

Propuesta de análisis para el Efecto Fotoeléctrico utilizando espectros de banda ancha

A. Aguilar* and A. Mazzeo**

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires,
Pabellón I, Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires, Argentina.

(Dated: 6 de noviembre de 2017)

A lo largo de este informe se estudió el efecto fotoeléctrico y se propuso una solución integral que considere los espectros de las fuentes de luz y la sensibilidad de la lámpara fotoeléctrica. Se realizaron ajustes para estudiar las hipótesis de dicha solución y se ajustó una curva de sensibilidad consistente con el resultado esperado. Se obtuvo un potencial de retardo para un LED azul de $(0,34 \pm 0,01)V$ y se observó la independencia de la tensión de corte V_0 con la intensidad. Dicho análisis permitió identificar una estrategia para obtener los valores de V_0 con resultados estadísticos.

I. INTRODUCCIÓN

A. Marco teórico

El *efecto fotoeléctrico* fue uno de los experimentos más importantes del siglo XX que permitieron la formulación de la teoría cuántica, con aportes de Hertz, Planck, Millikan y Einstein. Este fenómeno se basa en la emisión de electrones al incidir luz sobre una superficie metálica. En La Figura 1 se muestra el arreglo experimental que permite observar dicho fenómeno [1].

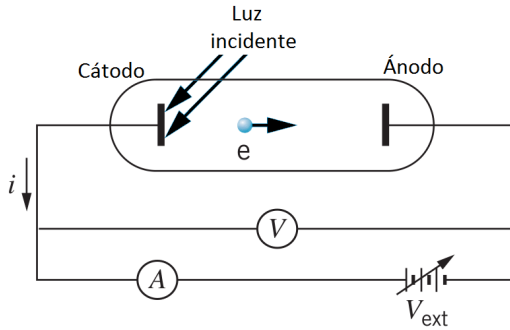


Figura 1. Configuración experimental para observar el efecto fotoeléctrico. El flujo de electrones emitidos es medido como corriente. Un voltaje externo establece una diferencia de potencial entre el cátodo y ánodo.

Al incidir luz sobre el cátodo, electrones se desprenden de éste y se dirigen hacia el ánodo. La velocidad de electrones emitidos se mide como una corriente eléctrica i mediante un amperímetro. También se puede medir la energía cinética máxima de los electrones aplicando un potencial negativo al ánodo, tal que frene a los electrones. Es decir, aumentando gradualmente la diferencia de potencial llegará un punto que ningún electrón llegue al ánodo; esto se conoce como *potencial de corte* V_0 .

Al alcanzar el potencial de corte, la corriente se hará nula. Es justo en este punto que la energía potencial cinética de los electrones será máxima e igual a la energía que pierdan en vencer el potencial que los frena:

$$K_{m\acute{a}x} = eV_0 \quad (1)$$

Un *fotoelectrón* es emitido al encontrarse con un fotón y transferirle instantáneamente toda su energía. Esto significa que la energía $h\nu$ del fotón debe ser mayor a la *función trabajo* ϕ del material para que un fotoelectrón sea liberado.

$$K_{m\acute{a}x} = h\nu - \phi \quad (2)$$

Notar que la ec. (2) no muestra dependencia con la intensidad de la fuente de luz. Aumentar la intensidad significa que más electrones golpearán en la superficie y más fotoelectrones serán liberados, pero todos presentan la misma energía cinética máxima. En la Figura 2 se muestra la dependencia de la fotocorriente con la frecuencia e intensidad.

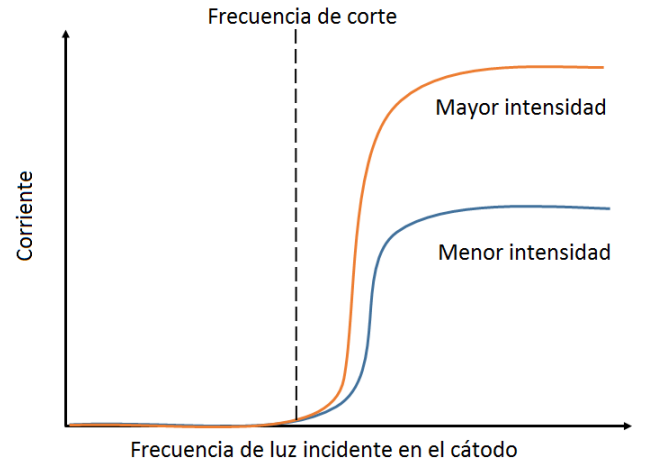


Figura 2. Dependencia de la fotocorriente con la frecuencia e intensidad de la fuente de luz.

* anitaa.aguilar@gmail.com

** ale.exactas@gmail.com

Al igualar las ecuaciones (1) y (2) encontramos una *frecuencia de corte* ν_0 . En el caso que un fotón tenga la

energía justa para vencer la función trabajo del material, la ecuación anterior se vuelve:

$$h\nu_0 = \phi \quad (3)$$

la cual representa la frecuencia más baja a la que se puede observar el efecto fotoeléctrico.

B. Estrategia propuesta

En este informe se estudiaron las posibles componentes que actúan sobre los resultados obtenidos. Los primeros resultados colaboraron en la formación de algunas hipótesis hasta alcanzar una propuesta que describa los comportamientos más generales. La ec. (4) muestra la solución propuesta. Ésta incluyó el espectro de la luz incidente, la sensibilidad y una solución monocromática que explique los resultados obtenidos como la suma de contribuciones individuales.

$$F(V) = \int \Theta(V - V_0(\lambda)) \cdot (V - V_0(\lambda)) \cdot \phi(\lambda) \cdot g(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

Se propone entonces una solución general integral formada por una función de Heaviside (Θ) que anula cualquier contribución para $V < V_0$ y un arreglo lineal en V cuya raíz es precisamente V_0 . Además, se consideraron dos términos dependientes de la componente monocromática: la sensibilidad $\phi(\lambda)$ que presenta la lámpara fotoeléctrica y el espectro $g(\lambda)$ de la luz incidente.

Generalmente, los resultados que se obtienen de esta experiencia muestran un comportamiento lineal para $V \gg V_0$ y menor a un punto de saturación. Para analizar la relación de dicha pendiente con los términos antes mencionados se reemplazó la función de Heaviside por 1 y se escribió el resultado en forma de ecuación lineal:

$$F(V) = V \cdot \int h(\lambda) \cdot d\lambda - \int V_0(\lambda) \cdot h(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5)$$

con $h(\lambda)$ el producto del espectro $\phi(\lambda)$ con la sensibilidad $g(\lambda)$. De este modo, derivando a ambos lados por V se obtiene:

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \int h(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6)$$

La mediciones y los métodos de análisis se realizaron según las propuestas mencionadas en esta sección, identificando además posibles estrategias que no se realizaron.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La magnitud más relevante en el estudio del efecto fotoeléctrico es la corriente establecida por los fotoelectrones. Los parámetros a controlar son el potencial

de retardo y la iluminación del cátodo. Generalmente, las experiencias se diseñan considerando las siguientes dificultades: la corriente a medir es muy pequeña y la luz incidente no es monocromática.

Para la medición de la fotocorriente se utilizó un amplificador del tipo Lock-In. Dicho instrumento permite seleccionar y amplificar una componente de frecuencia dada. Para obtener los resultados esperados, el experimento se debe excitar con la frecuencia a seleccionar (en este caso, la excitación correspondió a la intensidad de la luz incidente). Se optó por la iluminación mediante diodos LED (azul y blanco), modulando la intensidad de los mismos mediante un generador de funciones.

En lo que respecta al espectro, y a diferencia de lo que se acostumbra, no se buscó reducir el ancho de banda al mínimo posible. Se utilizó un monocromador de prisma para seleccionar una banda de luz y dirigirla hacia la lámpara fotoeléctrica. Se incorporó un espectrómetro de fibra óptica, permitiendo estudiar el aporte de múltiples frecuencias. La presencia del mismo trajo aparejada la necesidad de modificar la configuración habitual y resignar la óptima utilización de las rendijas (que reducen el ancho de banda pero también la intensidad), para alcanzar simultáneamente los dos objetivos (la lámpara y la fibra óptica).

La disposición general de los elementos mencionados, como así también algunos detalles aún no mencionados, se observan en el diagrama de la Figura 3.

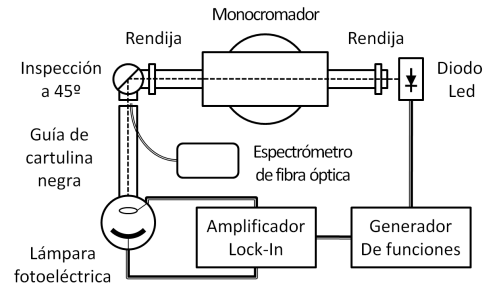


Figura 3. Diagrama de la configuración experimental utilizada. El control y la adquisición de los instrumentos (espectrómetro, amplificador y generador) se realizó desde la PC.

En primer lugar, pueden apreciarse las conexiones utilizadas, todas ellas mediante cables BNC. El generador de funciones alimentó una plaqueta provista de resistencias y LEDs seleccionables. Se conectaron las referencias de frecuencia entre dicho instrumento y el amplificador Lock-In. El amplificador no sólo se utilizó para medir la fotocorriente entre el cátodo y el ánodo de la lámpara; también se utilizó una de sus salidas auxiliares de tensión para controlar el potencial de retardo.

En lo que respecta al camino óptico, el diagrama

muestra la disposición utilizada. La rendijas variables de entrada y salida se regularon según la intensidad y el espectro deseado. Se propone a quien repita este experimento modificar el emplazamiento de la fibra óptica. Resultaría conveniente que el visor de inspección (propio del monocromador) alterne el camino de la luz entre la lámpara y el espectrómetro.

A lo largo de toda la experiencia siempre se adquirieron los valores del voltaje en la lámpara fotoeléctrica, leído por el Lock-In, y el potencial de retardo generado. También se adquirieron los espectros que presentaba la fuente de luz al momento de medición. Para ello se tomaron barridos en potencial de retardo de $-2 \rightarrow 2 V$. Al diodo láser se lo alimentó con una frecuencia del orden de $1 kHz$, cuidando que no sea múltiplo de 50.

Se decidieron variar dos parámetros: la intensidad con que iluminaba el diodo láser y la frecuencia de éste.

Lo primero se realizó modificando los valores de voltaje desde el generador que alimentaba la fuente de luz. Se adquirió programando una configuración en valores discretos de voltaje ($2,5 - 3 - 3,5 - 4 V$), midiendo el voltaje de la lámpara para cada uno de los valores.

Para modificar la frecuencia con que se incidió en el cátodo, se variaron manualmente las rendijas y el dial del monocromador.

Para la adquisición se utilizaron librerías y scripts realizados en Python. Los códigos utilizados y las mediciones obtenidas fueron subidos al repositorio de GitHub mencionado en la bibliografía [2].

III. RESULTADOS

Se introdujo un método al alternativo de análisis el cual incluyó la sensibilidad de la lámpara, el espectro de la luz incidente y la dependencia lineal con el potencial de frenado.

En primer lugar se muestran los resultados sobre los cuales se construyó dicho método. Más adelante se exhiben las consecuencias de utilizarlo y cómo se tuvieron que adaptar para obtener resultados consistentes.

La Figura 4 muestra la fotocorriente medida (proporcional al voltaje) en función del potencial de retardo para un LED azul. Dicha dependencia se muestra para un barrido discreto de tensión de $2,5 V \rightarrow 4 V$. El gráfico muestra la zona de interés comprendida entre los $0,2$ y $1 V$

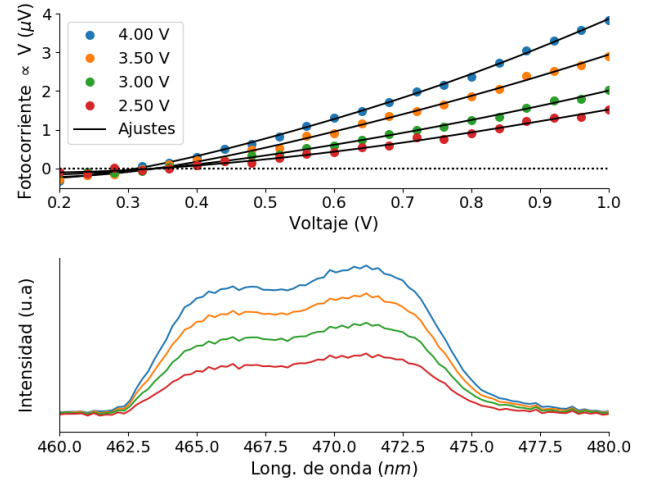


Figura 4. Barrido en intensidad para un diodo láser azul. Respuesta de la corriente medida en función del potencial de retardo.

Junto a las mediciones adquiridas se muestra el ajuste polinomial realizado. Esto permitió aclarar la trayectoria de las curvas y encontrar la intersección con corriente nula. Se encontró una tensión de corte de $V_0 = 0,34 V$. Debido al método utilizado se pudo hacer un análisis estadístico y proveer una desviación estándar de $\pm 0,01 V$ para la tensión de corte.

Dado el resultado obtenido se observó que el potencial de frenado no depende de la intensidad de la fuente, tal como se apuntó en la Sección I A. Se justifica además la inclusión del espectro en la ec. (4) como factor de escala.

Se adquirieron las mismas magnitudes variando la frecuencia de la fuente al ajustar la rendija del monocromador. Estas mediciones se pueden observar en la Figura 5.

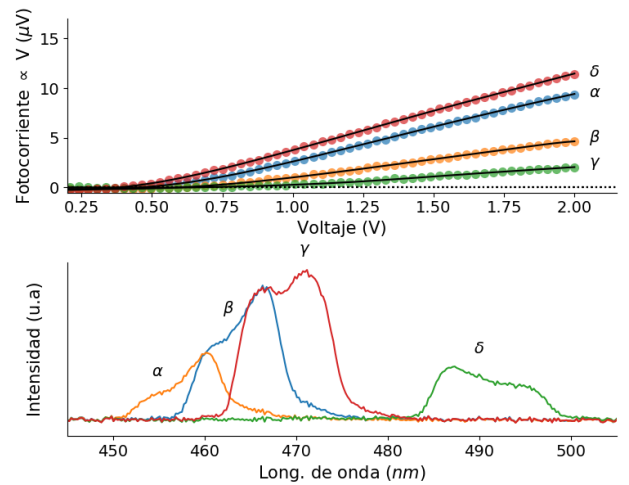


Figura 5. Barrido en frecuencia para un diodo láser azul, modificando la fracción del espectro que incidía sobre la lámpara.

Las secciones del espectro obtenidas para el LED blanco se utilizaron para estudiar las contribuciones en frecuencia a la solución general. La Figura 6 muestra las mediciones realizadas con sus correspondientes espectros.

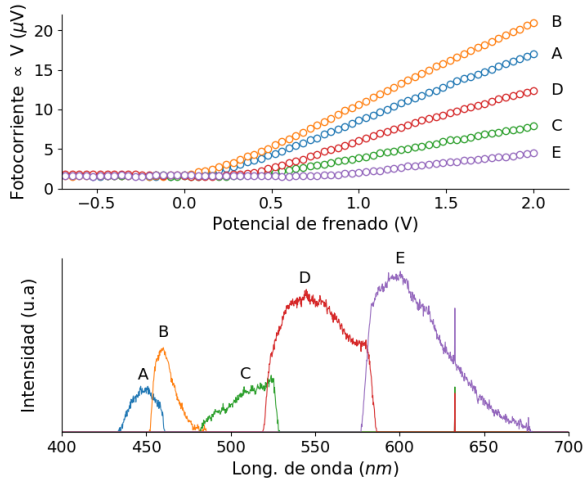


Figura 6. Mediciones obtenidas para diferentes secciones del espectro emitido por un LED blanco.

En la misma puede apreciarse que la intensidad total recibida para longitudes de onda larga resultó mayor. Se realizó un ajuste sobre los extremos finales de las mediciones para obtener la pendiente correspondiente, como se muestra en la Figura 7.

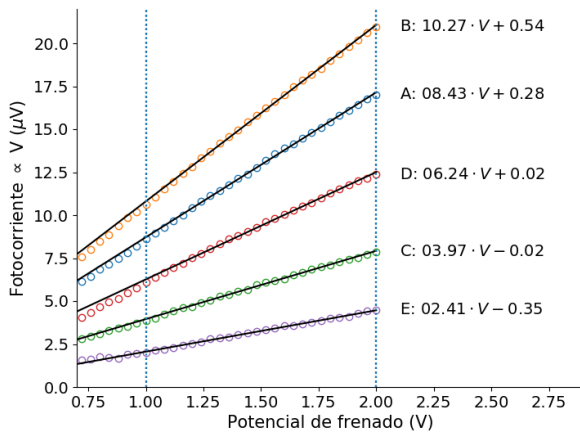


Figura 7. Pendientes obtenidas para los tramos finales de las mediciones. Los nombres se corresponden con los anteriores espectros estudiados del LED blanco.

Según la ec. (5), la pendiente de la fotocorriente medida (para valores de $V \gg V_0$) es proporcional a la integral del espectro multiplicado por la sensibilidad. Se construyó una curva de sensibilidad basada en la hoja

de datos [3] disponible en el laboratorio. El resultado de multiplicar el espectro por dicha sensibilidad (Figura 8) y comparar el área resultante con las pendientes no fue satisfactorio. Se observó un exceso para longitudes de onda largas.

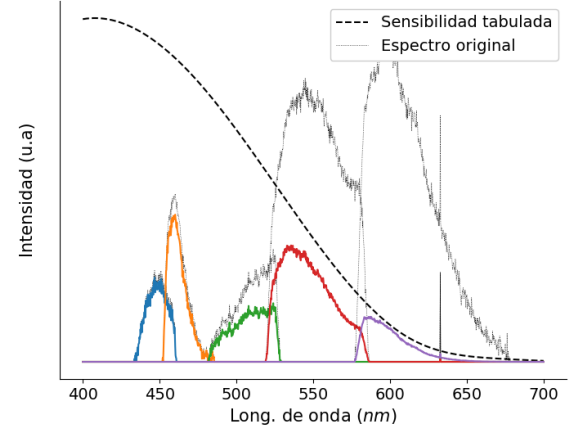


Figura 8. Multiplicación de los espectros originales (graficados para comparación) por la sensibilidad obtenida de una hoja de datos.

Se optimizó un proceso de estiramiento y desplazamiento sobre la curva original de sensibilidad hasta obtener la relación deseada. Los resultados de dicha relación y la modificación generada sobre los espectros se mostró conjuntamente en la Figura 9.

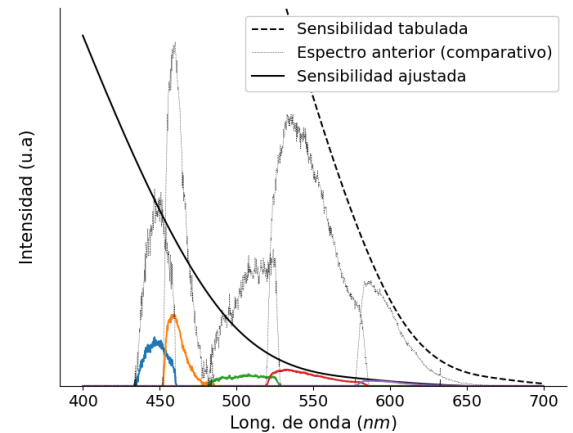


Figura 9. Ajuste realizado a la sensibilidad tabulada y comparación con los resultados anteriores.

El resultado difiere notablemente de la curva presente en la hoja de datos pero consigue el ajuste lineal esperado entre las pendientes y el área encerrada por $h(\lambda)$. La Figura 10 muestra dicho resultado.

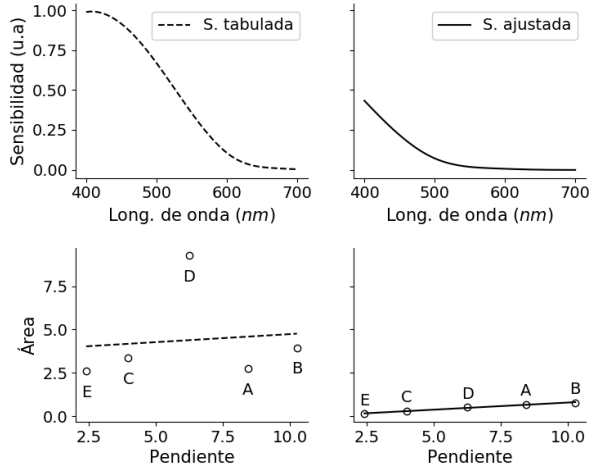


Figura 10. Relación entre las pendientes ajustadas y el área encerrada por los espectros modificados a través de la sensibilidad. A la izquierda el resultado con la curva tabulada y a la izquierda con la curva ajustada.

IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se midió la corriente generada por efecto fotoeléctrico en función del potencial de retardo impuesto.

Para un LED azul, se hizo un barrido discreto de intensidad. Se concluyó que la intensidad no modifica la tensión de corte pero sí el módulo de la corriente. Se encontró mediante un ajuste polinomial una tensión de corte de $(0,34 \pm 0,01) V$.

El método de análisis propuesto (Sección IB) tuvo resultados contradictorios al utilizar la curva de sensibilidad tabulada, evidenciados en los valores obtenidos para las pendientes. Sin embargo, un ajuste aplicado a dicha curva permitió validar el resultado esperado.

Finalmente, se recomiendan dos estrategias nuevas para el desarrollo del experimento: la repetición de mediciones variando la intensidad de la luz, (lo cual puede conducir a valores de V_0 mas precisos), y el estudio de la sensibilidad obtenida aumentando la variedad de espectros (tanto en frecuencia como amplitud).

[1] K. S. Krane, *Modern Physics* (John Wiley & Sons, Inc, Third Edition, 2012).

[2] <https://github.com/labo5-grupo1/fotoelectrico>.

[3] <https://frank.pocnet.net/sheets/096/9/929.pdf>.