espera una distribución Poissoniana,

esta tiende a una normal a medida que la media $\langle n \rangle$ aumenta. Un comportamiento similar se observó al utilizar la fuente LED; esto es esperable, ya que ambas poseen intensidad aproximadamente constante. Para el primer método de generación de fuente pseudo-térmica, se obtuvo una distribución de Bose-Einstein para tiempos de ventana pequeños (comenzando desde $T = 10$ ms); sin embargo, a medida que se agranda la ventana, se acerca a una distribución normal. Esto puede deberse a que el tiempo de la ventana se acerca al tiempo de coherencia de la fuente. En el segundo método, no se obtuvo una distribución de Bose-Einstein. Se cree que esto se debe a que la velocidad del motor utilizado no es la correcta para generar luz con tiempos de coherencia mucho mayores a la ventana de medición. Para obtener la distribución esperada, se debería, o bien disminuir la velocidad del motor, o bien disminuir la ventana de medida.

REFERENCIAS

- [1] HAMAMATSU Corporation. Photon counting using photomultiplier tubes, 2005.
- [2] R. Foord, R. Jones, C. J. Oliver, and E. R. Pike. The use of photomultiplier tubes for photon counting. *Appl. Opt.*, 8(10):1975–1989, Oct 1969.
- [3] L Mandel. Fluctuations of photon beams: The distribution of the photo-electrons. *Proceedings of the Physical Society*, 74(3):233–243, sep 1959.
- [4] Bahaa E. A. Saleh. *Fundamentals of photonics*. Wiley, 2019.
- [5] P Koczyk, Piotr Wiewior, and Czesław Radzewicz. Photon counting statistics-undergraduate experiment. *American Journal of Physics - AMER J PHYS*, 64:240–245, 03 1996.
- [6] E Jakeman, C J Oliver, and E R Pike. A measurement of optical linewidth by photon-counting statistics. *Journal of Physics A: General Physics*, 1(3):406–408, may 1968.
- [7] W. Martienssen and E. Spiller. Coherence and fluctuations in light beams. *American Journal of Physics*, 32(12):919–926, 1964.
- [8] HAMAMATSU Corporation. *HC135-01/02 Data Sheet*.
- [9] J. Peacock. Junion honours astronomical statistics. 2012/2013.

APÉNDICE

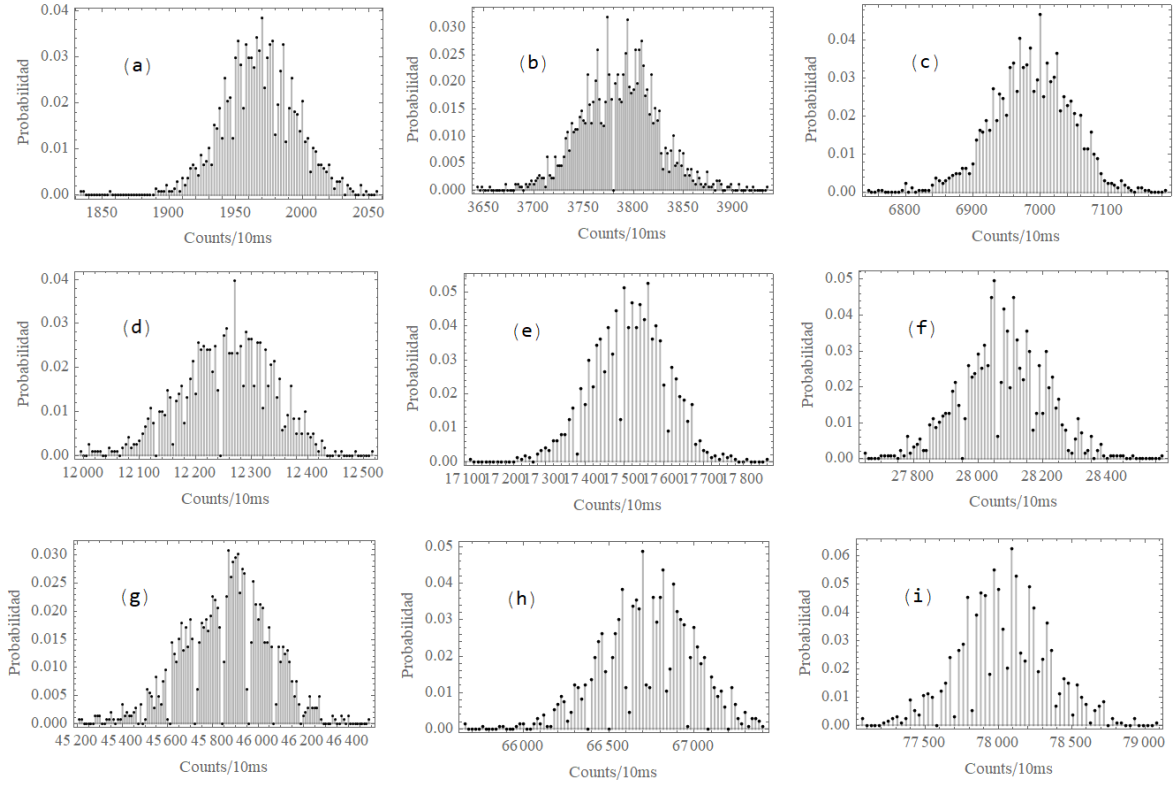
A. $P(n)$ en función de la potencia incidente para el láser de He-Ne

Figura 13: $P(n)$ para $T = 10 \text{ ms}$ y: (a) $P = 8 \text{ mW}$, (b) $P = 17 \text{ mW}$, (c) $P = 31 \text{ mW}$, (d) $P = 52 \text{ mW}$, (e) $P = 77 \text{ mW}$, (f) $P = 127 \text{ mW}$, (g) $P = 200 \text{ mW}$, (h) $P = 290 \text{ mW}$, (i) $P = 346 \text{ mW}$.

B. $P(n)$ en función del tamaño de ventana para el segundo método de creación de fuente pseudo-térmica

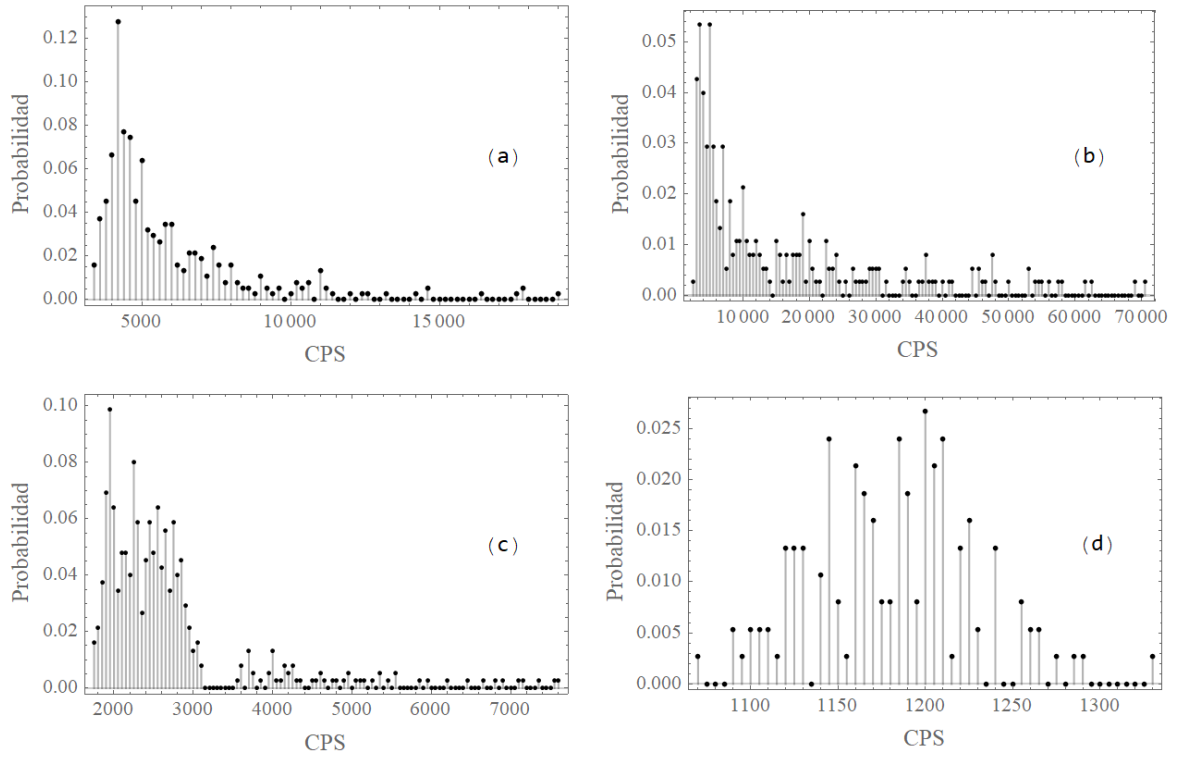


Figura 14: $P(n)$ para $P = 5$ pW y: (a) $T = 10$ ms, (b) $T = 50$ ms, (c) $T = 100$ ms, (d) $T = 350$ ms.