Laboratorio 1: Conteo de Fotones*

Sergio Gutiérrez** and Camilo Rivera***
Universidad de los Andes
(Dated: febrero de 2017)

El siguiente informe resume la elaboración de una práctica de laboratorio en la cual se pretendía observar y caracterizar la estadística de los fotones generados bajo diferentes fuentes, mediante su conteo en condiciones controladas. Para ello se seleccionaron una fuente de luz coherente y una fuente de luz térmica o caótica, y se realizó un conteo de fotones ante diferentes ventanas de tiempo en igualdad de condiciones para ambas fuentes.

Se logró medir la naturaleza probabilística para los tipos de luz propuesta, pero también se observó que a medida que se incrementaba la ventana de tiempo, el conteo de fotones era tal, que la curva medida se asemejaba más a una gaussiana por el teorema del límite central.

I. INTRODUCCIÓN

Para estudiar y caracterizar la naturaleza probabilística de diferentes fuentes de luz mediante el conteo de fotones, es necesario hacer uso de los estados de Fock, los cuales dan cuenta de la cantidad de fotones que se tiene en un modo dado. El conteo de fotones durante una ventana de exposición, estará dictado por la probabilidad de encontrar dicho número de fotones; es decir por el cuadrado de la proyección del estado de la luz sobre el estado de Fock, como se muestra en la Ecuación 1, de manera que hay que realizar dicha proyección para cada estado de luz utilizado.

$$P = |\langle n|\Psi\rangle|^2 \tag{1}$$

A. Luz Coherente

Para el caso de los estados coherentes de luz o el láser, se tiene que el estado está dado, en términos de estados de Fock, por la Ecuación 2.

$$\langle\alpha| = e^{-\frac{|\alpha|^2}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle \tag{2}$$

De manera que la probabilidad de encontrar n fotones en un estado coherente α, será,

$$P_n(\alpha) = |\langle n|\alpha\rangle|^2 = e^{-<n>} \frac{< n >^n}{n!} \tag{3}$$

Donde en la Ecuación 3, el número medio de fotones:

$$< n >= |\alpha|$$

. De aquí podemos ver que la probabilidad, en función del número medio de fotones, estará dada por una función de Poisson. Al analizar los datos, se espera encontrar esta distribución de probabilidad reflejada en los datos, puesto que al observar durante suficientes ventanas de tiempo se puede aproximar dicho valor de número medio de conteos.

B. Luz Térmica

La radiación proveniente de las fuentes térmicas no pueden ser descritas con un ket puro, de manera que tiene que utilizarse la matriz de densidad $\hat{\rho}$. Esta matriz de densidad estará dada por las características en las Ecuaciones 4, 5 y 6.

$$\hat{\rho}_T = \frac{e^{-\hat{H}\beta}}{Z_T} \tag{4}$$

$$\hat{H} = \hbar\omega \left[\hat{a}^\dagger \hat{a} + 1/2\right] \tag{5}$$

$$Z_T = \frac{e^{\frac{\beta\hbar\omega}{2}}}{e^{\beta\hbar\omega} - 1} \tag{6}$$

Nuevamente realizando el cálculo de la proyección y elevando al cuadrado, se podrá encontrar la probabilidad de encontrar m fotones en un estado térmico, mostrado en la Ecuación 7

$$P_m \langle m|\hat{\rho}|m\rangle = \frac{< n >^m}{[< n > +1]^{m+1}} \tag{7}$$

Donde el número medio de fotones $< n >$ estará dado por la distribución de Bosé-Einstein,

$$< n >= \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega} - 1} \tag{8}$$

Esta última distribución dará una curva de una exponencial decreciente. Esto es esperado, ya que este tipo de luz se llama caótica precisamente porque su emisión no tiene ninguna dirección de preferencia, de manera que es mucho más probable encontrar una menor cantidad de fotones que una mayor.

---

* Curso de Óptica Cuántica
**
***

II. MONTAJE EXPERIMENTAL

En la Figura 1 se muestra el montaje experimental que se utilizó a lo largo del experimento. Las fuentes de luz tanto coherentes como térmicas se enfocan en una fibra óptica que luego se hacen pasar por unos espejos para ser pasados nuevamente por un lente que lo enfoca en una segunda fibra óptica. Esta segunda fibra está directamente conectada al detector el cual se conecta con la FPGA que realiza los conteos.

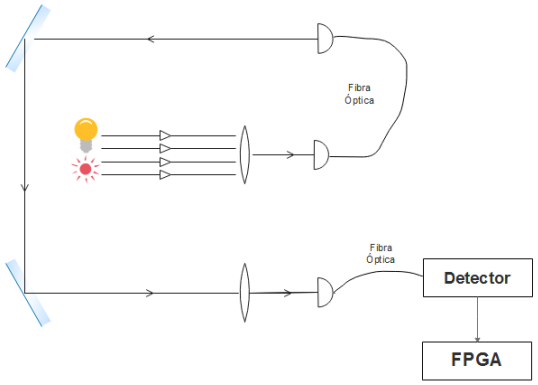


Figura 1. Montaje Experimental

La idea del montaje es reducir la cantidad de fotones que llegan al detector para que este no se sature y queme. La recomendación inicial fue de calibrar las fuentes de luz y demás partes del montaje para que el detector tuviese al rededor de 600.000 conteos por segundo. Sin embargo, por la dificultad en la calibración de ambas fuentes simultáneamente, de manera que el montaje permaneciera invariante entre las fuentes, se encontró una posición en la que se podían observar las distribuciones para ambas estadísticas, teniendo un promedio de 40.000 conteos por segundo para la luz láser.

Mediante un software provisto por el laboratorio, se realizaron tomas de 2000 datos para los casos de ventanas de $1\mu s$, $2\mu s$, $5\mu s$, $10\mu s$ y $100\mu s$, más una toma de 500 datos para ventanas de 1s.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Vamos a analisar los datos tomados para los dos casos por aprte para poder interpretar la diferente informacion de cada fuente de luz y hacer la distingcion de como e correlaciona el ajuste con el tipo de fuente que es.

A. Luz Coherente

Al comparar los histogramas para periodos de exposición de menores a 1s como se ve en la FIG. 2 es claro que el comportamiento par un tiempo de exposición menor a $5\mu s$ no se detecta ningún fotón solo hasta $10\mu s$ vemos que hay veces en la que se detecta un fotón llegar, para $100\mu s$ vemos que tenemos ya hay una detección significativo de fotones llegando hasta 4 por lapso de exposición.

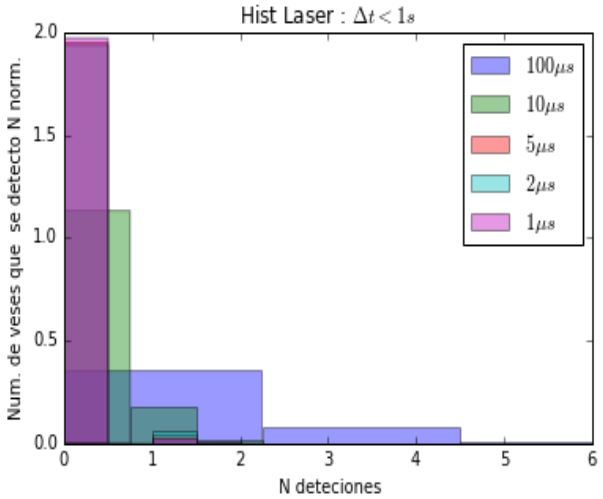


Figura 2. Hist. Led de tiempos de exposición menor $1s$

Por lo antes mencionado entonces solo vamos a hacer una gráfica del ajuste para los tiempo de exposición menor a $5\mu s$ puesto que para valores inferiores es prácticamente el mismo ajuste de Poisson. Para $100\mu s$ los valores de detección son muy diferentes así que hacemos un ajuste separado para ver cual es su comportamiento y por ultimo para 1s por el teorema de limite central es claro que lo que vamos a obtener es un Gaussiana.

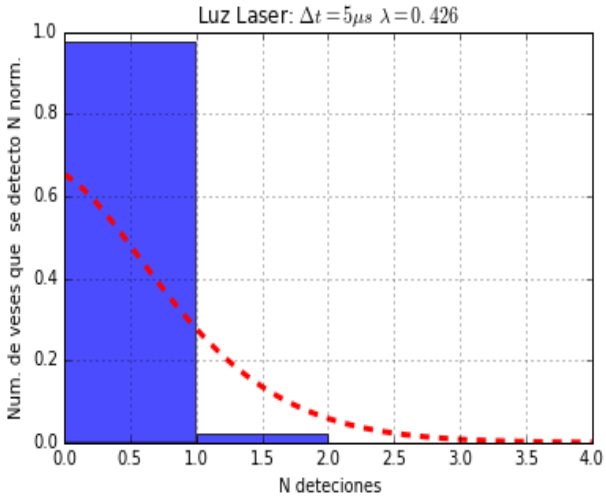


Figura 3. Led : exposición $5\mu s$ con ajuste Poisson

Notse que en Fig.3 el numero medio de eventos por intervalo: $\lambda = 0{,}426$ lo cual nos deja concluir que en

mas de $5\mu s$ se esta generando un foton en el diodo lo cual muestra que es un proceso que no esta en constante expulsión de fotones, debido a esto es poco probable tener un conteo con tiempos de exposición menores a este. Vemos que Poisson hace un ajuste muy parecido a lo que se quería.

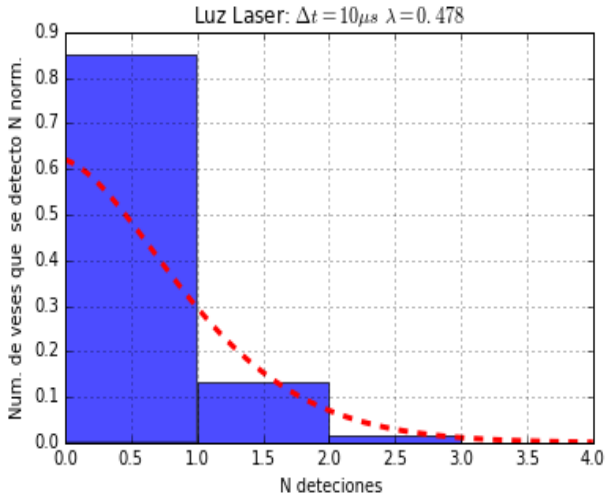


Figura 4. Led : exposición $10\mu s$ con ajuste Poisson

Es claro para la Fig.4 que para un tiempo de mayor vemos que hay un incremento en λ lo interesante es que es por un factor no tan grande como el que se esperaría pero se puede decir que cada $10\mu s$ hay una probabilidad de $\approx \frac{1}{2}$ de que se detecte un foton o de que un foton se emitido por el diodo.

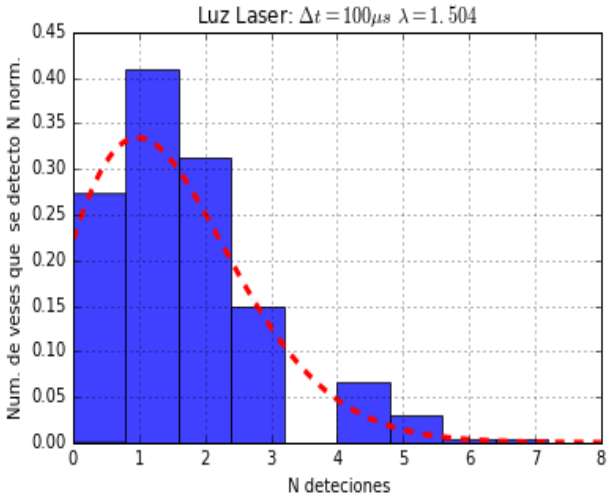


Figura 5. Led : exposición $100\mu s$ con ajuste Poisson

Es evidente que ya para un tiempo de exposicion 10 veces mayor se va a tener un λ mucho mayor ya mostrando que por cada intervalo de exposicion se espera en medir en promedio 1.5 fotones, y vemos que el histograma tiene un rango máximo de 5 detecciones lo cual es consistente con los datos anteriores teniendo en cuenta que se produce un fotón en el diodo $\approx 20\mu s$.

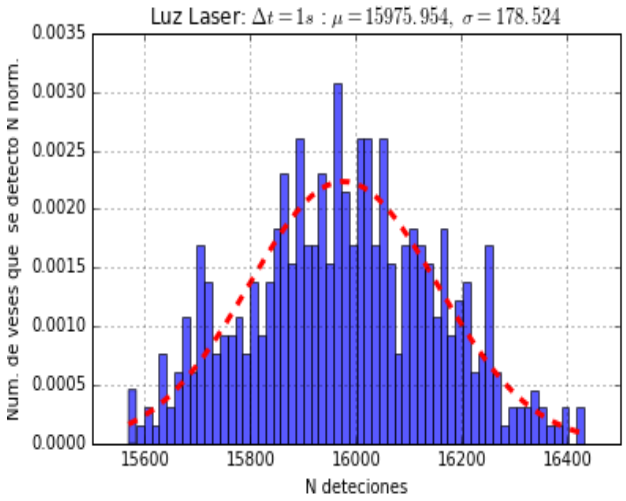


Figura 6. Led : exposición $1s$ con ajuste Gaussiana

Como se esperaba para un intervalo de medición tan largo comparado a los que estábamos trabajando vemos el efecto de TLC y obtenemos una gaussiana la cual tiene un desviación estándar bastante baja así que podemos asumir que la cantidad de fotonos que se producen en el láser es bastante estable y con un conteo de aproximada mente 15975 fotones generados en el diodo por segundo.

B. Radiación Térmica

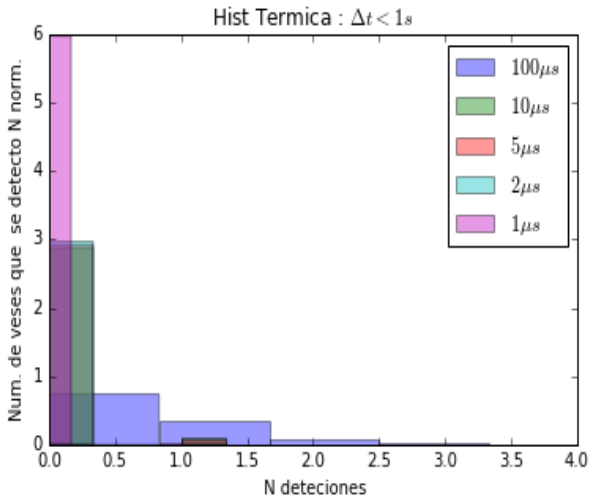


Figura 7. Hist. Term. de tiempos de exposición menor $1s$

Vamos a aplicar el mismos análisis de la luz coherente, pero ahora vamos a mirar los datos de $1\mu s$ y la de $10\mu s$ porque los otros dos histogramas de $2\mu s$, $5\mu s$ son prácticamente la misma a $10\mu s$.

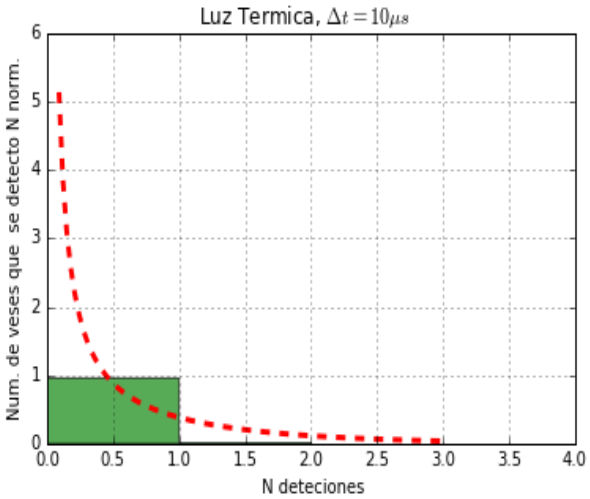


Figura 8. Term : exposición $10\mu s$ con ajuste B-E

Podemos ver que el ajuste de la Figura 9 sale con una divergencia en 0 pero esto es esperado puesto que lo mas probable es que no se detecte ningún fotón en un intervalo tan corto que es lo esperado si para una fuente de luz coherente tampoco se detecto casi nada en este intervalo.

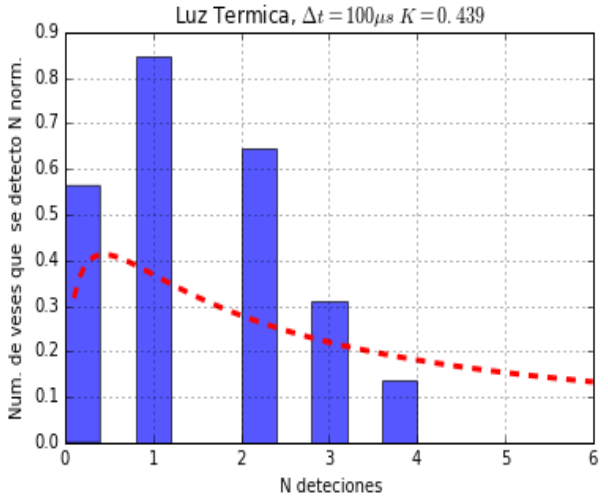


Figura 9. Term : exposición $100\mu s$ con ajuste B-E

Para un intervalo mas largo de exposición ya se detecta mas conteos y vemos que el comportamiento es mejor descrito por el ajuste de la distribución de Bose Einstein que es lo que se esperaba de la teoría.

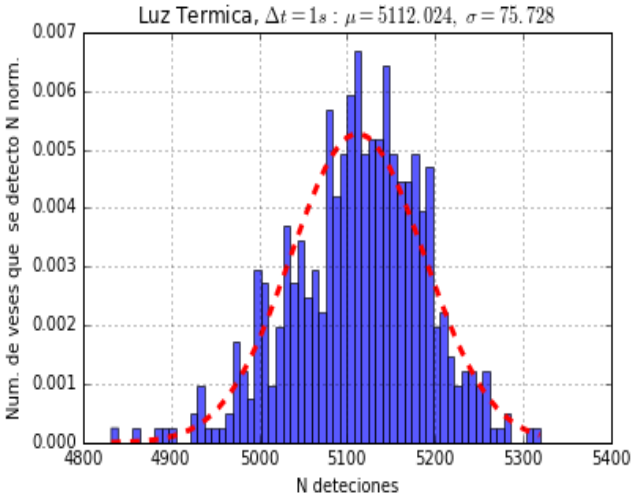


Figura 10. Term : exposición $1s$ con ajuste Gaussiana

Comprando con lo encontrado para luz coherente vemos que hay en promedio muchos mas detecciones del láser, que es lo esperado pero la luz Térmica tiene una menor desviación estándar lo cual es algo interesante

IV. CONCLUSIONES

Como se pudo observar con el ajuste de los datos, el conteo de fotones para el caso de la luz coherente tiende a tener una distribución de probabilidad poissoniana, mientras que para el caso de la luz térmica, se ajusta más a una distribución exponencial decreciente, bajo la densidad de ocupación de Bose-Einstein.

Sin embargo, es importante notar que para el caso de tomas de 1 segundo, ventanas de tiempo 10 veces más grandes que los siguientes datos tomados, ambas distribuciones tendieron a una forma gaussiana. Esto se puede ver por el teorema del límite central, con suficientes repeticiones de un experimento con muestras bajo la misma distribución, la probabilidad irá tendiendo a una forma normal. Por ejemplo, para el caso del láser, se detectaban fotones aproximadamente cada $10\mu s$ de manera que una ventana de tiempo de 1 segundo, 100 veces más larga que este tiempo, es suficiente para que la distribución tienda a una normal.

Los resultados estuvieron dentro de los parámetros esperados, excepto por las ventanas de 1s, ya que se desplazan bastante de las muestras previas; es decir, mientras que las anteriores ventanas daban a claras exponenciales decrecientes, la ventana de 1s lleva a una gaussiana centrada en alrededor de 5000 datos. Podría decirse que esto se debe a la previa calibración obtenida de los instrumentos en este mismo rango.