

Efecto Fotoeléctrico

Gonce Maldonado Sergio Emiliano
Laboratorio de Física Contemporánea I
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma México

Se conoce como efecto fotoeléctrico a la emisión de electrones de un metal cuando una luz incide sobre su superficie. Este fenómeno se comprobó experimentalmente utilizando un monoromador para seleccionar 5 frecuencias de la luz incidente de una lampara de mercurio sobre una fotocelda. Se midió y graficó la corriente producida para un rango de voltajes aplicados desde que la corriente es cero hasta su saturación. El voltaje de frenado (aquel tal que la corriente medida es cero) se utilizó para encontrar la constante Planck mediante un ajuste lineal considerando dicho voltaje como función de la frecuencia, el valor obtenido fue $(1.55118 \pm 0.1106) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ y también se encontró la función de trabajo de la fotocelda con un valor de $0.302257 \pm 0.06942 \text{ eV}$.

bien!

1. INTRODUCCIÓN

Desde el siglo XIX se conocía el efecto fotoeléctrico gracias a experimentos hechos Heinrich Hertz, él observó que un par de esferas conductoras emitían arcos eléctricos entre sí con mayor facilidad si eran iluminadas por luz ultravioleta. Experimentos posteriores realizados por Philipp Lenard mostraron que la energía de los electrones emitidos estaba relacionada con la frecuencia ν de la luz incidente, y que la intensidad luminosa únicamente modificaba la cantidad de electrones liberados. Este hecho estaba en clara contradicción con el electromagnetismo, donde la intensidad luminosa está directamente relacionada con la energía. **Referencias**

A principios del siglo XX, con los trabajos de Max Planck sobre la radiación de cuerpo negro, se ponía en duda no sólo la naturaleza clásica de la luz sino también la mecánica clásica en su totalidad. Albert Einstein apoyado en los trabajos de Planck propuso que la energía proveniente de la radiación electromagnética se encuentra cuantizada en paquetes (hoy llamados fotones) cada uno con energía:

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

donde $h = 4.13566766 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ es la constante de Planck. Así el efecto fotoeléctrico podía justificarse como una interacción entre el fotón incidente y el electrón amarrado al metal. **Referencias**

Desde luego, estas ideas entraron en conflicto con la teoría ondulatoria de la luz, que se encontraba fuertemente justificada por los experimentos de interferencia y difracción, Einstein sin embargo, argumentó que la gran cantidad de fotones que participaban en estos fenómenos disfrazaban la naturaleza cuántica de la luz.

Einstein propuso además la existencia de una cantidad denominada función de trabajo:

$$\phi = h\nu_0 \quad (2)$$

tal que cualquier onda electromagnética cuya energía estuviera por debajo de esta cantidad no podría liberar ningún

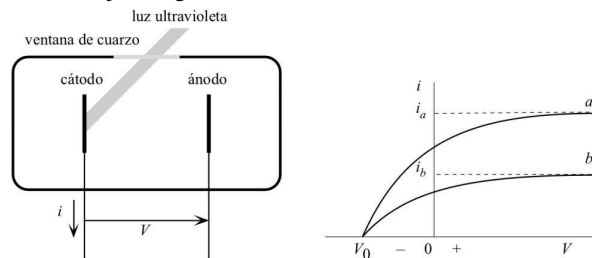
electrón, así la ecuación (1) podría explicar la relación entre la frecuencia y la energía de los portadores de carga. Si $\nu < \nu_0$ entonces no se produciría efecto fotoeléctrico sin importar la intensidad del haz incidente, la frecuencia ν_0 se conoce como frecuencia de corte y al igual que la función de trabajo es una característica del metal.

Combinando las ecuaciones (1) y (2), la energía de los electrones liberados se escribe como:

$$E = h(\nu - \nu_0) \quad (3)$$

Consideremos el arreglo experimental de la Figura 1 (a), si se grafica la diferencia de potencial entre el ánodo y cátodo contra la corriente fotoeléctrica (Figura 2 (b)) se observa que existe un voltaje para el cual todos los electrones emitidos por el cátodo son recogidos por el ánodo, se dice entonces que la corriente ha alcanzado su valor de saturación, dicho valor es proporcional a la intensidad de la luz incidente en el cátodo y a su frecuencia.

Fig. 1. Izquierda (a): Experimento para estudiar el efecto fotoeléctrico, se mide la corriente i para un voltaje aplicado. Derecha (b): Gráfica de voltaje aplicado contra corriente fotoeléctrica, las curvas se aproximan a la corriente de saturación conforme crece el voltaje. Imagen tomada de [2].



Si el voltaje aplicado se hace negativo, el campo eléctrico se opone al movimiento de los electrones, por lo que existe un valor llamado voltaje de frenado $V_0(\nu)$ tal que la corriente fotoeléctrica es cero y la energía de los electrones se debe únicamente a una energía potencial de corte:

$$E = eV_0(\nu) \quad (4)$$

Faltan referencias.

Las ecuaciones llevan puntuación siempre, ya sea ", " o ".".

Comparando con la ecuación (3) se llega a:

$$eV_0(\nu) = h(\nu - \nu_0) \quad (5)$$

Ó escrito de otra forma,

$$V_0(\nu) = \frac{h}{e}\nu - \frac{\phi}{e} \quad (6)$$

La ecuación (6) se puede utilizar para determinar la constante de Planck y la función de trabajo de un metal. **Que es el objetivo de este trabajo, utilizando un bla bla bla**

2. DESARROLLO

1. Materiales

- Monocromador
- Fotocelda
- Lámpara de mercurio
- Electrómetro
- Fuente de voltaje
- Multímetro modelo MUL-500
- Cables UHF y BNC
- Rejillas de 0.5 cm y 0.125 cm

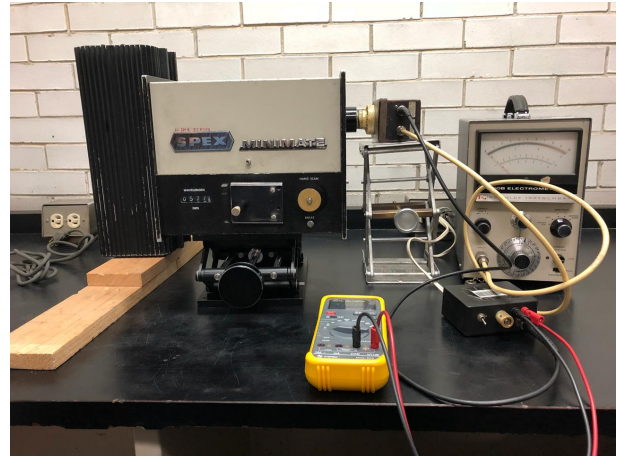
2. Montaje experimental

El monocromador es una caja con dos orificios laterales encargado de seleccionar una longitud de onda de un haz incidente mediante un arreglo interno de prismas y espejos, este se colocó sobre una mesa elevadora para alinear su orificio de entrada con el de la lámpara de mercurio, en el orificio de salida se ajustó la fotocelda nivelada con otra mesa elevadora. Con la finalidad de obtener la luz más intensa y colimada se colocó la rejilla de 0.5 cm a la entrada y la de 0.125 cm a la salida del monocromador.

La fotocelda se conectó a la fuente de voltaje a través del cable UHF, el multímetro y electrómetro se conectaron también a la fuente a través de los cables BNC. El montaje experimental se muestra en la Figura 2.

Normalmente son pies y no encabezados

Fig. 2. Arreglo experimental, de izquierda a derecha: lámpara de mercurio, monocromador, fotocelda, electrómetro.



La fotocelda consta de un metal que presenta efecto fotoeléctrico para longitudes de onda del espectro visible, cuando los electrones se desprenden del metal adquieren movimiento gracias a la energía de los fotones y la diferencia de potencial proporcionada por la fuente los dirige hacia el electrómetro, cuando la diferencia de potencial es negativa la función de la fuente es frenar a los portadores de carga.

La longitud de onda λ que emerge del monocromador se puede controlar mediante una perilla, retirando temporalmente la fotocelda y colocando un fondo opaco se buscó que el haz de salida fuera amarillo con la máxima intensidad. Luego se modificó el voltaje en intervalos de 0.25 V desde 0 hasta 2 V y se midió la corriente producida en la fotocelda con el electrómetro, que se colocó en una escala de 10^{-8} A.

Posteriormente, modificando la escala del electrómetro a 10^{-11} A (cerrando antes la corriente para evitar un cortocircuito) se buscó el voltaje de frenado V_0 . Se observó la existencia de este voltaje desde la primera parte del experimento, ya que la corriente medida es decreciente con el voltaje aplicado, y cuando este es cero la corriente tiene un valor asociado únicamente al efecto fotoeléctrico. El voltaje de frenado se midió en 5 ocasiones, una vez obtenido un promedio de las mediciones se dividió este valor entre 4 con el fin de tener 3 puntos entre V_0 y el voltaje aplicado cero (estos puntos fueron $\frac{V_0}{4}$, $\frac{2V_0}{4}$ y $\frac{3V_0}{4}$).

Lo anterior se repitió para otras 4 longitudes de onda: azul, verde, morado y ultravioleta. Como la corriente se satura a diferentes voltajes dependiendo del color, el intervalo en el que se varía V_a así como su máximo valor dependen de λ . El color que se saturó más rápido fue el morado.

Dado que el monocromador no se encontraba previamente calibrado, la longitud de onda reportada por el instrumento no coincidía con la observada, por tanto se utilizaron las 5 longitudes de onda reportadas en el manual del experimento en lugar de las reportadas por el monocromador, además la incertidumbre asociada a λ no corresponde a la mitad de la

mínima escala, el método para encontrar la incertidumbre de este aparato fue el siguiente:

Ajustando la luz amarilla emergente más intensa, se aumentó y disminuyó este valor en la escala del monocromador hasta que la intensidad de la luz emergente disminuyera, lo cual ocurría en un rango de 15 nm al rededor del punto de máxima intensidad, entonces la incertidumbre asociada se tomó como $\pm 15 \text{ nm}$. Este método puede parecer muy rudimentario, sin embargo, hay que tener en cuenta que los máximos de intensidad se encontraron en base a la sensibilidad del observador para detectar dichos cambios de intensidad.

Se verificó que la diferencia entre la λ reportada por el instrumento y el manual estuviera dentro de este intervalo de incertidumbre para los 4 primeros colores, así se podía asegurar que al colocar la escala del monocromador en la λ reportada en el manual para la luz UV se estuviera realmente obteniendo dicha longitud de onda, ya que esta luz es invisible para el ojo humano.

Procura utilizar longitudes de onda en lugar de colores "450nm" en lugar de "verde". Usar color no es incluyente con los daltónicos.

3. RESULTADOS

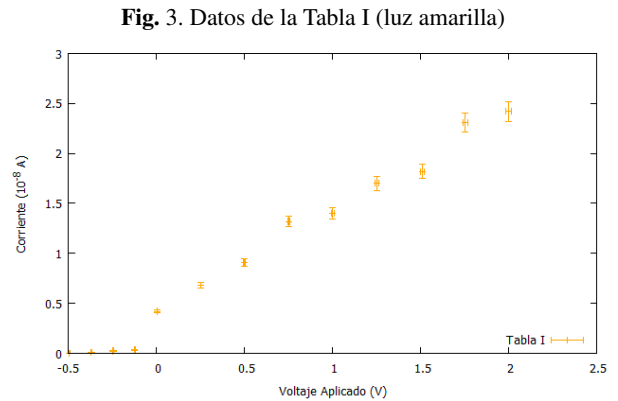
Las Tablas I-V muestran los voltajes aplicados V_a y las correspondientes corrientes medidas i para cada longitud de onda, todas estas representan medidas directas, por lo tanto su incertidumbre asociada (también presente en la tabla) es aquella reportada por el manual del fabricante del instrumento de medición. El primer dato de cada tabla es el voltaje de frenado V_0 , este es el único dato que fue promediado a partir de 5 muestras, por lo que su incertidumbre es la desviación estándar de los datos más la incertidumbre del instrumento de medición.

Para MUL-500 se tiene un error de 0.8% para el voltaje en V, el electrómetro tiene un error de 4% para la corriente hasta 10^{-11} A . Las frecuencias ν asociadas a cada longitud de onda son medidas indirectas de la fórmula $\nu = \frac{c}{\lambda}$, por lo tanto su incertidumbre asociada es $\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$, donde $c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ es la velocidad de la luz en el vacío (considerando el índice de refracción del aire aproximadamente 1).

Las Figuras 3-7 muestran las gráficas V_a vs i de cada tabla de datos con las respectivas barras de incertidumbre.

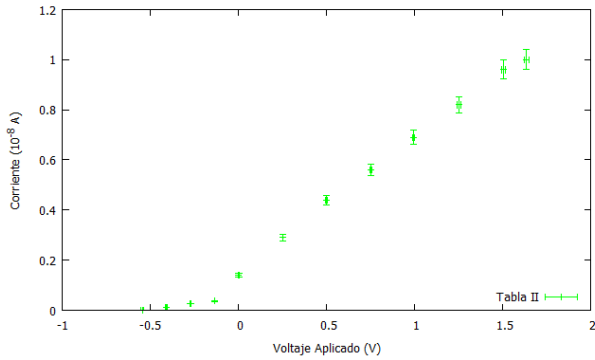
$V_a \text{ (V)}$	$\Delta V_a \text{ (V)}$	$i \text{ (} 10^{-11} \text{ A)}$	$\Delta i \text{ (} 10^{-11} \text{ A)}$
-0.495	0.0044	0	0
-0.371	0.0030	10	0.4
-0.247	0.0020	23	0.92
-0.124	0.0010	33	1.32
$V_a \text{ (V)}$	$\Delta V_a \text{ (V)}$	$i \text{ (} 10^{-8} \text{ A)}$	$\Delta i \text{ (} 10^{-8} \text{ A)}$
0.003	0.0000	0.42	0.017
0.251	0.0020	0.68	0.027
0.499	0.0040	0.91	0.036
0.752	0.0060	1.32	0.053
1.000	0.0080	1.4	0.056
1.253	0.0100	1.7	0.068
1.509	0.0121	1.82	0.073
1.753	0.0140	2.31	0.092
2.000	0.0160	2.42	0.097

Tabla I. $\lambda_1 = 577.0 \pm 15 \text{ nm}$, $\nu_1 = (5.1957 \pm 0.135) \times 10^{14} \text{ Hz}$ (amarillo)



$V_a \text{ (V)}$	$\Delta V_a \text{ (V)}$	$i \text{ (} 10^{-11} \text{ A)}$	$\Delta i \text{ (} 10^{-11} \text{ A)}$
-0.546	0.0073	0	0
-0.410	0.0033	11	0.44
-0.273	0.0022	27	1.08
-0.137	0.0011	37	1.48
$V_a \text{ (V)}$	$\Delta V_a \text{ (V)}$	$i \text{ (} 10^{-8} \text{ A)}$	$\Delta i \text{ (} 10^{-8} \text{ A)}$
0.001	0.0000	0.14	0.006
0.252	0.0020	0.29	0.012
0.499	0.0040	0.44	0.018
0.753	0.0060	0.56	0.022
0.994	0.0079	0.69	0.028
1.251	0.0100	0.82	0.033
1.506	0.0120	0.96	0.038
1.635	0.0132	1.00	0.04

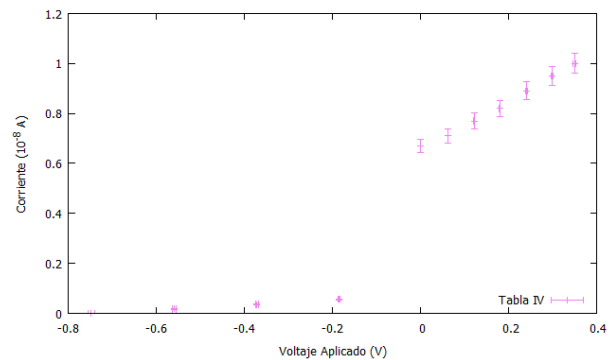
Tabla II. $\lambda_2 = 546.1 \pm 15 \text{ nm}$, $\nu_2 = (5.4897 \pm 0.151) \times 10^{14} \text{ Hz}$ (verde)

Fig. 4. Datos de la Tabla II (luz verde)

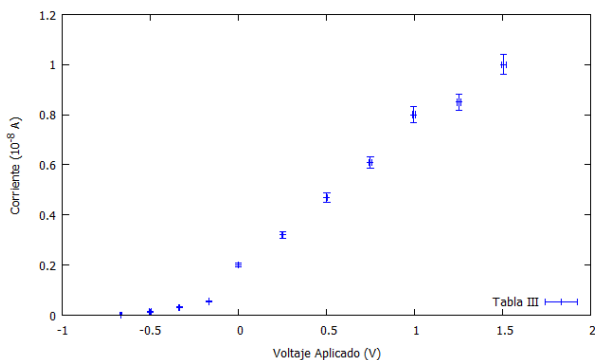
V_a (V)	ΔV_a (V)	i (10^{-11} A)	Δi (10^{-11} A)
-0.749	0.0075	0	0
-0.560	0.0045	17	0.68
-0.372	0.0030	36	1.44
-0.185	0.0015	56	2.24
V_a (V)	ΔV_a (V)	i (10^{-8} A)	Δi (10^{-8} A)
0.000	0.0000	0.67	0.027
0.062	0.0005	0.71	0.028
0.122	0.0010	0.77	0.031
0.180	0.0014	0.82	0.033
0.241	0.0019	0.89	0.036
0.299	0.0024	0.95	0.038
0.350	0.0028	1.00	0.04

Tabla IV. $\lambda_4 = 433.9 \pm 15$ nm, $\nu_4 = (6.9093 \pm 0.239) \times 10^{14}$ Hz (morado)

V_a (V)	ΔV_a (V)	i (10^{-11} A)	Δi (10^{-11} A)
-0.671	0.0058	0	0
-0.503	0.0040	13	0.52
-0.336	0.0027	31	1.24
-0.168	0.0013	55	2.2
V_a (V)	ΔV_a (V)	i (10^{-8} A)	Δi (10^{-8} A)
0.000	0.0000	0.20	0.008
0.250	0.0020	0.32	0.013
0.501	0.0040	0.47	0.019
0.749	0.0060	0.61	0.024
0.995	0.0080	0.80	0.032
1.251	0.0100	0.85	0.034
1.507	0.0121	1.00	0.04

Tabla III. $\lambda_3 = 491.6 \pm 15$ nm, $\nu_3 = (6.0983 \pm 0.186) \times 10^{14}$ Hz (azul)**Fig. 6.** Datos de la Tabla IV (luz morada)

Al igual que con tu compañero (que por cierto, hacer la práctica juntos es una cosa pero no necesariamente necesitan hacer el mismo análisis y presentación de resultados), Siempre que puedas graficar una tabla (como en este caso) deja sólo la gráfica. Además, podías juntar las gráficas para todas las longitudes de onda.

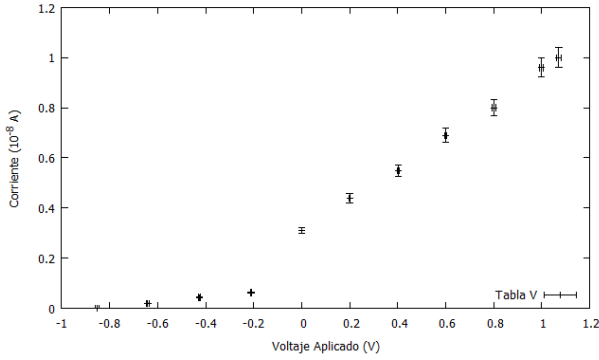
Fig. 5. Datos de la Tabla III (luz azul)

V_a (V)	ΔV_a (V)	i (10^{-11} A)	Δi (10^{-11} A)
-0.852	0.0074	0	0
-0.641	0.0051	20	0.8
-0.426	0.0034	43	1.72
-0.211	0.0017	62	2.48
V_a (V)	ΔV_a (V)	i (10^{-8} A)	Δi (10^{-8} A)
0.000	0.0000	0.31	0.012
0.200	0.0016	0.44	0.018
0.403	0.0032	0.55	0.022
0.601	0.0048	0.69	0.028
0.802	0.0064	0.80	0.032
1.000	0.0080	0.96	0.038
1.072	0.0086	1.00	0.04

Se suele usar delta minúscula en lugar de mayúscula.

Tabla V. $\lambda_5 = 404.7 \pm 15$ nm, $\nu_5 = (7.4078 \pm 0.275) \times 10^{14}$ Hz (UV)

Las tablas tienen encabezado y no pie.

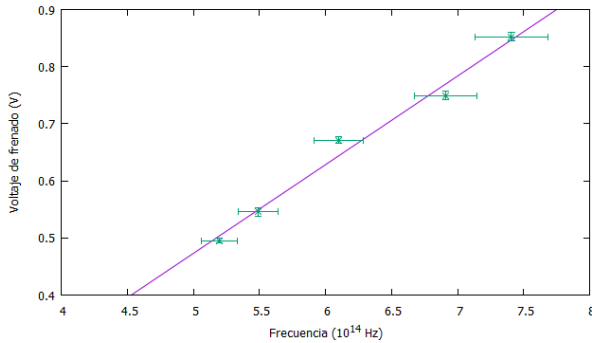
Fig. 7. Datos de la Tabla V (luz UV)

La Figura 8 muestra la gráfica ν vs V_0 de las 5 longitudes de onda, así como el ajuste lineal de los datos dado por la función: **Este es EL (con mayúsculas) AJUSTE**

$$f(x) = (0.155118 \pm 0.01106)x - (0.302257 \pm 0.06942)$$

Dicho ajuste se realizó con el software "Gnuplot".

si lo pones como f(x) no se entiende que es que además no pones unidades

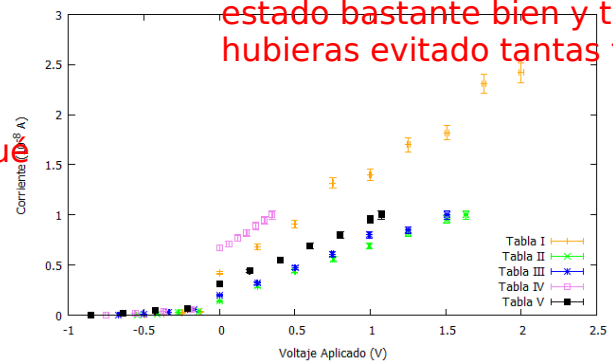
Fig. 8. Ajuste lineal de los datos $V_0(\nu)$, la recta cae dentro de los intervalos de incertidumbre de cada punto.

De acuerdo a la ecuación (6), la pendiente de esta recta de ajuste coincide con $\frac{h}{e}$ y la ordenada al origen con $-\frac{\phi}{e}$, entonces: $h = (1.55118 \pm 0.1106) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ y $\phi = 0.302257 \pm 0.06942 \text{ eV}$. **Así está mejor.**

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las gráficas de las Figuras 3-7 muestran que los valores $i(V_a)$ son crecientes y tienden a juntarse con cierta curvatura cuando aumenta el voltaje, es decir, la corriente alcanza el valor de saturación. Como ya se mencionó esto se debe a que los fotones sólo pueden mover una cierta cantidad de electrones y algunos de ellos no llevan velocidad suficiente para ingresar al sistema de cables, lo cual se soluciona al aumentar el voltaje para que más portadores de carga puedan cruzar (aumentando así la corriente y provocando que i sea creciente con respecto a V_a). Sin embargo, llega un momento en el que todos los electrones cruzan y por tanto la corriente medida no incrementa.

Se espera además que la corriente de saturación sea creciente con la frecuencia, lo cual no ocurre pues se ve claramente que la corriente de saturación más alta es para el color amarillo. Sin embargo, esta corriente depende también de la intensidad del haz incidente, y debido a errores de calibración y también a la antigüedad del monocromador este no proporcionaba una buena intensidad en todas las longitudes de onda, de hecho se observó que la luz amarilla era una de las más intensas, así se explica que su corriente de saturación sea mayor que la del azul que tiene una frecuencia mayor pero se visualizó bastante más tenue. Esto puede corroborarse mejor en la gráfica de la Figura 9.

Fig. 9. Comparación de las corrientes de saturación para las diferentes longitudes de onda. **Ajá, si ponías solo esta, hubiera estado bastante bien y te hubieras evitado tantas tablas.**

Podemos observar en la Figura 8 que es posible ajustar una recta a los datos $V_0(\nu)$ con una incertidumbre de 7.131 % y 22.97 % a la pendiente y la ordenada al origen respectivamente, el valor real de la constante de Planck no se encuentra cercano al obtenido experimentalmente según el intervalo de incertidumbre del ajuste lineal, esto se atribuye nuevamente a la calibración y antigüedad de los aparatos utilizados, a pesar de esto, el valor de h es del mismo orden de magnitud. En cuanto a la función de trabajo, observamos de [5] que la ϕ obtenida experimentalmente es mucho más pequeña que la de los metales más comunes (aún considerando el casi 23 % de error) entonces no es posible determinar de qué material está hecha la fotocelda.

La incertidumbre de la ordenada al origen y la pendiente nos dicen que tan bueno es el ajuste de nuestros datos, pero no toman en cuenta la incertidumbre asociada de los puntos, si esta incertidumbre crece entonces hay una mayor cantidad de rectas posibles para el ajuste pero solo una que lo optimiza. Por tal motivo, si la incertidumbre asociada a los instrumentos de medición es mayor no necesariamente aumenta la incertidumbre del ajuste, pero si aumenta el rango entre el cual pueden distar los datos medidos de los reales y así aumentar las posibilidades de un ajuste que incluya entre su error a los valores reales de h y ϕ .

No se tuvo conocimiento del estado del metal al interior de la fotocelda y se asumió que el electrómetro se encontraba

calibrado, así que se concluye que la incertidumbre asociada al monocromador es mayor de lo que se consideró y por lo tanto los datos obtenidos no encajan con la teoría según la incertidumbre. Se propone entonces reemplazar el uso del monocromador por un dispositivo cuya longitud de onda sea bien conocida y con suficiente intensidad, un láser por ejemplo.

5. CONCLUSIONES

Se observó que al hacer incidir sobre un metal un haz luminoso se puede producir una corriente y que la intensidad de dicha corriente está relacionada con la intensidad y frecuencia de la luz. Mediante el ajuste lineal de los datos $V_0(\nu)$ se logró verificar la ecuación que describe el efecto

fotoelectrónico. Con la pendiente de dicho ajuste se calculó la constante de Planck, la cual no fue lo suficientemente cercana al valor teórico según el intervalo de incertidumbre pese a ser del mismo orden de magnitud, la función de trabajo al ser demasiado pequeña no pudo compararse con la de algún metal conocido.

Las inconsistencias con la teoría se atribuyeron a problemas de calibración del monocromador, impidiendo que se tuviera certidumbre sobre las frecuencias de la luz con las que se trabajaba. Así mismo la intensidad era notablemente diferente para cada longitud de onda, esto impidió comprobar si la corriente de saturación era creciente con la frecuencia. Se propone reemplazar el uso de este aparato por alguno que produzca luz monocromada y colimada, tal como un láser.

REFERENCIAS

- [1] Greiner, Quantum Mechanics An introduction, Cuarta Edición, Ed. Springer, 2000.
- [2] Gratton, Introducción a la mecánica cuántica, Primera Edición, Buenos Aires, 2003.
- [3] Atkins, Friedman Molecular Quantum Mechanics, Cuarta Edición, Oxford University Press, 2004.
- [4] <https://physics.info/photoelectric/> Consultado el 2 de Octubre de 2018
- [5] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Tables/photoelec.html> Consultado el 2 de Octubre de 2018

El análisis, conclusiones y resultados están muy bien.
Pero falta un poco de organización.