

Estudio del efecto fotoeléctrico

Ivan Eduardo Paganini, Andres Daniel Perez

Laboratorio 5, Departamento de Cs. Físicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA,
Argentina. Mayo 2011.
Profesora: Andrea Bragas

En el presente trabajo se estudió el efecto fotoeléctrico al hacer incidir un haz de luz monocromática sobre un cátodo de potasio. Entre el cátodo y un ánodo, se estableció una diferencia de potencial variable. Para diferentes longitudes de onda se halló el valor mínimo de tensión para la cual se detectó fotocorriente y se determinó la constante de Planck. Posteriormente, para distintos valores de tensión, se varió la longitud de onda del haz de luz y se encontró la frecuencia mínima para la cual se detectó fotocorriente. De esta manera se determinó la función trabajo del potasio.

Marco teórico

Cuando luz monocromática incide sobre un cátodo de material fotosensible, éste emite electrones con energía cinética que depende de la longitud de onda de la luz incidente y del tipo de material del cátodo. El proceso es denominado emisión fotoeléctrica, y los electrones emitidos fotoelectrones. En el presente trabajo se midió la energía de dichos electrones para hallar la constante de Planck y la función trabajo del material del cátodo.

Efecto fotoeléctrico:

Según la teoría cuántica del efecto fotoeléctrico propuesta por Einstein en 1905, una fuente de ondas electromagnéticas de frecuencia ν emite cuantos de energía:

$$E = h\nu \quad (1)$$

donde h es la constante de Planck.

Al incidir sobre un material fotosensible, el cuanto es absorbido completamente por algún electrón del material, al cual le transfiere su energía.

El dispositivo para estudiar el efecto fotoeléctrico se muestra en la figura 1, donde el material fotosensible es el cátodo.

Un electrón de la superficie del

fotocátodo podrá desprenderse si la energía absorbida es mayor a la denominada función trabajo del material. Dicha función trabajo se define como la energía necesaria para arrancar un electrón de la superficie con energía cinética nula. Un electrón que no se encuentre en la superficie, necesitará además, una energía adicional para llegar a la misma.

Por lo tanto, la energía máxima con la que se emitirá un fotoelectrón es:

$$E_{\max} = h\nu - \Phi \quad (2)$$

energía correspondiente a los electrones de la superficie. Donde Φ es la función trabajo.^[1]

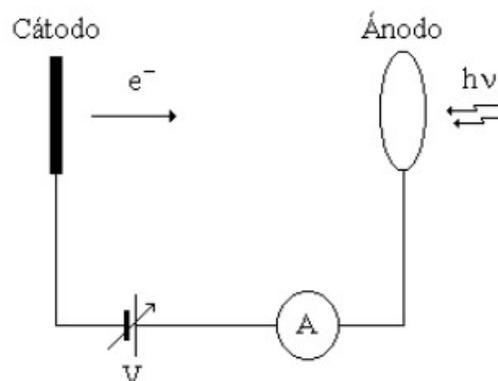


Figura 1: Esquema de un fototubo, dispositivo utilizado para el estudio del efecto fotoeléctrico.

Si se establece un potencial de retardo V entre el cátodo y el ánodo, existirá un potencial V_0 tal que si $V < V_0$ entonces, el fotoelectrón no poseerá energía suficiente para llegar al ánodo y no se establecerá fotocorriente.

Se cumple para el potencial de frenado o corte, V_0 :

$$eV_0 = hv - \Phi \quad (3)$$

donde e corresponde a la carga del electrón.

Por lo tanto, al encontrar el potencial de corte para distintas frecuencias del haz de luz incidente, se puede determinar la constante de Planck y la función trabajo.

Sin embargo, el método no resulta adecuado para determinar la función trabajo ya que en realidad el potencial de corte es la suma del potencial entre el cátodo y el ánodo y un potencial de contacto.^[3]

Por otra parte notamos que, según la ecuación 2 y 3, existe una frecuencia mínima (o longitud de onda máxima) ν_{\min} tal que si $\nu < \nu_{\min}$ no llegará al ánodo ningún electrón, por más que se establezca una diferencia de potencial aceleradora. Entonces:

$$h\nu_{\min} = \Phi \quad (4)$$

Para la frecuencia mínima, ν_{\min} , la energía del fotón es la necesaria para arrancar un electrón que se emite con energía cinética cero.

Para frecuencias mayores que ν_{\min} se producirá fotocorriente mientras que para frecuencias menores a ν_{\min} no se registrará.

Luego, averiguando ν_{\min} , obtenemos la función trabajo del material del fotocátodo.^[2]

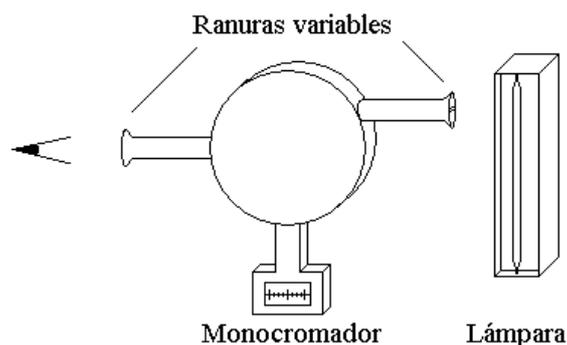


Figura 2: Dispositivo experimental para verificar la calibración. En la ranura izquierda se observan las líneas espectrales.

Descripción experimental

Calibración del monocromador:

Se realizó una verificación de la calibración del monocromador de prismas Winkel-Zeiss, ya que el instrumento posee una perilla que permite seleccionar la longitud de onda necesaria. El dispositivo experimental se muestra en la figura 2.

El método consiste en la distinción de las líneas espectrales de distintas lámparas que contienen gases. Se ajustaron los anchos de las rendijas del monocromador para obtener la mayor resolución posible, sin perder intensidad.

Se utilizaron dos tipos de lámparas: de Kriptón y de Hidrógeno. Los valores brindados por el monocromador se compararon con los del manual de fabricante, Electro-Technic SE-9960.

Constante de Planck:

Para el estudio del efecto fotoeléctrico se utilizó el dispositivo experimental mostrado en la figura 3. Se usó un led blanco cuyo haz de luz se hizo incidir en un fototubo, previo paso por el monocromador. El fototubo, como se modela en la figura 1, consiste de un cátodo de potasio y un ánodo en forma circular mantenidos a una diferencia de potencial variable.

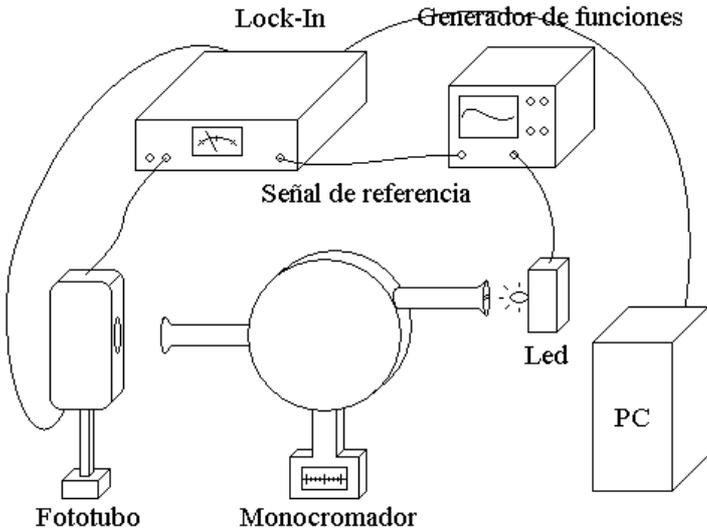


Figura 3: Dispositivo experimental para el estudio del efecto fotoeléctrico.

La fotocorriente que se genera, se mide con un Lock-In Stanford Research Systems SR510, debido a que la señal que se trata de medir es muy pequeña en comparación con el ruido presente. El Lock-In no solo amplifica la señal, sino que filtra el ruido. Para ello, es necesaria una señal de referencia, entonces se conectó el Lock-In a un generador de funciones con el cual se alimentó el led. La señal de alimentación, al igual que la de referencia, es de 979Hz de frecuencia.

El amplificador Lock-In mide la componente de la señal que está a una determinada fase con la señal de referencia. Para aumentar la intensidad de la medición, se buscó poner en fase ambas señales. Sin embargo, el visor que indica la fase seleccionada estaba dañado. Por lo que se utilizó una señal a potencial constante y se varió la fase hasta que se obtuvo corriente nula, lo que indica que las señales se encuentran en contrafase. Una vez obtenido el valor mínimo, se cambió la fase en 90° para colocar las señales en fase. Se logra más precisión buscando el cero de corriente, debido que se puede ir achicando la escala y corregir de manera fina la fase.

El Lock-In no solo recoge

información sobre la fotocorriente, sino que también controla la tensión entre el cátodo y el ánodo, mediante la PC, por lo que podemos variar la tensión y simultáneamente medir la fotocorriente.

En realidad el Lock-In mide voltaje (que resulta proporcional a la fotocorriente) en función del potencial de retardo. No obstante, como se quiere identificar solo el potencial de frenado, no se presentará la conversión de voltaje a corriente.

Para determinar el potencial de frenado y de esta manera encontrar la constante de Planck, se fijó una longitud de onda en el monocromador, y se tomaron datos sobre la amplitud de la fotocorriente variando la tensión entre el cátodo y el ánodo. Se varió el rango de voltajes, con el fin de obtener una buena resolución de la zona próxima al potencial de corte.

Se repitió la experiencia variando la longitud de onda seleccionada, desde 430nm a 680nm.

Función trabajo:

Se utilizó el dispositivo experimental descrito anteriormente y que se muestra en la figura 3. Se fijó el potencial entre el cátodo y el ánodo, y se midió la fotocorriente variando la longitud de onda del haz de luz incidente. De esta manera se determinó la frecuencia mínima (o longitud de onda máxima) para la cual se registra señal a un dado potencial de retardo.

Para una dada longitud de onda y tensión del fototubo se midieron 50 puntos. Se consideró como valor de la fotocorriente la media de los valores relevados, y como error experimental al desvío estándar.

Se utilizó el mismo rango de longitudes de onda que en la determinación de la constante de Planck, y se repitió la experiencia cambiando la tensión en el fototubo, desde -0,2V a 3V.

Resultados

Calibración del monocromador:

		Medición(nm)	Manual(nm)
Kriptón	Verde	555	560
	Naranja	580	590
	Rojo	685	675
Hidrógeno	Violeta	440	440
	Azul	495	490
	Rojo	680	670

Tabla 1: Calibración del monocromador. Se presentan los datos de algunas líneas espectrales de los gases junto con su valor tabulado.

En la tabla 1 se muestra los valores de las longitudes de onda de algunas de las líneas espectrales de las lámparas utilizadas, junto con el valor tabulado de las mismas. Se verificó la calibración del monocromador, con un error de 10nm, valor que concuerda con calibraciones de grupos de trabajo anteriores.

Constante de Planck:

En cuanto a las mediciones de la fotocorriente en función del potencial aplicado entre el cátodo y el ánodo, en la figura 4 se muestra una curva característica, la cual corresponde a una longitud de onda de $(460 \pm 10)\text{nm}$.

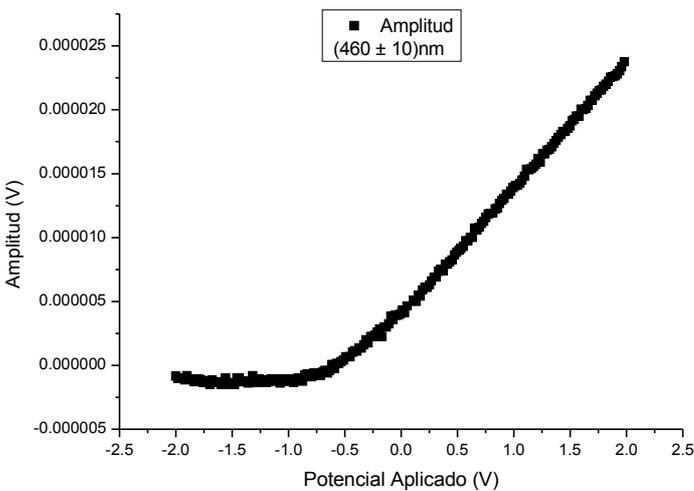


Figura 4: Gráfico de la amplitud (de la fotocorriente) en función del potencial aplicado entre el cátodo y el ánodo del fototubo.

Notamos que para potenciales de retardo grandes, la corriente no es exactamente cero, sino negativa. Esto se debe al hecho que puede haber depositado potasio (material del cátodo) sobre el ánodo.

Determinar el potencial de corte presenta la dificultad, como se ve en la figura 4, que existe una zona donde la corriente comienza a aumentar, en vez de un punto claramente identificable donde la fotocorriente presenta un apartamiento de las fluctuaciones estadísticas.

Para encontrar el potencial de corte, se analizaron tres métodos distintos:

Inspección ocular: como previamente se mencionó, el problema de este método radica en identificar claramente el potencial de frenado. El error se tomó como el rango de la zona donde la fotocorriente comienza a aumentar. En la figura 5 se muestra una ampliación de la figura 4 para mostrar la dificultad de determinar el potencial de corte mediante inspección ocular.

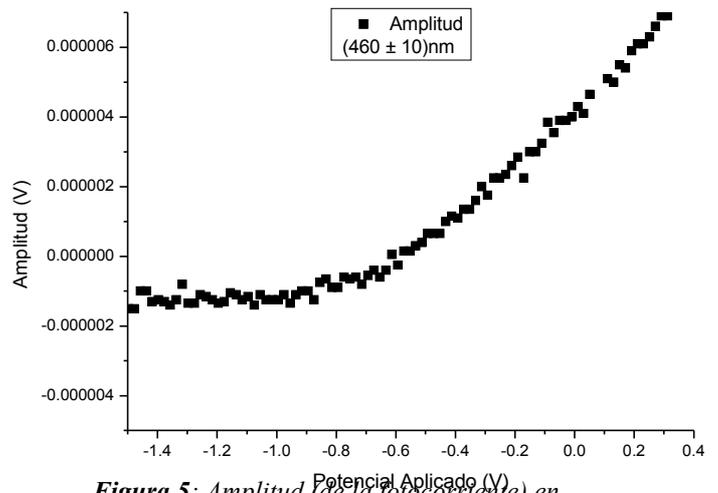


Figura 5: Amplitud (de la fotocorriente) en función del potencial aplicado entre el cátodo y el ánodo. Ampliación de la figura 4. Se muestra la dificultad de determinar el potencial de corte mediante inspección ocular.

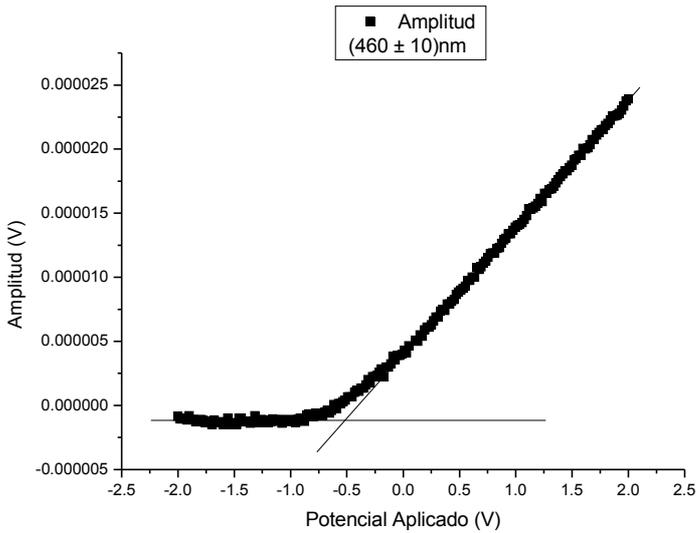


Figura 6: Amplitud (de la fotocorriente) en función del potencial aplicado entre el cátodo y el ánodo. Se ilustra el método de intersección de rectas.

Intersección de rectas: se trazaron dos rectas, en las regiones con y sin fotocorriente. Se tomó como potencial de corte la intersección de dichas rectas. En la figura 6 se muestra un ejemplo del método.

Intersección de ajustes lineales: se realizaron ajustes lineales en las zonas con y sin fotocorriente. Se tomó como potencial de corte la intersección de dichos ajustes. En la figura 7 se muestra un ejemplo del método.

Se estableció como error para los últimos dos métodos el error determinado en la inspección ocular.

En el caso de intersección de rectas, la ubicación “manual” de las rectas implica asumir a priori que se está teniendo un error basado tanto en una percepción errónea de la pendiente como en la ubicación de la recta en sí dentro de la región de los puntos obtenidos.

En cuanto a los ajustes, la determinación de los segmentos está supeditada a asumir que ciertas regiones se comportan como el modelo indica, lo que requiere poder excluir cierta cantidad de puntos escogidos de manera

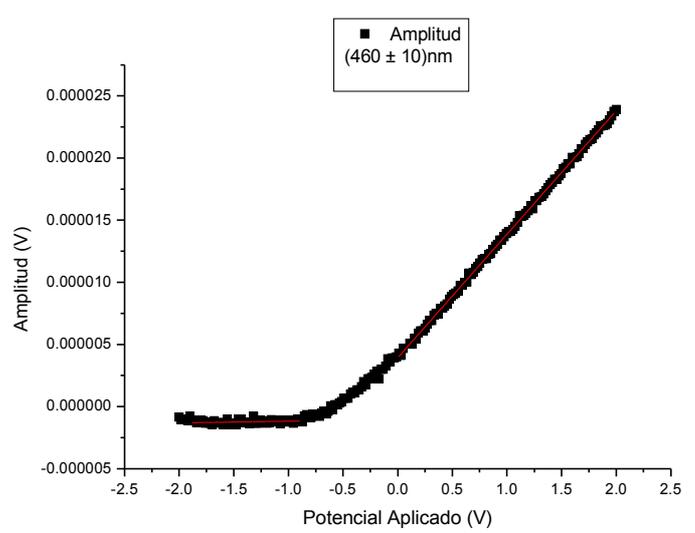


Figura 7: Amplitud (de la fotocorriente) en función del potencial aplicado entre el cátodo y el ánodo. Se ilustra el método de intersección de ajustes lineales.

cualitativa. Es preciso aclarar que se pueden tomar segmentos alejados de la región anómala para evitar el problema, pero eso podría aumentar el error de la pendiente porque la variación de corriente no varía de forma completamente lineal.

Por lo señalado se consideró que el error ocular es excesivo pero resulta una cota aceptable para los tres métodos.

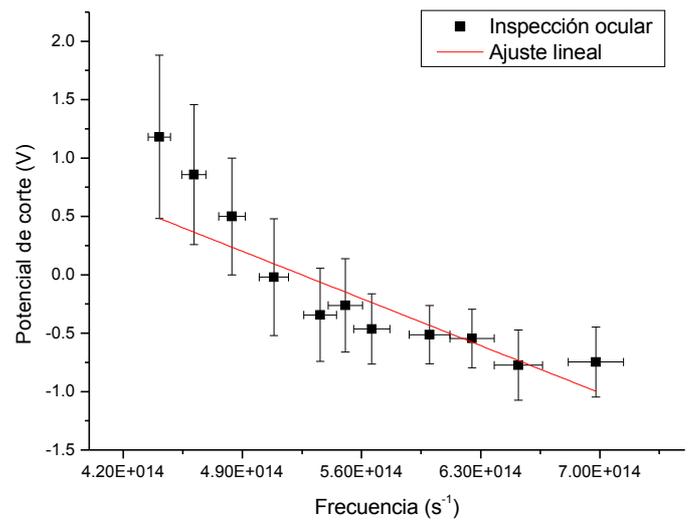


Figura 8: Potencial de corte en función de la frecuencia del haz de luz incidente. Pendiente: $(-5,7 \pm 1,0)10^{-15}$ Vs, ordenada: $(3,03 \pm 0,63)$ V. $R=0,74$

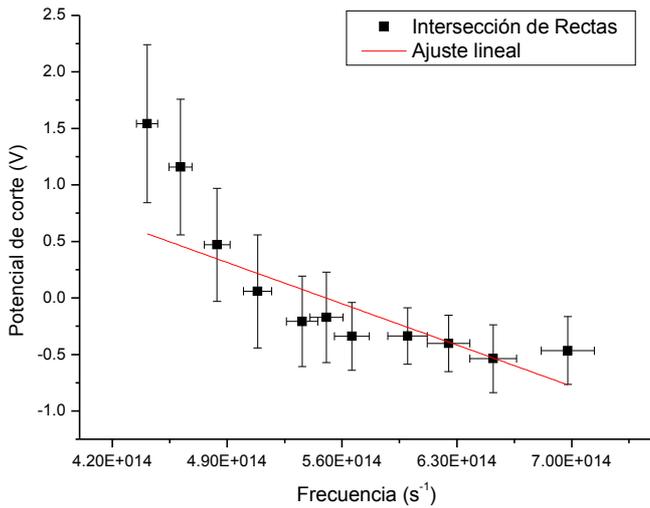


Figura 9: Potencial de corte en función de la frecuencia del haz de luz incidente. Pendiente: $(-5,2 \pm 1,3)10^{-15}$ Vs, ordenada: $(2,86 \pm 0,78)V$. $R=0,60$

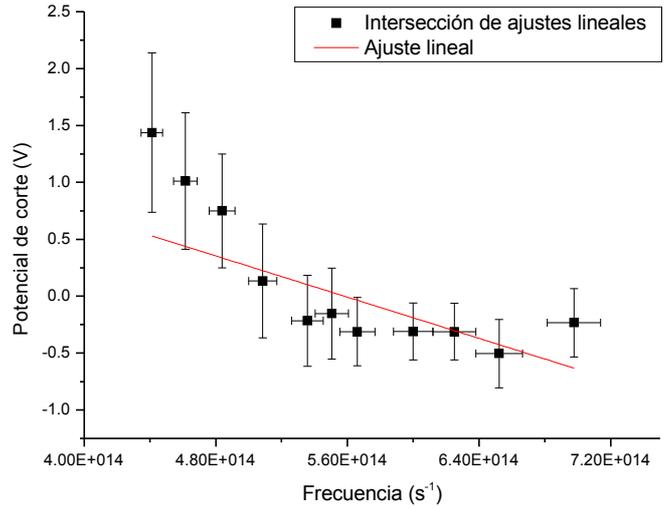


Figura 10: Potencial de corte en función de la frecuencia del haz de luz incidente. Pendiente: $(-4,5 \pm 1,4)10^{-15}$ Vs, ordenada: $(2,53 \pm 0,85)V$. $R=0,48$

Para cada una de las curvas de fotocorriente en función del potencial entre el cátodo y el ánodo, se analizaron los tres métodos para determinar el potencial de corte. Se graficó dicho valor en función de la frecuencia del haz de luz incidente. En las figuras 8 a 10 se presentan los gráficos de los tres métodos, junto con un ajuste lineal de los datos para hallar la constante de Planck y la función trabajo, según la ecuación 3. En la tabla 2 se presentan los valores calculados para cada método.

Notamos que los valores obtenidos no presentan diferencias significativas y coinciden con el valor tabulado de la constante de Planck, $h = 6,626.10^{-34}$ J.s, y con la función trabajo del potasio, $\Phi = 2,29$ eV (salvo con el método inspección ocular).

Método	h (Js)	Φ (J)	Φ (eV)
Ocular	$(9,2 \pm 1,7)10^{-34}$	$(4,8 \pm 1,0) 10^{-19}$	$(3,02 \pm 0,63)$
Rectas	$(8,3 \pm 2,1) 10^{-34}$	$(5,6 \pm 1,3) 10^{-19}$	$(2,86 \pm 0,78)$
Ajustes	$(7,3 \pm 2,3) 10^{-34}$	$(4,1 \pm 1,4) 10^{-19}$	$(2,52 \pm 0,84)$

Tabla 2: Constante de Planck y función trabajo del cátodo (potasio) calculados mediante los tres métodos de determinación del potencial de corte.

Sin embargo hay que tener en cuenta que los ajustes realizados en las figuras 8 a 10 no son completamente confiables:

- Inspección ocular: $R=0,70$
- Intersección de rectas: $R=0,60$
- Intersección de ajustes lineales $R=0,48$

Contrario a lo esperado, el ajuste más confiable resulta utilizando el método inspección ocular, aunque los métodos restantes brindan resultados que coinciden con los valores tabulados.

Función trabajo:

Considerando el método para calcular la función trabajo hallando la frecuencia mínima, se midió la fotocorriente en función de la longitud de onda. En la figura 11 se muestra una curva característica, la cual corresponde a una tensión entre el cátodo y el ánodo de 2V.

Para todos los potenciales entre el cátodo y el ánodo con que se trabajo, se notó un comportamiento similar al observado en la figura 11, donde la fotocorriente registrada disminuye sensiblemente para la longitud de onda de 500nm. Es probable que la intensidad de luz emitida por el led para

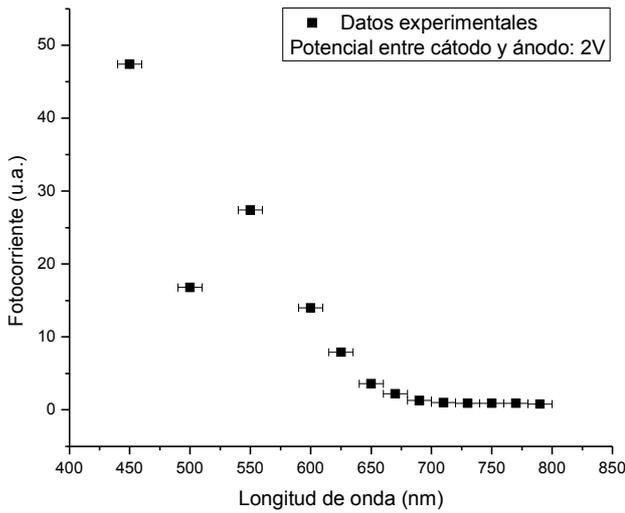


Figura 11: *Fotocorriente en función de la longitud de onda del haz incidente para la identificación de la longitud de onda máxima*

dicha longitud de onda, sea marcadamente menor que las demás.

Para la identificación de la frecuencia mínima se utilizó un método ocular, debido a que en este caso, el valor buscado es fácilmente ubicable. Tampoco se poseen tantos datos como en el caso del potencial de corte, para emplear un método más preciso, además del hecho que, en dicho caso, los valores brindados por los diferentes métodos no presentan diferencias significativas entre si.

Se tomó como error para la longitud de onda máxima (o frecuencia mínima) 20nm, que corresponde a la mínima división con que se revelaron los datos.

Posteriormente se graficó la frecuencia mínima en función del voltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo, se realizó un ajuste lineal a los datos para poder calcular la función trabajo. El gráfico se muestra en la figura 12.

Los valores calculados son:

$$\Phi = (3,31 \pm 0,05) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$= (2,06 \pm 0,03) \text{ eV}$$

$$h = (6,04 \pm 0,95) 10^{-33} \text{ J.s}$$

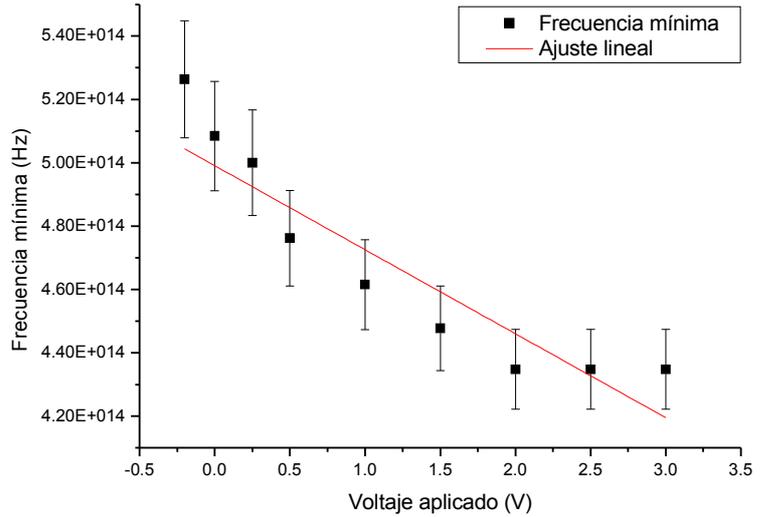


Figura 12: *Frecuencia mínima en función del voltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo*
 Pendiente: $(-2,6 \pm 0,4) 10^{13} (V.s)^{-1}$, ordenada: $(4,99 \pm 0,07) 10^{-14} \text{ Hz}$. $R=0,83$.

Observamos que si bien el valor de la función trabajo no coincide con el valor tabulado, no presenta diferencias significativas con el calculado según el potencial de corte, con los métodos de intersección de rectas y de ajustes lineales. De todos modos, para determinar la función trabajo resulta más preciso hallar las frecuencias mínimas, debido a que se obtiene menor error y un ajuste más confiable. $R = 0,83$, para el gráfico de la figura 12.

Conclusión

Los resultados obtenidos son satisfactorios dado que se realizó una experiencia relativamente clásica y simplemente se busco reafirmar lo medido en el pasado. En ese aspecto el nivel de precisión con el que se contó fue lo suficientemente alto para tener resultados que sean del orden de los valores establecidos y que queden enmarcados por el margen de error los valores tabulados de la constante de Planck y la función trabajo del potasio.

Se efectuó una gran acumulación de mediciones, sucesivas mejoras se tienen que dar en el terreno del estudio

de los resultados. Pensar en otros métodos para encarar el problema de la búsqueda del valor de la tensión de corte y así tener cotas del error menos cualitativas y más pequeñas. También se puede cuestionar el nivel de validez del modelo, donde una función lineal parece una buena aproximación a primer orden pero que no puede explicar regiones que presentan anomalías. De hecho, para valores de potencial entre el cátodo y el ánodo relativamente altos (aproximadamente 5V) se puede apreciar una saturación en el crecimiento de la corriente en función del aumento de la tensión, lo que requiere un modelo para explicar dicho fenómeno.

También se puede hacer un estudio minucioso de la corriente en función del voltaje que recibe el led, que por extensión es un estudio sobre la intensidad emitida.

Referencias

- [1] Fundamentos de Física Moderna, Robert M. Eisberg, Editorial Limusa.
- [2] Efecto fotoeléctrico, Cátedra Laboratorio 5, FCEyN, UBA.
- [3] Experimental Atomic Physics, Harnwell Livington.