

## ESTADÍSTICA DE CONTEO DE FOTONES CON UN HAZ MODULADO

Nicolás D. Gómez<sup>1</sup>, Edmundo Lavia<sup>1</sup>, J. Codnia<sup>2</sup>, M. L. Azcárate<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Estudiante Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones CEILAP (CITEFA-CONICET)  
San Juan Bautista de La Salle 4397 - (B1603ALO) – Villa Martelli – Prov. Buenos Aires - Argentina

<sup>3</sup> Carrera del investigador CONICET

e-mail : [jcodnia@citefa.gov.ar](mailto:jcodnia@citefa.gov.ar), [lazcarate@citefa.gov.ar](mailto:lazcarate@citefa.gov.ar)

En la División Fotofísica Láser en Gases del CEILAP (CITEFA-CONICET) se implementó la técnica de fotólisis de destello con un láser pulsado y espectrometría de masas resuelta en el tiempo en un sistema de flujos a muy baja presión para el estudio de reacciones entre radicales y moléculas. Esta facilidad de fotólisis de destello consta de un sistema de generación y control de flujos de reactivos, un láser pulsado incidente en un fotorreactor acoplado a un espectrómetro de masas cuadrupolar con ionización por bombardeo electrónico y, actualmente, detección de corriente iónica por multiplicación de electrones. Con el objetivo de ganar experiencia en la técnica de detección por conteo de iones provenientes de una fuente modulada y de desarrollar los distintos programas de adquisición y análisis de datos se implementó la técnica de conteo de fotones con modulación del haz de luz incidente. Para ello se utilizó un LED modulado en intensidad por medio de un chopper mecánico. Como detector se utilizó un tubo fotomultiplicador 1P28 cuya señal de salida se envió a la entrada de una placa de conteo Ortec MCS 32.

The laser flash photolysis in a very low-pressure flow system with real time mass spectrometry detection technique has been implemented in the Laser Photophysics in Gases Division of the CEILAP (CITEFA-CONICET) for the study of radical-molecule reactions. This laser flash photolysis facility consists of a reactant generation and flow control system, a pulsed laser incident on a photoreactor coupled to a quadrupolar mass spectrometer with electron impact ionization and ion current detection. The photon counting technique with incident light beam modulation has been implemented in order to gain experience in the ion counting detection technique and to develop the different programs for data acquisition and analysis. The light from a LED modulated in intensity by a mechanical chopper was detected by a photomultiplier tube 1P28 the output of which was fed to a microchannel plate.

### I. INTRODUCCION

Un tubo fotomultiplicador es un detector que convierte señales de luz ultravioleta, visible o infrarroja cercana en señales eléctricas. Generalmente, cuando la intensidad de luz es importante se opera en lo que se denomina el modo analógico de detección. Por otro lado, cuando las señales a medir son muy débiles, es posible utilizar el tubo fotomultiplicador en el modo "conteo de fotones" en el cual se detectan y cuentan pulsos generados por fotoelectrones individuales emitidos por el fotocátodo. Para ello es necesario que la separación temporal media entre pulsos sea mayor que el tiempo de respuesta del tubo fotomultiplicador.

El procesamiento de los pulsos a la salida del fotomultiplicador puede llevarse a cabo mediante una placa de conteo multicanal. En este caso, dichos pulsos de corriente, en una primera instancia, son convertidos a pulsos de tensión por medio de un amplificador de transconductancia, luego, amplificados y discriminados por su altura y, finalmente, convertidos a información digital al ser contados individualmente y acumulados en memoria. El hecho de poder discriminar la altura de los pulsos ofrece ventajas en cuanto al incremento de la relación señal – ruido, ya que permite eliminar la banda de ruido generada por fuentes externas de luz o por las cuentas de oscuridad del propio tubo fotomultiplicador [1].

La División Fotofísica Láser en Gases del CEILAP (CITEFA-CONICET) cuenta con una facilidad de fotólisis de destello con un espectrómetro de masas cuadrupolar con detección de corriente iónica por multiplicación de electrones. En un futuro próximo, se planea adicionar a dicha facilidad la técnica de

detección por conteo de iones. Con la finalidad de ganar experiencia en el manejo de dicha técnica y de desarrollar los distintos programas de adquisición y análisis de datos, en este trabajo se implementó la técnica de conteo de fotones con modulación del haz de luz incidente. El objetivo se centró en la caracterización de las fluctuaciones observadas en la detección por medio de una tarjeta multicanal.

### II. PARTE EXPERIMENTAL

La Figura 1 muestra un esquema del dispositivo experimental.

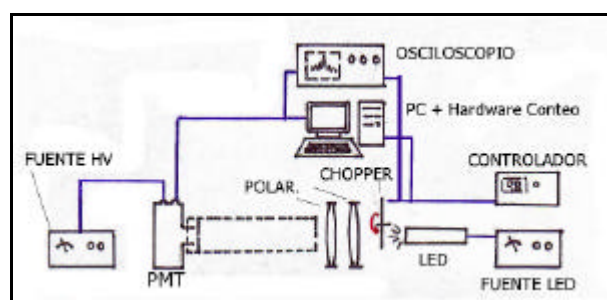


Figura 1. Dispositivo experimental empleado.

Como fuente de luz se empleó un LED, el cual fue alimentado con una corriente continua de 30 mA. La intensidad de luz emitida por el mismo fue modulada por medio de un chopper mecánico conectado al controlador ThorLabs MC 1000 A. El haz modulado se hizo incidir sobre un tubo fotomultiplicador 1P28 [2] a la entrada del cual se dispuso una cartulina negra en forma cilíndrica para reducir el ángulo sólido de captación de forma tal de disminuir la incidencia de luz proveniente de fuentes externas. Al mismo tiempo, la

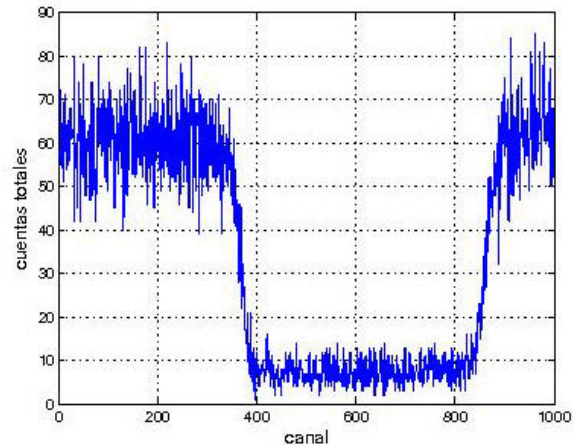
entrada de dicho cilindro se obtuvo con cartulina negra, sobre la cual se practicó un orificio con un alfiler. De esta manera se consiguió un control óptimo sobre el nivel de superposición de los pulsos. La modulación del haz permitió el estudio simultáneo de las estadísticas de ruido, y aquellas correspondientes a las de señal + ruido. Se emplearon dos polarizadores, de forma tal de generar una polarización lineal a partir del haz proveniente del LED, y de controlar la intensidad incidente sobre el tubo fotomultiplicador. El mismo fue alimentado con una tensión de 1400 V, que se observó maximizaba la relación señal – ruido. Como fuente de alta tensión se empleó el modelo Brandenburg 477. La señal de salida se conectó por medio de un BNC, cargada con  $50 \Omega$ , a la entrada de conteo rápida de la placa multicanal (Ortec MCS 32) la cual ofrece una frecuencia máxima de conteo de 150 Mhz [3].

A través de la placa multicanal se controlaron los siguientes parámetros: el número de canales, el tiempo de adquisición por canal y el nivel de discriminación de los pulsos. La señal de pulsos fue observada por medio de un osciloscopio digital Hewlett Packard 54510A. La automatización de las adquisiciones y el análisis de los datos se implementaron por medio del software MatLab. Como trigger de las experiencias se empleó la señal de referencia generada a partir del controlador del chopper. En una primera etapa y, empleando la señal modulada proveniente del LED, se realizaron las respectivas caracterizaciones de las estadísticas de ruido y de señal + ruido. Finalmente, sin modular la señal, se realizaron los correspondientes histogramas de arriba de fotones por canal en función del tiempo de adquisición por canal, con el objetivo de estudiar la estadística obtenida.

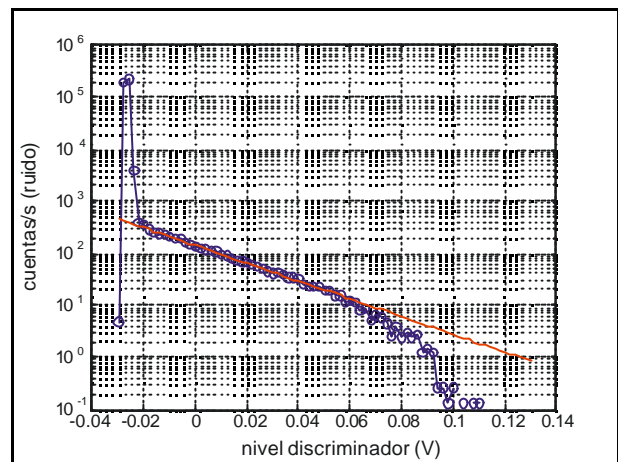
La placa multicanal posee un software propio (Turbo-MCS™) el cual permite la programación y control de la misma a partir de archivos ASCII como programas fuente. Utilizando el software MatLab se generaron dichos programas fuente para definir los distintos parámetros de control y las rutinas de adquisición. Por otro lado, los datos medidos por la placa se generaron en forma de matriz estando las columnas asociadas a los distintos canales y las filas a los diferentes valores del parámetro de control en cuestión, esto es, nivel de discriminación, número de repetición, tiempo de adquisición de cada canal, etc. Posteriormente, también en MatLab, se realizaron los programas para acondicionamiento, procesamiento y análisis de los datos y sus estadísticas asociadas.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

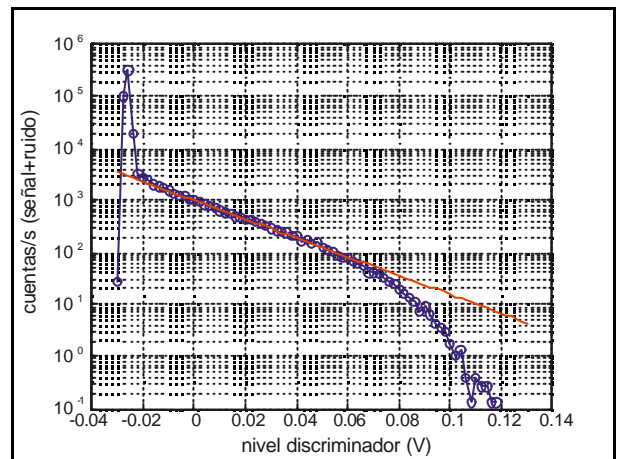
La Figura 2 muestra una secuencia de medición típica presentada como el número de cuentas versus el número de canales, siendo éste último esencialmente el tiempo. En esta figura se observa, entre los canales 400 y 600, el nivel de ruido de fondo (alrededor de 8 cuentas de oscuridad) y las dos regiones de señal + ruido (alrededor de 60 cuentas). Esta serie corresponde a un valor fijo de nivel de discriminación. La Figura 3 muestra el número de cuentas por unidad de tiempo, y, en función del nivel de discriminación,  $u$ , correspondientes al ruido (haz interrumpido).



**Figura 2.** Serie temporal típica. El número de cuentas varía notablemente cuando el chopper interrumpe el haz de luz.



**Figura 3.** Cuentas por unidad de tiempo en función del nivel de discriminación para los niveles de ruido.



**Figura 4.** Cuentas por unidad de tiempo, en función del nivel de discriminación para los niveles de señal + ruido.

El pico que se observa para valores de umbral  $u$  menores a  $-0,01$  V corresponde a ruido eléctrico inducido que nada tiene que ver con los pulsos emitidos por el tubo fotomultiplicador. La recta con la cual se ajustaron los datos obtenidos entre los niveles  $-0,01$  V y  $0,06$  V, muestra que en dicha región el

comportamiento es aproximadamente exponencial. Se ajustó con una expresión de la forma

$$y = b e^{-au} \quad (1)$$

obteniéndose los valores para los parámetros del ajuste

$$b_R = 140 \pm 3 \text{ cuentas } s^{-1} \quad (2.1)$$

$$a_R = 40 \pm 1 \text{ } V^{-1} \quad (2.2)$$

El subíndice  $R$  denota que corresponden a la caracterización de las cuentas de ruido.

Repitiendo el análisis para el caso de señal + ruido, la Figura 4 muestra el número de cuentas por unidad de tiempo en función del nivel de discriminación donde también se observa un comportamiento del tipo exponencial entre los valores del umbral de discriminación de  $-0,01$  V y  $0,06$  V.

Los valores de los parámetros del ajuste obtenidos son

$$b_{S+R} = 1000 \pm 10 \text{ cuentas } s^{-1} \quad (3.1)$$

$$a_{S+R} = 42 \pm 1 \text{ } V^{-1} \quad (3.2)$$

También se estudió para cada nivel de discriminación la relación,  $x$  entre el valor medio,  $\tilde{y}$ , y la desviación estándar,  $s$ , del número de cuentas por unidad de tiempo registradas por canal.

$$x = \frac{\tilde{y}}{s} \quad (4)$$

Considerando que el número de fotones por unidad de tiempo que inciden en el detector sigue una distribución de Poisson, se sabe que

$$\tilde{y} = \frac{I}{t} \quad (5)$$

$$s = \frac{\sqrt{I}}{t} \quad (6)$$

y, por lo tanto, se tiene

$$x = \sqrt{I} = \sqrt{t} \tilde{y} \quad (7)$$

Las Figuras 5 y 6 muestran el cociente dado por la expresión (4) para cada canal versus el umbral de discriminación para las medidas de ruido y las de señal + ruido, respectivamente. Los resultados obtenidos se ajustaron nuevamente con la expresión (1), obteniéndose para los parámetros los siguientes valores

$$b = 1.86 \pm 0.03 \quad (8.1)$$

$$a = 19.5 \pm 1.0 \text{ } V^{-1} \quad (8.2)$$

para el caso de ruido y

$$b = 5.05 \pm 0.05 \quad (9.1)$$

$$a = 21 \pm 1 \text{ } V^{-1} \quad (9.2)$$

para el caso de señal + ruido. Comparando los parámetros (8) y (9) con los correspondientes (2) y (3) se verifican las relaciones

$$b = \sqrt{tb_i} \quad (10.1)$$

$$a = \frac{a_i}{2} \quad (10.2)$$

con  $i = R$  ó  $R + S$ . Este resultado es coherente con la expresión (7) indicando que efectivamente el arribo de fotones sigue una distribución de Poisson.

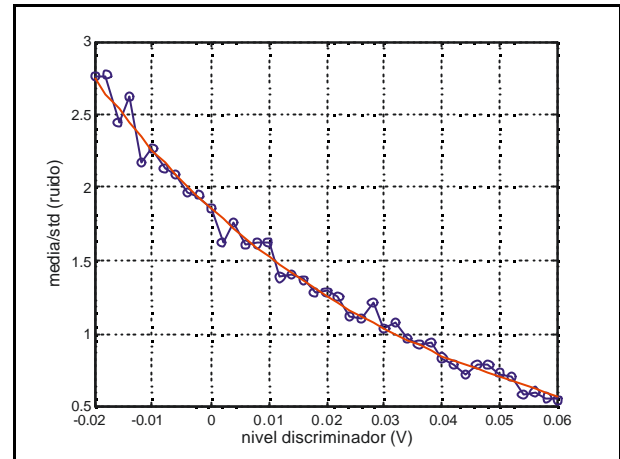


Figura 5. Relación entre el valor medio y la desviación estándar de las cuentas registradas por canal, en función del nivel de discriminación de los pulsos correspondiente a los niveles de ruido.

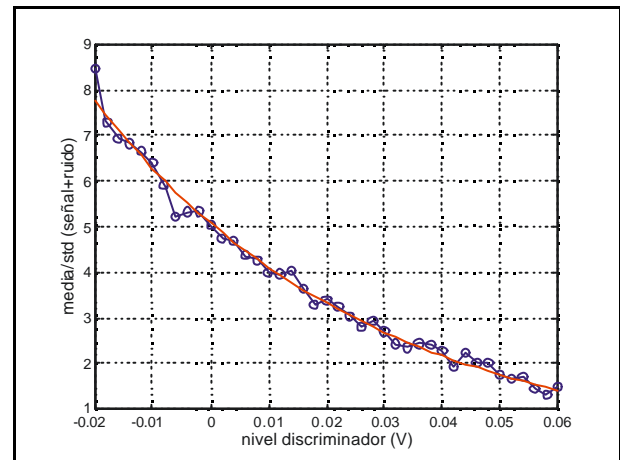
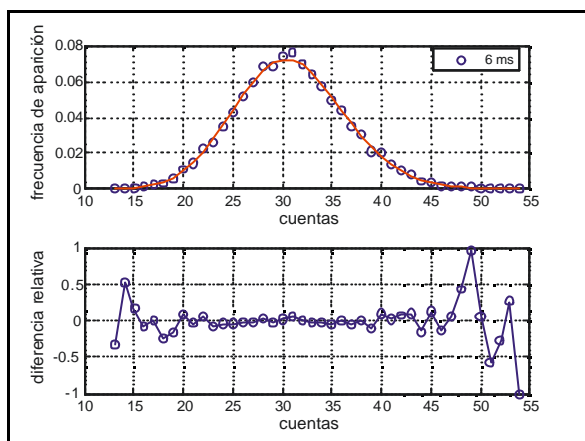


Figura 6. Relación entre el valor medio y la desviación estándar de las cuentas registradas por canal, en función del nivel de discriminación de los pulsos correspondiente a los niveles de señal + ruido.

Por último, se realizaron las correspondientes estadísticas de arribo de fotones por canal sin modular la señal de luz proveniente del LED. Para ello se realizaron los correspondientes histogramas de arribo de fotones en función del tiempo asignado por canal. Independientemente de este valor, se obtuvo para dicha estadística un comportamiento del tipo Poisson, observándose un crecimiento del número medio de fotones proporcional al tiempo de adquisición por canal. En la figura 7 se muestra el histograma correspondiente a un tiempo de adquisición por canal de 6 ms.



**Figura 7.** Arriba. Histograma del arribo de fotones para un tiempo de adquisición por canal de 6 ms. Abajo. Error relativo del ajuste del histograma a una distribución del tipo Poisson.

#### IV. CONCLUSIONES

Se implementó la técnica de conteo de fotones con modulación del haz de luz incidente. Para ello se utilizó un LED modulado en intensidad por medio de un chopper mecánico y un tubo fotomultiplicador 1P28 cuya señal de salida, convertida a tensión y amplificada se envió a la entrada de una placa de conteo Ortec MCS 32.

Se desarrollaron diferentes programas. En primer lugar para la definición de los parámetros de control de la placa multicanal y para la ejecución de los distintos ciclos de adquisición. Posteriormente se realizaron los programas para acondicionamiento, procesamiento y análisis de los datos y sus estadísticas asociadas.

A partir de las adquisiciones de cuentas de fotones en función del nivel de discriminación, se infiere una distribución integral del tipo exponencial tanto para los niveles de señal, como para los de ruido.

La distribución de pulsos obtenida presenta un comportamiento estadístico. Ello se debe a que, en las diferentes etapas de amplificación (dinodos), variará el valor del factor de ganancia al colisionar un electrón con un dínodo.

Se observa que las señales registradas tanto en el caso de señal + ruido, como en el caso de ruido, siguen una estadística del tipo Poisson. Ello permite inferir que los eventos relevados no presentan correlación, lo cual puede asociarse a la eficiencia del detector y a la posibilidad de que el número de cuentas detectado por canal se realice en tiempos de adquisición mayores al tiempo de coherencia de la señal [4].

El objetivo que se plantea en un futuro inmediato será el de adaptar esta técnica al conteo de iones en espectrometría de masas asociada a una facilidad de fotólisis de destello. Dicho modo de adquisición ofrece ventajas en cuanto a la relación señal – ruido, respecto del analógico por corriente iónica, debido a la posibilidad de seleccionar el nivel de discriminación en el cual trabajar. La gran sensibilidad del sistema hace del mismo una herramienta fundamental cuando las señales son muy débiles permitiendo, por ende, trabajar con cantidades de muestra muy pequeñas.

#### Referencias

1. HAMAMATSU, PHOTON COUNTING Using photomultipliers tubes, Hamamatsu photonics K. K. (2005)
2. RADIO CORPORATION OF AMERICA, 1P28 Multiplier Phototube Data, Tube Department RCA (1950).
3. ORTEC, Mcs-pci Hardware and Software User's Manual.
4. M. L. Martinez Ricci, J. Mazafferri, A. V. Bragas y O. E. Martinez, Photon counting statistics using a digital oscilloscope, Am J. Phy. Vol 75, 707 712 (2007).