

Informe 2: Efecto fotoeléctrico.

Sergio Laverde* and Juana Pinzón**
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
(Dated: 25 de febrero de 2024)

Este informe presenta una práctica de laboratorio centrada en el estudio del efecto fotoeléctrico, un fenómeno cuántico fundamental en la física moderna. El objetivo principal de la práctica es verificar la relación lineal entre la energía cinética máxima de los electrones emitidos y la frecuencia de la luz incidente, tal como predice la teoría cuántica. Los resultados del experimento validan empíricamente el efecto fotoeléctrico, confirmando así la teoría cuántica y destacando la importancia de la interacción luz-materia a diferentes escalas.

I. INTRODUCCIÓN

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuándo se le ilumina con una corriente de fotones[1]. El fenómeno implica que, al observar la incidencia de la luz sobre una superficie metálica, los electrones serán expulsados del metal, para esto la luz debe superar una determinada energía mínima requerida, entonces la energía extra se entregará a los electrones expulsados como energía cinética de movimiento[3]. La idea planteada por Einstein era que un cuanto de luz estaba localizado y proporcionaba su energía, hf , directamente a un solo electrón en el metal. En consecuencia, la energía cinética máxima es:

$$K_{\text{máx}} = hf - \phi \quad (1)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

Esta ecuación establece una relación fundamental entre la energía de los fotones incidentes hf , la función trabajo del material ϕ y la energía cinética máxima de los electrones emitidos $K_{\text{máx}}$. En donde c es la velocidad de la luz en el vacío, λ es la longitud de onda del fotón incidente y ϕ es la función trabajo del material, que corresponde a la energía necesaria para 'arrancar' un electrón del material. Además, el efecto fotoeléctrico ha dado paso al desarrollo de la teoría cuántica.

Para determinar la energía cinética máxima de los electrones emitidos $K_{\text{máx}}$ se induce un voltaje en dirección contraria de la corriente, esto con el fin de reducir la velocidad de los electrones emitidos hasta el punto en que la velocidad sea cero (Corriente = 0). Dicho voltaje se denomina Voltaje de frenado (V_f) y está dado por la ecuación 3.

$$K_{\text{max}} = eV_f \quad (3)$$

En donde e es la carga del electrón. Entonces la ecuación 1 queda:

$$eV_f = \frac{hc}{\lambda} - \phi \quad (4)$$

II. MONTAJE Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

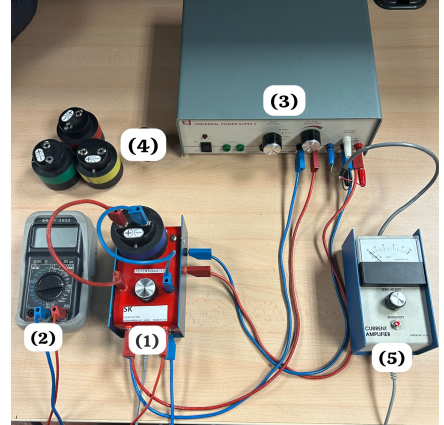


Figura 1. Montaje

Montaje del experimento de Efecto fotoeléctrico. En la figura se puede apreciar una celda fotoeléctrica (1), un voltímetro (2), fuente de voltaje (3), cuatro caperuzas que en su interior un LED emite luz con su correspondiente frecuencia (amarillo, azul, rojo, verde) (4) y un microamperímetro (5).

Para realizar el estudio del efecto fotoeléctrico mediante este experimento, se dispuso de una celda fotoeléctrica, una fuente de poder, láser con 4 frecuencias LED's de diferentes colores (amarillo, azul, rojo, verde), un voltímetro y un microamperímetro. Como se muestra en la figura 1.

La metodología experimental consistió inicialmente en verificar que la fotocelda funcionara correctamente, se procedió a ajustar el cero de la escala del microamperímetro y ubicar el voltímetro en la escala apropiada

* Correo institucional: s.laverdeg@uniandes.edu.co

** Correo institucional: j.pinzonr@uniandes.edu.co

(2V). Habiendo realizado lo anterior, se procedió con el experimento de Efecto Fotoeléctrico para las diferentes luces LED disponibles. En cada caso se mantuvo la intensidad de luz constante y se registraron valores de voltaje y corriente disminuyendo la corriente, de $10 \times 10^{-8} A$ en saltos de $0,5 \times 10^{-8} A$ hasta llegar a $0,5 \times 10^{-8} A$, esto aumentando el voltaje. Para el caso del LED rojo, se realizó además la misma medición descrita anteriormente pero a una escala de $10^{-9} A$.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

■ Voltajes de frenado.

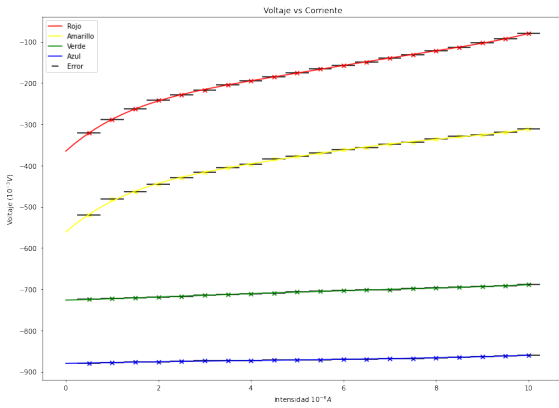


Figura 2. Voltaje vs Corriente

Curvas de ajuste para cada color correspondiente estudiado en el laboratorio. Graficas con más detalle y residuales en VI.

Para el análisis se graficó el voltaje contra la intensidad de corriente como se muestra en la figura 2, de esta manera el punto de corte con el eje y determina el voltaje de frenado V_f . Para determinar el modelo más acertado que modelara los datos, se realizaron pruebas de hipótesis para cada color estudiado. Se tomó como hipótesis nula un polinomio de grado cero y como hipótesis alternativa el polinomio de un grado superior, modelos generados con el método de mínimos cuadrados. Se tomó el nivel de confianza de 97.5% y de esta manera si se rechazaba la hipótesis nula, se tomaba ahora como hipótesis nula la alternativa y así sucesivamente hasta que la prueba determinara que nos encontramos en el rango de aceptación. Entonces, para cada color estudiado se obtuvo como resultado lo reportado en el cuadro I.

Comparando los resultados obtenidos con la Ley de Ohm ($V = IR$), que establece una dependen-

Color	$(\lambda_{max} \pm 13)(nm)$	Modelo polinomial	$V_f(V)$
Rojo	659	Grado 5	$0,365 \pm 0,002$
Amarillo	590	Grado 5	$0,561 \pm 0,004$
Verde	567	Grado 4	$0,727 \pm 0,001$
Azul	469	Grado 3	$0,880 \pm 0,001$

Cuadro I. Voltaje de frenado.

En esta tabla se reportan la longitud de onda máxima de la luz incidente, el grado del polinomio del modelo y el voltaje de frenado correspondiente para cada color estudiado.

cia directamente proporcional entre Voltaje y Corriente, se puede observar cómo la ley de Ohm se aproxima a los datos obtenidos para Intensidad de corriente mayor de $5 \times 10^{-8} A$ aproximadamente. Sin embargo, para Intensidades menores a esta el comportamiento es diferente.

■ Constante de Planck.

Colores	$K_{max}(eV)$	$(\lambda_{max} \pm 13)(nm)$	$f(10^{14} Hz)$
Rojo	$0,365 \pm 0,002$	659	4.55
Amarillo	$0,561 \pm 0,004$	590	5.08
Verde	$0,727 \pm 0,001$	567	5.29
Azul	$0,880 \pm 0,001$	469	6.40

Cuadro II. Frecuencias de la luz incidente.

En esta tabla se reportan la energía cinética máxima de los electrones emitidos, la longitud de onda máxima, y la frecuencia de la luz incidente correspondiente para cada color estudiado.

Teniendo las longitudes de onda máximas λ_{max} se calcularon las frecuencias de la luz correspondiente a cada color analizado según la ecuación 2, los resultados se reportan en el cuadro II.

Habiendo obtenido los voltajes de frenado V_f y por ende la energía cinética máxima de los electrones emitidos $K_{máx}$ según la ecuación 3. Ahora podemos determinar la constante de Planck h y la función de trabajo ϕ mediante una regresión lineal equivalente a la ecuación 1 como se observa en la figura 3.

$$K_{max} = ((2,69 \pm 0,66) \times 10^{-15} [eV \cdot s]) f - (0,80 \pm 0,36) [eV]$$

$$R^2 = 0,984$$
(5)

Entonces, la pendiente corresponde a la constante de Planck obtenida en este experimento (h_{exp}) y el valor absoluto del punto de corte con el eje y corresponde a la Función de trabajo del material (ϕ_{exp}).

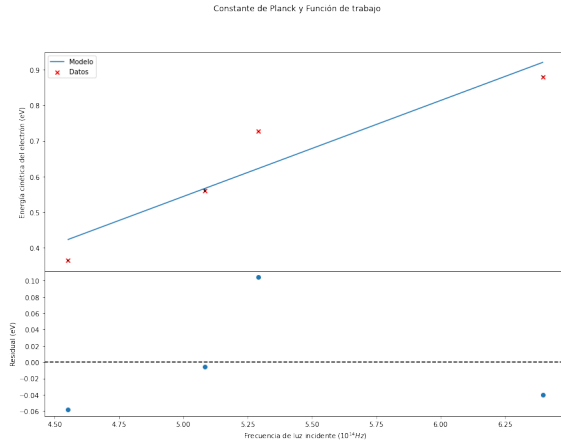


Figura 3. Constante de Planck y Función de trabajo. Se muestra la relación entre la energía cinética máxima de los electrones emitidos $K_{\text{máx}}$ y la frecuencia de la luz incidente f .

$$h_{exp} = (2,69 \pm 0,66) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

$$\phi_{exp} = (0,80 \pm 0,36) \text{ eV}$$

Comparando con el valor real de la constante de Planck:

$$h = 4,135667696 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

Se obtuvo un error relativo de:

$$E_{relativo} = 0,35$$

IV. CONCLUSIONES

A partir de la práctica y el análisis posterior de los resultados se puede concluir que, al emplearse un enfoque estadístico para determinar los modelos de ajuste más adecuados para los datos de voltaje contra corriente, utilizando pruebas de hipótesis para seleccionar el modelo óptimo. Se observó que los datos se ajustan mejor a polinomios de grado 3, 4 o 5, dependiendo del color de la luz LED incidente, y se notó una discrepancia en el comportamiento para diferentes intensidades de corriente. Además, se calcularon las energías cinéticas máximas de los electrones emitidos para cada color de luz, y se determinaron las frecuencias correspondientes a partir de las longitudes de onda máximas. Mediante una regresión lineal, se relacionó la energía cinética máxima con la frecuencia de la luz incidente, lo que permitió calcular experimentalmente la constante de Planck y la función de trabajo del material. Sin embargo, al comparar la constante de Planck experimental con el valor conocido, se encontró un error relativo del 35 %, lo que puede atribuirse a errores aleatorios durante el proceso experimental, como por ejemplo la calidad de la luz LED de

cada caperuza, entre algunos otros errores posibles. Finalmente a partir de la obtención de la energía cinética máxima mostrada más detalle en la sección VI pudimos determinar que el metal con el que esta construida la celda, podría tratarse de metales alcalinos como el cesio ($\phi = 2,14 \text{ eV}$) o el potasio ($\phi = 2,24 \text{ eV}$) cuyas funciones del trabajo están dentro del rango esperado.

- [1] J. Avendaño. *FISICANOVA: Una Aproximación a la Realidad*. FISICANOVA.
 [2] M. A. Segura Delgado. *Métodos Computacionales*. 2023.
 [3] A. w3 group. *Photons, Electrons and the Photoelectric Effect*. Archive.org, 2024.

V. APÉNDICE DE CÁLCULO

■ Ajuste lineal por mínimos cuadrados[2]:

$$\begin{aligned}\mathbb{A}^T \mathbb{A} \vec{x}^* &= \mathbb{A}^T \vec{b} \\ \text{Proy}_{C(\mathbb{A})} \vec{b} &:= \mathbb{A} \vec{x}^*\end{aligned}\quad (6)$$

■ Incertidumbre de mínimos cuadrados[2]:

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}^2 &= \frac{1}{n-p} (\vec{b} - \mathbb{A} \vec{x}^*)^T (\vec{b} - \mathbb{A} \vec{x}^*) \\ \text{Cov}(\vec{x}^*) &= \hat{\sigma}^2 (\mathbb{A}^T \mathbb{A})^{-1} \\ R^2 &= \frac{\text{Cov}(m, b)^2}{\text{Var}(m) \text{Var}(b)} \\ \Delta x_i &= \sigma_{x_i} = \sqrt{\text{Var}(x_i)}\end{aligned}\quad (7)$$

■ Propagación de errores:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (8)$$

■ Energía cinética máxima

Para calcular las energías cinéticas máximas para cada color de luz utilizando las frecuencias dadas y la constante de Planck h :

1. Para el color Rojo:

$$\begin{aligned}E_c \text{ máxima} &= (4,55 \times 10^{14} \text{ Hz}) \times (6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) - (0,80 \text{ eV}) \\ &= (3,00 \times 10^{-19} \text{ J} - 1,2816 \times 10^{-19} \text{ J}) \\ &= 1,7184 \times 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

2. Para el color Amarillo:

$$\begin{aligned}E_c \text{ máxima} &= (5,08 \times 10^{14} \text{ Hz}) \times (6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) - (0,80 \text{ eV}) \\ &= (3,37 \times 10^{-19} \text{ J} - 1,2816 \times 10^{-19} \text{ J}) \\ &= 2,0884 \times 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

3. Para el color Verde:

$$\begin{aligned}E_c \text{ máxima} &= (5,29 \times 10^{14} \text{ Hz}) \times (6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) - (0,80 \text{ eV}) \\ &= (3,51 \times 10^{-19} \text{ J} - 1,2816 \times 10^{-19} \text{ J}) \\ &= 2,2284 \times 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

4. Para el color Azul:

$$\begin{aligned}E_c \text{ máxima} &= (6,40 \times 10^{14} \text{ Hz}) \times (6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) - (0,80 \text{ eV}) \\ &= (4,23 \times 10^{-19} \text{ J} - 1,2816 \times 10^{-19} \text{ J}) \\ &= 2,9484 \times 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

VI. MULTIMEDIA

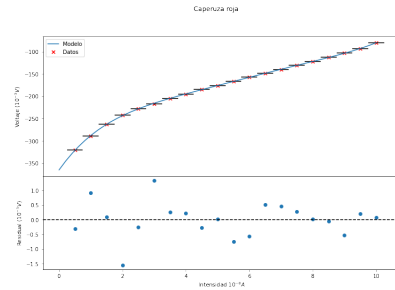


Figura 4. Voltaje vs Corriente para el LED rojo

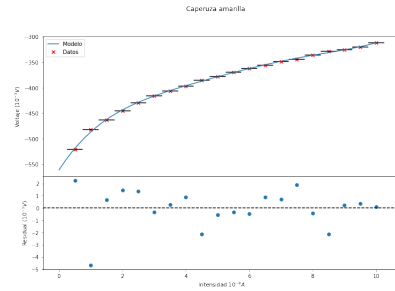


Figura 5. Voltaje vs Corriente para el LED amarillo

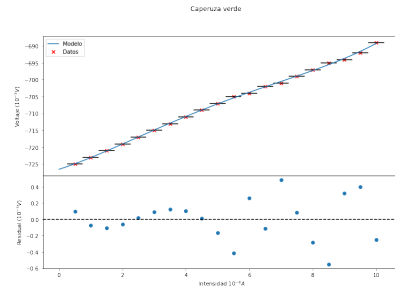


Figura 6. Voltaje vs Corriente para el LED verde

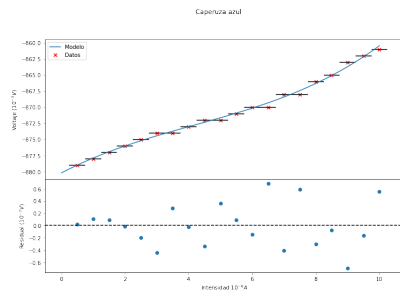


Figura 7. Voltaje vs Corriente para el LED azul