

Estudio del efecto Fotoelectrico

Manuel Der, Agustín Somacal, Facundo Sapienza

Junio 2015

Resumen

En este trabajo se estudia el efecto fotoeléctrico que se produce en un fototubo analizando las curvas de corriente en función del potencial de retardo. Se ilumina con leds de diferentes colores y se selecciona la longitud de onda deseada con un monocromador. De las gráficas mencionadas se extrae el valor del potencial de retardo mínimo V_0 para permitir la corriente de electrones utilizando dos metodos diferentes. Con esos datos se obtiene el valor de la constante de Plank h y de la función trabajo del material irradiado. Sin embargo, de los métodos propuestos, por falta de suficientes mediciones, no se consiguió un valor preciso de ninguna, si bien de ambas formas el orden de magnitud era el correcto.

Para obtener más mediciones haciendo un barrido en frecuencias mas fino se analiza en una segunda instancia las ventajas y desventajas de utilizar un monocromador por refracción, uno por difracción o no usar ninguno. Se encuentra que al utilizar el de difracción se puede hacer un barrido suficientemente fino como para permitir barrer varias frecuencias incluso para un mismo led, mientras que no usar monocromador alguno es lo mismo que utilizar el de refracción. Esto último puede resultar de gran interés y utilidad para futuras realizaciones de esta práctica.

Introducción

En el presente trabajo se estudia el efecto fotoeléctrico al mismo tiempo que se analizan las ventajas y desventajas de la utilización de dos monocromadores con el objetivo de mejorar la práctica para futuros grupos.

El efecto fotoeléctrico se produce debido a la cuantización de la energía electromagnética. Cuando un fotón incide sobre un átomo, este puede arrancar un electrón. Para que los electrones atrapados en el material puedan escapar necesitan recibir un mínimo de energía suficiente para vencer las fuerzas de ligadura. A esta energía minima se la llama función trabajo ϕ .

Si el fotón que incide tiene energía $h\nu$ mayor que la función trabajo del material ϕ , entonces el electrón saldrá con una energía cinética igual a $T = h\nu - \phi$. Si colocamos un potencial retardador V entre la muestra sobre la cual se hacen incidir los fotones (que funciona de cátodo) y un ánodo sobre el cual

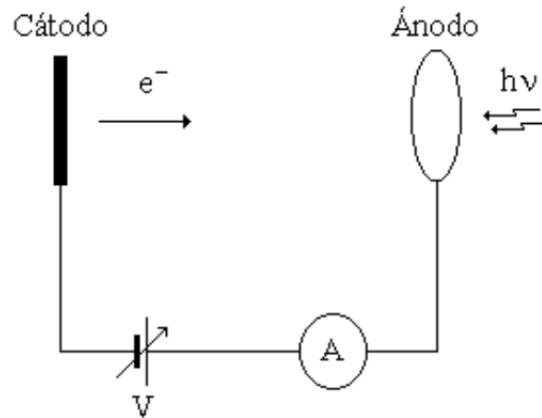


Figura 1: Imagen del dispositivo. Colocando un potencial retardador, es posible observar el efecto fotoeléctrico y a su vez determinar la constante de Planck y la función trabajo del cátodo.

se mide la corriente de electrones (Figura 1), vamos a observar que por debajo de un cierto potencial V_0 no llegan electrones al ánodo, producto de que los electrones no tienen la energía suficiente para vencer al potencial retardador. Dicho potencial V_0 cumple la relación [1]

$$eV_0 = h\nu - \phi \quad (1)$$

donde e es la carga del electrón. Midiendo V_0 para distintas frecuencias, es posible calcular la constante de Planck.

Desarrollo experimental

El presente trabajo estudia el efecto fotoeléctrico que se produce cuando un haz de luz monocromática incide sobre un cátodo compuesto de potasio (ver Figura 1). El dispositivo experimental en primer lugar consta de un led, que funciona como fuente de luz, cuya intensidad se controla mediante un generador de funciones que emite una onda sinusoidal de tensión con un *offset* = 3,5V (es necesario para que no se apague mantener tensiones positivas), $V_{pp} = 2V$ y una frecuencia de 10kHz.

A continuación se ubica el monocromador con el cual se filtra una longitud de onda en particular, permitiendo hacer el barrido en frecuencias. En una primera instancia se utilizó un monocromador por refracción, el cual ya venía empleándose en prácticas pasadas, y luego se probó con un monocromador por difracción 82-410.25 Metert Ebert (Jarell ash division) con la finalidad de evaluar si convenía usar un monocromador, el otro, o directamente no usar ninguno.

A la salida del monocromador, como se puede observar en la Figura 2 , se ubica el fototubo, constituido por un ánodo en forma de aro para dejar pasar los fotones, y un cátodo, lugar donde se produce el efecto fotoeléctrico. El potencial retardador que se aplica entre el ánodo y el cátodo es controlado por el lock-in.

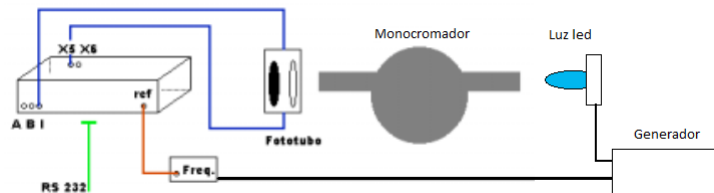


Figura 2: Dispositivo experimental. El lock-in usa como referencia la frecuencia con la cual esta modulado el led. La luz del led incide sobre el monocromador. A la salida del mismo se encuentra el fototubo, dentro del cual se encuentran el ánodo y cátodo.

Finalmente se conecta el fototubo al lock-in con el fin de medir las pequeñas corrientes que se generan debido a los electrones desprendidos por efecto fotoeléctrico. El Lock-in es un amplificador selectivo de señales que llegan con una frecuencia de referencia determinada. Es por esto que al led se lo modula con una tensión variable de frecuencia fija, igual a la que el lock-in usa de referencia.

Al lock-in, a su vez, se lo conecta a la computadora y mediante un programa de Lab-View se adquieren los datos. El mismo permite comunicarse con el Lock-in para setear el potencial de frenado y a su vez medir la corriente que se genera en el ánodo debido al efecto fotoeléctrico. El programa en Lab-View permite hacer un barrido en voltaje y, para cada uno, calcular la corriente. Durante la experiencia se observó que cuando una medición de corriente concluía y se cambiaba el potencial, la corriente tardaba aproximadamente 5 segundos en estabilizarse, por lo que se esperaba ese tiempo para la siguiente toma del dato.

Se realizaron distintas mediciones con leds de longitudes de onda de aproximadamente $475nm$ (azul), $610nm$ (naranja), $590nm$ (verde) y $440nm$ (violeta).

Análisis

Comparación de monocromadores

Si bien el objetivo de la práctica tal como está presentado consiste en poder observar el efecto fotoeléctrico y en función de ello poder determinar la constante de Planck y la función trabajo del material, resulta interesante estudiar cómo la implementación de distintos monocromadores modifica el resultado final. En el laboratorio se cuenta con dos monocromadores, uno que funciona por refracción, que es el que venía usándose en prácticas pasadas, mientras que el segundo es un monocromador por difracción. Se observó que el segundo era mucho más

eficiente para filtrar una determinada longitud de onda con un ancho espectral más chico, mientras que el primero no resultó ser un buen filtro.

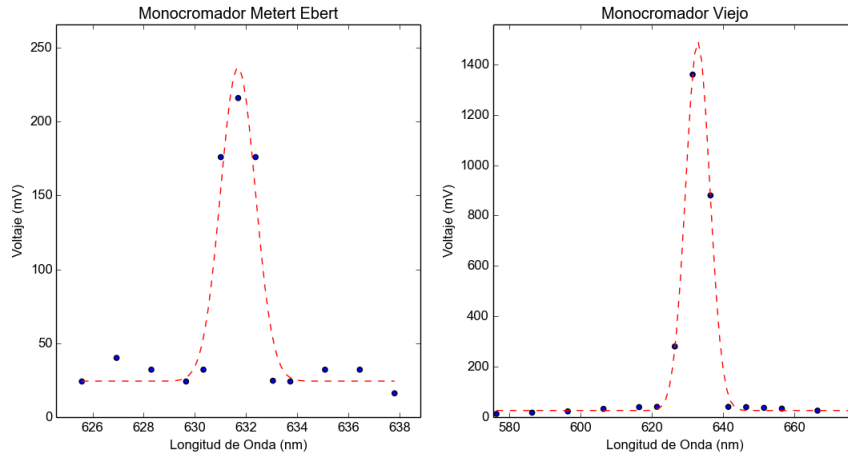


Figura 3: Intensidad medida en función de la longitud de onda filtrada según cada monocromador. A la izquierda, para el monocromador Metert Ebert y a la derecha para el monocromador por refracción usual de esta práctica. En ambos se realizó un ajuste gaussiano, obteniendo $\sigma_2 = (0,8 \pm 0,1)nm$ para el monocromador nuevo y $\sigma_1 = (1,9 \pm 0,1)nm$ para el viejo.

Para determinar la calidad del filtro de monocromador, lo que se hizo fue medir para el láser rojo la distribución de intensidad en longitud de onda a la salida de cada monocromador. Los resultados se muestran en la Figura 3, donde se obtiene el perfil de intensidad en función de la longitud de onda para el monocromador por refracción (izquierda) y el monocromador por difracción (derecha). El láser puede considerarse como una fuente de luz perfectamente monocromática, mientras que los monocromadores tienen un cierto ancho de banda en el cual dejan pasar varias frecuencias distintas. El resultado puede considerarse una función gaussiana, donde el ancho de la campana es una medida del error que se induce sobre la medición de la longitud de onda para cada monocromador. Para el primer monocromador la dispersión es de $\sigma_1 = (1,9 \pm 0,1)nm$, mientras que para el segundo de $\sigma_2 = (0,8 \pm 0,1)nm$. El ancho de la campana se corresponde a dos veces la dispersión. Se puede observar que el nuevo monocromador es mucho mejor filtro que el que se viene usando en las prácticas de fotoeléctrico.

Cálculo del potencial retardador

En esta sección se analiza cómo calcular el potencial retardador V_0 . En teoría, si variamos el potencial V deberíamos observar que para voltajes menores que V_0 no medimos ninguna corriente, mientras que, para voltajes mayores, la co-

riente va en aumento. Sin embargo, se observa que la corriente va aumentando suavemente (Figura 4), por lo que no queda claro qué valor tomar para el voltaje característico V_0 .

En estas condiciones, es necesario establecer un criterio para determinar V_0 . Para ello, se establecieron distintos criterios y se compararon los resultados para cada uno de ellos.

El primero consiste en interpolar linealmente los dos extremos de la curva. Es decir, la región donde la corriente sube suavemente queda omitida, y sólo son analizados los potenciales donde la corriente es constante y donde aumenta linealmente con el voltaje. Del punto de intersección de ambas rectas es tomado el valor de V_0 .

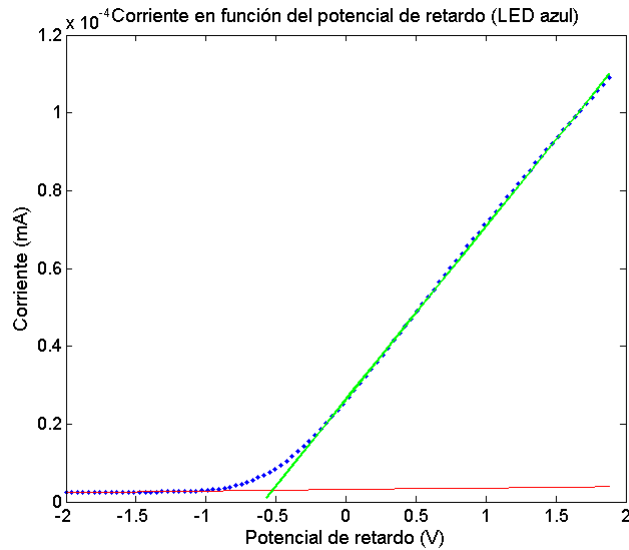


Figura 4: Corriente en función del potencial de frenado para el led azul y el monocromador Ebert Emert. Se realizan dos ajustes lineales y de la intersección de ambas rectas se calcula el valor de V_0 .

Es importante notar que aun para potenciales menores a V_0 la corriente no es nula. Esto podría llegar a deberse a corrientes espurias de potasio, material que compone el cátodo.

El segundo método consiste en hallar el punto en el cual la derivada de la curva comienza a ser positiva mediante un procedimiento numérico. Se calcula la misma tomando los cocientes incrementales para voltajes y corrientes consecutivos, y se determina el voltaje del punto donde ésta comienza a ser apreciablemente positiva. Dicho punto fue tomado como el potencial de frenado crítico V_0 necesario para que los electrones llegaran al ánodo sin energía cinética.

Los dos métodos exhibidos muestran dos formas distintas de hallar el potencial V_0 . Cabe destacar que es necesario establecer un criterio, dado que las

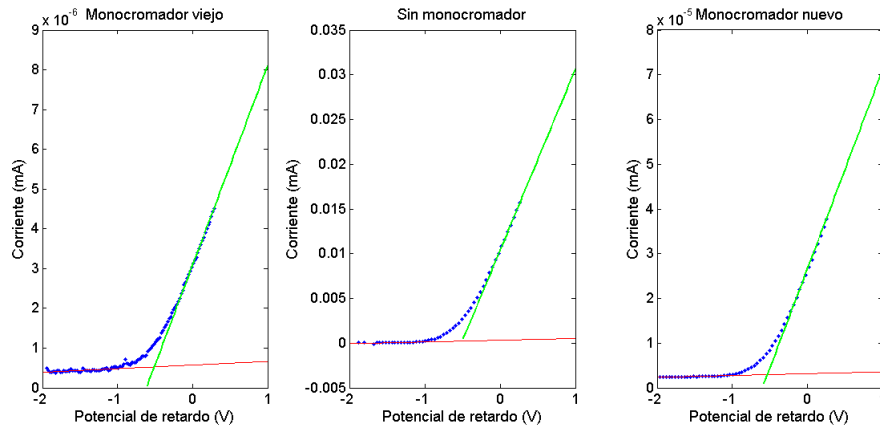


Figura 5: Comparación del perfil de corriente en función del voltaje aplicado para los casos en los que no se usa monocromador y cuando se usa el monocromador viejo y nuevo. Se observa que para los tres los valores de V_0 inferidos según ambos métodos son semejantes.

curvas observadas muestran un crecimiento suave de la corriente en la zona de estudio. Más adelante se presentan los resultados provenientes de calcular la constante de Planck mediante ambos métodos.

Por último se comparan los resultados para los tres casos estudiados: cuando se releva la curva de corriente en función del voltaje retardador usando cada uno de los dos monocromadores y no usando monocromador. En la Figura 5 se observan las curvas en cada caso. Sobre las mismas se realizaron los dos ajustes lineales para estimar el valor de V_0 acorde al primer método antes expuesto. Se observó que el valor de V_0 hallado tanto al usar el monocromador viejo $V_0 = (-0,51 \pm 0,03)V$ como al medir sin monocromador ($V_0 = -0,50 \pm 0,03)V$ resultó ser imposible de diferenciar entre uno y otro. Por este motivo arguimos que el uso del monocromador no ayuda a la experiencia, aunque remarcamos que sería conveniente realizar mas mediciones para asegurar esta afirmación. En cuanto al monocromador Ebert se pudieron barrer al menos dos longitudes de onda diferentes usando aun el led azul obteniendose valores de V_0 bien diferenciados. Esto significa que con el Ebert efectivamente se pueden seleccionar diferentes longitudes de onda para un mismo led pudiendose hacer barridos en frecuencia con mayor precisión y mayor cantidad de puntos que con los metodos viejos.

Cálculo de la constante de Planck

Habiendo calculado el potencial retardador V_0 para distintos leds, es posible calcular la constante de Planck h . De la ecuación 1, se infiere que hay una relación lineal entre la frecuencia ν de la luz incidente y el potencial retardador V_0 . Utilizando los leds azul, violeta, verde y naranja se calculó, para cada uno de ellos, el potencial retardador. La Figura 6 muestra los resultados de graficar

V_0e en función de $\nu = c/\lambda$, donde e es la carga del electrón y c la velocidad de la luz. Para este primer tratamiento, se estimó V_0 mediante el primer método, el de las interpolaciones lineales.

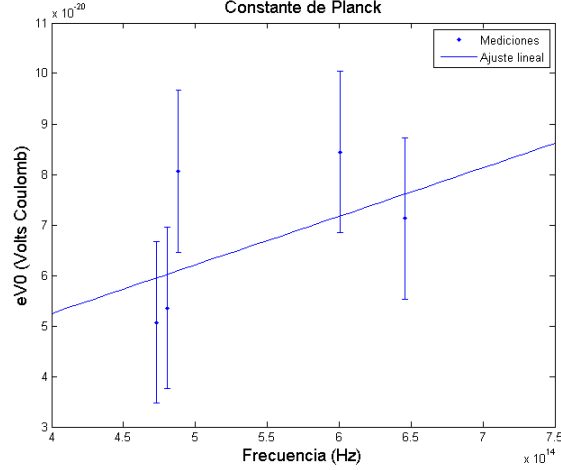


Figura 6: Potencial de frenado crítico eV_0 en función de la frecuencia de la luz incidente. Del ajuste lineal se puede calcular la constante de Planck como $h_1 = (1 \pm 2,5)10^{-34} J \times s$ y la función trabajo del potasio como $\phi_1 = (1 \pm 15)10^{-19} J$.

La pendiente resulta ser de $h_1 = (1 \pm 2,5)10^{-34} J \times s$ y la ordenada al origen de $-\phi_1 = -(1 \pm 15)10^{-19} J$. La pendiente que se obtiene debería ser el valor de la constante de Planck (tabulado en $h = 6,63 \times 10^{-34} J \times s$) y la ordenada al origen el valor de la función trabajo del material que compone el cátodo, en este caso el potasio, para el cual $\phi = 3,69 \times 10^{-19} J$ [2]. Sin embargo se observa que aunque los valores medidos con alta precisión están comprendidos en el intervalo de error, este supera el 100 por ciento de incertidumbre. Creemos que esta enorme discrepancia se debe sobre todo a las pocas mediciones que se lograron obtener durante el transcurso de la experiencia (sólo 5) en conjunción con el método utilizado para hallar V_0 pues, como se verá a continuación, haciendo uso del segundo método se obtienen resultados más acordes con lo esperado.

En lo relativo al segundo método, la Figura 7 muestra la relación entre eV_0 y ν para los cinco leds estudiados, de colores azul, naranja, verde y violeta respectivamente. Como es evidente, la dependencia entre ambas magnitudes resulta ser marcadamente lineal, obteniendo para el ajuste realizado una aproximación satisfactoria de la relación encontrada ($R^2 = 0,99$). Además, la pendiente de dicha recta, según la ecuación 1 resulta ser la constante de planck h , para la cual se halló un valor experimental de $h_2 = (4,3 \pm 0,9) \times 10^{-34} J \times s$. Por último, la ordenada al origen se vincula con la función trabajo ϕ , es decir, la energía necesaria para arrancar al electrón correspondiente del cátodo. A partir del ajuste, se obtuvo para esta magnitud un valor de $\phi_2 = (1,5 \pm 0,5) \times 10^{-19} J$. Si bien

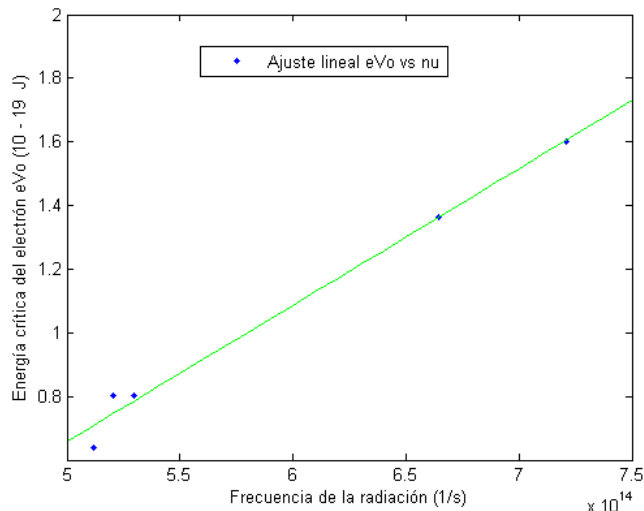


Figura 7: Relación entre la frecuencia ν de la radiación y la energía de retardo crítica eV_0 . Se observa la dependencia lineal entre las dos magnitudes a partir de un ajuste mediante el método de cuadrados mínimos. La pendiente, según el modelo teórico, coincide con la constante de Planck $h_2 = (4,3 \pm 0,9) \times 10^{-34} J \times s$.

ambos resultados no se corresponden exactamente con el valor esperado, los ordenes de magnitud son correctos.

Dado que la disponibilidad de longitudes de onda con las que se podía medir estaba limitada por los colores de los leds con los que se contaba en el laboratorio más lo que pudimos comprar, consideramos que el resultado es exitoso para ambos métodos. Para poder obtener un valor más preciso, sería necesario realizar más mediciones con colores más variados, razón por la cual se estudió la utilización del monocromador ebert.

Conclusiones

A lo largo de la experiencia fue posible observar y estudiar el efecto fotoeléctrico al relevar las curvas de corriente en función del potencial retardador y calcular el potencial de frenado V_0 . Realizando el pertinente análisis, estudiando la dependencia de V_0 en función de la longitud de onda, se estimó la constante de Planck mediante dos métodos distintos. Para el primer método (intersección de lineales) se obtuvo $h_1 = (1 \pm 2,5)10^{-34} J \times s$ y para el segundo (derivada) $h_2 = (4,3 \pm 0,9)10^{-34} J \times s$, resultado que se asemeja, en orden de magnitud, con el valor tabulado de $h = 6,63 \times 10^{-34} J \times s$. A su vez, para la función trabajo se tuvo $\phi_1 = (1 \pm 15)10^{-19} J$ y $\phi_2 = (1,486 \pm 0,5) \times 10^{-19} J$. El resultado del primer método es mucho más impreciso, que el que se obtuvo para el segundo

método. Las discrepancias y los errores altos los suponemos debidos a las pocas mediciones que se pudieron realizar. Se aconseja tomar más de 8 mediciones para valores diferentes de frecuencia de la luz.

A raíz de esta necesidad se estudió la posibilidad de usar un nuevo monocromador (Ebert) o no usar ninguno siendo esto de particular interés para las futuras realizaciones de esta práctica. Utilizando el método de las pendientes se midió cómo variaba el valor de V_0 cuando no se usaba monocromador, cuando se usaba el monocromador por refracción y cuando se usaba el de difracción. Se encontró que el primero de ellos da resultados iguales a si no se hubiera usado ninguno, por lo que se aconseja dejar de usarlo. Sin embargo, también se sugiere realizar más mediciones que confirmen esta conclusión puesto que se analizó solamente lo que ocurría con el led azul. Por otro lado, se encontró que el segundo monocromador resulta ser un filtro adecuado que permite distinguir varias longitudes de onda incluso para un mismo led posibilitando entonces realizar los barridos en frecuencia necesarios para obtener mayor precisión en el cálculo de h . Al compararse el efecto que se produce al incidir un haz de laser rojo de He-Ne en cada uno de los monocromadores y compararse las gráficas de intensidad que se obtienen se puede ver que la dispersión correspondiente al ancho de la campana para el monocromador por difracción es de $(0,8 \pm 0,1)nm$, mientras que para el de refracción es de $(1,9 \pm 0,1)nm$ lo que muestra que el primero tiene mayor poder resolutivo.

Apéndice: Calibración

Para todas las mediciones, fue necesario realizar una previa calibración para saber la relación que existe entre la longitud de onda que indica el monocromador y el valor real de la longitud de onda con la que incide ya sea el led o el láser.

El primer monocromador tiene incorporada una perilla con la cual se puede seleccionar la longitud de onda a filtrar. Sin embargo, la misma se encuentra desplazada con respecto a la longitud de onda que efectivamente filtra. Sabiendo que, por grupos anteriores, la escala y la longitud de onda seleccionadas tienen una relación lineal de pendiente 1, sólo es necesario calibrar usando un láser rojo de He-Ne de $632,8nm$. Con él se obtuvo que la escala marcaba $(24,5 \pm 0,5)nm$ por encima del valor real.

Para llevar a cabo la calibración del segundo monocromador se utilizaron dos láseres distintos, uno de helio-neón de $632,8nm$ y uno verde de $532nm$. Se hace incidir al láser sobre la entrada del monocromador y a la salida se mide la intensidad de luz con un fotodiodo conectado a un osciloscopio. A la entrada y a la salida se colocan rendijas de $250\mu m$. En un primer momento, la intensidad del láser era tal que saturaba al fotodiodo, por lo que se colocó un papel semitransparente delante del artefacto de medición, de manera que se reducía la intensidad de la luz que llegaba. Este procedimiento no modifica lo que se busca, pues la intención es hallar la ubicación del pico de máxima intensidad. Se observaron muchos picos inesperados, se arguyó que se debían a las múltiples reflexiones que en el interior del aparato se producen al incidir la

luz sobre los espejos que lo componen. Sin embargo, era posible encontrar un pico en particular cuya intensidad superaba a la de los demás por lo que se eligió ese para calibrar. Mediante un ajuste gaussiano se determinó que longitud de onda marcada por el artefacto correspondía a la longitud de onda real del láser incidente. Por último, haciendo una interpolación lineal, se obtuvo la relación entre la longitud de onda que se lee del aparato y la que efectivamente está seleccionando el monocromador. Para este segundo monocromador, la pendiente resultó ser de $1,36$ y la ordenada al origen de $432,3nm$. La Figura 8 muestra el ajuste realizado para ambos láseres, el rojo y verde.

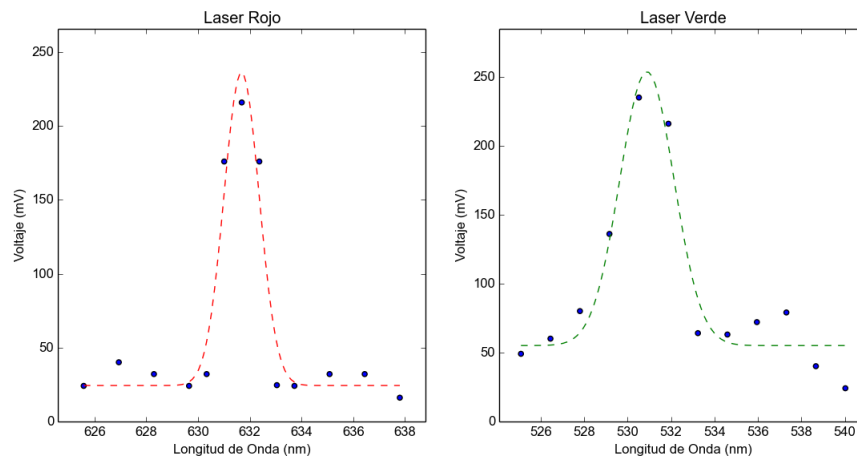


Figura 8: Voltaje medido, proporcional a la intensidad de luz, en función de la longitud de onda. En ambos casos se realizó un ajuste gaussiano para determinar el pico de intensidad y así poder calibrar el monocromador.

Bibliografía

- [1] http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/fotoelec.pdf
- [2] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/tables/photoelec.html>