

# Efecto Fotoeléctrico

Juan Carlos Rojas Velásquez\*  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.  
(Dated: 5 de septiembre de 2023)

En el presente documento se presenta una aproximación experimental del efecto fotoeléctrico que tiene el fin de demostrar la dependencia entre la energía del fotón con su longitud de onda, y la independencia de la energía con respecto a la intensidad de la luz. Esto permitió un registro experimental de la constante de Planck  $h = (4 \pm 1) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  y la función de trabajo asociada a la fotocelda utilizada de  $\phi = 1.3 \pm 0.7 \times 10^{-19} \text{ J}$  que no correspondería a ningún material.

## I. INTRODUCCIÓN

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno que describe cómo los fotones de una cierta energía, asociada a su frecuencia, puede desprender electrones de los átomos de metales [5]. El efecto fotoeléctrico es la base de la producción eléctrica fotovoltaica y la detección de luz mediante sensores, este efecto también es utilizado en la espectrografía de rayos X para estudiar la composición de superficies de materiales, más específicamente en la industria electrónica, para la caracterización de las mismas. El fenómeno fue observado por primera vez por el físico alemán Heinrich Hertz a finales del siglo XIX y luego descrito por Albert Einstein a principios del siglo XX con la siguiente expresión matemática

$$h\nu = T_e + \phi \quad (1)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $\nu$  la frecuencia del fotón incidente,  $T_e$  la energía cinética del electrón y  $\phi$  es la “función de trabajo”, una energía que debe sobrepasar el fotón para poder que los electrones se desprendan. Esta cantidad depende del material sobre el que se trabaje [1]. Por otro lado, también se tiene la relación

$$c = \lambda\nu \quad (2)$$

que indica que la velocidad de la luz  $c$  debe ser igual a la longitud de onda del fotón  $\lambda$  y la frecuencia del fotón  $\nu$ . Dado que la  $c$  es constante, esta relación entre  $\lambda$  y  $\nu$  son codependientes. Lo cual permite tener la relación

$$eV_f = h\nu - \phi. \quad (3)$$

En la práctica se pretende lograr evaluar la dependencia de la frecuencia de la luz con la energía de los fotones, además de demostrar que la intensidad de la luz misma no tiene relación con cuánta corriente se genera, esto es, no afecta al voltaje de frenado.

## II. METODOLOGÍA

Para la realización del experimento se utilizó el montaje mostrado en la Figura 1. Y las conexiones mostradas en el diagrama esquemático de la Figura 2.

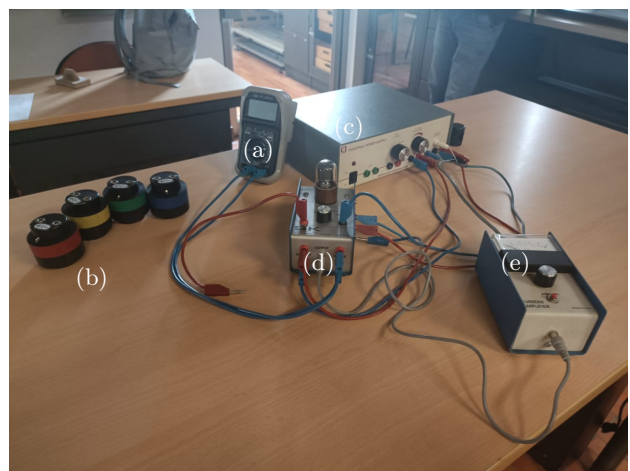


Figura 1. Montaje del experimento de efecto fotoeléctrico. En la figura se observan: un multímetro (a), caperuzas con LEDs de colores (de izquierda a derecha) rojo, amarillo, verde y azul (b), fuente de voltaje (c), fotocelda con potenciómetro (d) y amperímetro con sensibilidad de  $0.5 \times 10^{-8} \text{ A}$  (e).

Antes de empezar con la toma de datos, se tuvieron que calibrar dispositivos de medición. Para el amperímetro (Figura 1.e.): se desconectó de la fotocelda, se presionó el botón rojo en él y luego se movió la perilla para que alineara con el cero marcado.

Para la primera fase del experimento se fijó el voltaje de la fuente (Figura 1.c.) a 2 V con el potenciómetro de la fotocelda (Figura 1.d.) establecido en el mínimo de resistencia. Después de esto, se colocó sobre la fotocelda una caperuza LED (Figura 1.b.) de modo que la luz incidiera sobre la parte cóncava de la fotocelda. Después de esto se encontró el punto en que el potenciómetro permitía que la corriente tuviese el valor de  $I = 10 \times 10^{-8} \text{ A}$ . Luego, se giró la perilla del potenciómetro aumentando la resistencia y haciendo paradas cada vez que la

\* Correo institucional: jc.rojasv1@uniandes.edu.co

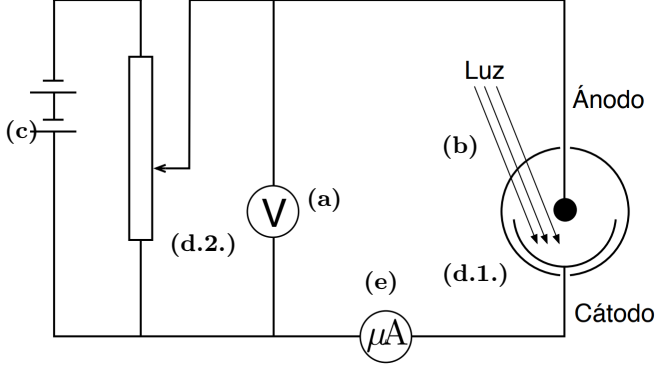


Figura 2. Diagrama esquemático de conexiones entre los dispositivos usados para la práctica. Multímetro (a), caperuza (b), fuente de voltaje (c), fotocelda (d.1.) y potenciómetro (d.2.). Figura obtenida de [2].

corriente presentaba un cambio de  $\Delta I = -0.5 \times 10^{-8} A$  para registrar los voltajes medidos por el multímetro (Figura 1.a.) en cada parada hasta que la corriente fuera nula. Este procedimiento resultó en 21 mediciones de voltaje para cada color de caperuza utilizada.

El procedimiento descrito anteriormente se repitió con la caperuza de color rojo rotada aproximadamente  $45^\circ$  con respecto a la parte cóncava de la fotocelda. Para tener mediciones con un valor de intensidad diferente.

### III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### A. Dependencia de la energía con el color

Al observar la Figura 3 se puede notar que las variaciones en el voltaje de frenado son mayoritariamente constantes, indicando que la relación entre el voltaje de frenado y la corriente producida por los fotoelectrones puede ser descrita mediante una regresión lineal. Esto es esperado debido a la Ecuación (1) del efecto fotoeléctrico. De esta, dado que la energía potencial debida al voltaje se convierte en energía cinética, se puede deducir que la energía cinética máxima estará dada por la fórmula (3).

Las regresiones, ajustadas por el método de mínimos cuadrados en un programa de Python [4], de la Figura 3 tienen la forma

$$V(I) = mI + b$$

Igualando a la corriente a cero y despejando el voltaje se tiene que

$$V_f = b \quad (4)$$

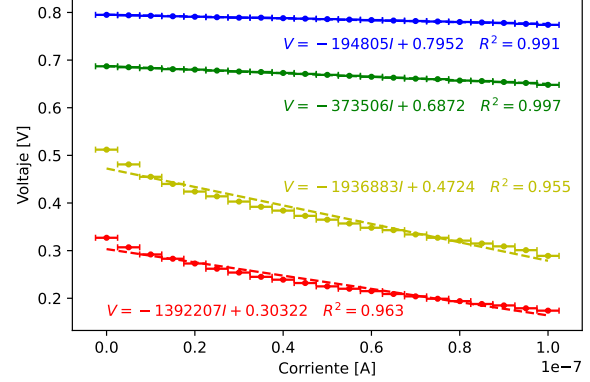


Figura 3. Gráficas de los datos tomados para los diferentes colores de LED y sus respectivas regresiones lineales. Los datos para cada LED con su respectiva regresión lineal (arriba a abajo: LED azul, LED verde, LED amarillo y LED rojo).

por lo que se puede obtener el voltaje de frenado para cada uno de los LEDs mediante las regresiones presentadas en la Figura 3. Estos valores fueron calculados y presentados en el Cuadro I.

Una vez conocidos los voltajes de frenado para cada uno de los colores de los LED, se hizo una regresión de estos valores multiplicados por la carga del electrón ( $e = 1.6022 \times 10^{-19} C$ ) contra la frecuencia de cada color mostrada en la Figura 4. Estas frecuencias fueron calculadas usando la relación (2) y las longitudes de onda dadas en la guía de laboratorio [2].

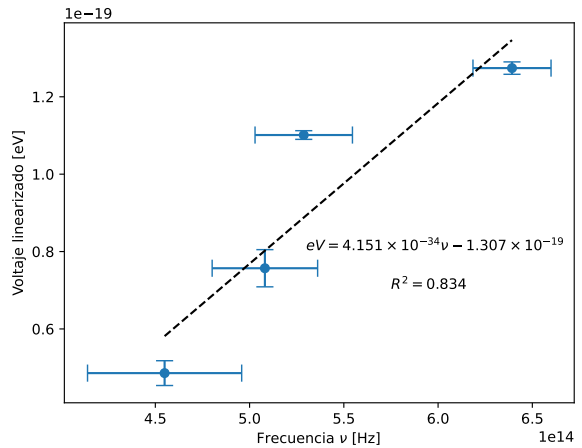


Figura 4. Gráfica de voltaje de frenado multiplicado por la carga del electrón (eV) contra frecuencia del fotón ( $\nu$ ). Frecuencia del fotón para cada color de LED: color azul ( $\nu_B = 639$  THz), color verde ( $\nu_G = 529$  THz), color amarillo ( $\nu_G = 508$  THz y color rojo ( $\nu_G = 455$  THz).

	Azul	Verde	Amarillo	Rojo
$m [\times 10^3 \Omega]$	$-194 \pm 4$	$-373 \pm 4$	$-1936 \pm 90$	$-1392 \pm 60$
$b [V]$	$0.7952 \pm 0.0002$	$0.6873 \pm 0.0003$	$0.472 \pm 0.005$	$0.303 \pm 0.004$

Cuadro I. Valores de  $m$  y  $b$  de las regresiones lineales para cada color de LED, donde  $m$  es la pendiente de la regresión y  $b$  el valor de corte, que corresponde al valor del voltaje de frenado  $V_f$ .

Nótese que la regresión de la Figura 4 tiene la misma forma que la Ecuación (3) por lo que los valores del coeficiente y término independiente de la misma deben ser la constante de Planck y función de trabajo, respectivamente. Estos son entonces  $h = (4 \pm 1) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  y  $\phi = (1.3 \pm 0.7) \times 10^{-19} \text{J}$ . Los valores obtenidos para la función de trabajo no parecen corresponder con ningún metal consultado [3]. Esto puede atribuirse a una restricción de precisión dado que los elementos de medición eran analógicos.

#### B. Independencia de la intensidad de la luz

La Figura 5 muestra los datos obtenidos para las mediciones de voltaje para diferentes medidas de corriente hasta llegar a 0.00 A. Estos datos presentan un comportamiento similar a los datos para las curvas hechas en la Figura 3, lo cual es esperado debido a que este valor no debería ser dependiente de la intensidad de la luz que incide sobre el material metálico.

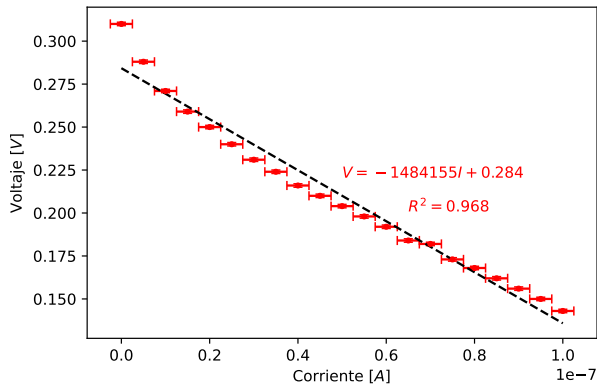


Figura 5. Gráfica de los datos tomados para la caperuza LED de color rojo y su respectiva regresión lineal.

Con los datos tomados en la segunda fase del experimento se hizo un ploteo de dispersión para calcular una regresión lineal, mostrada en la Figura 5. El programa usado [4] arrojó la regresión

$$V(I) = (-148 \pm 6) \times 10^4 I + (0.284 \pm 0.003)$$

la cual concuerda significativamente con los datos del Cuadro I para los valores de la pendiente y punto de corte de la columna roja. Con lo cual evidencia una independencia entre la intensidad de la luz y la energía.

#### IV. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las diferentes tomas de datos y las regresiones hechas con los mismos, se puede notar que los voltajes de frenado dependen del color de la luz y que estos, a su vez, no presentan una diferencia significativa al cambiar la intensidad de la luz incidente sobre el material metálico. Además, se pudo llegar a un valor de la constante de Planck de  $h = (4 \pm 1) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ , un valor bastante cercano dadas las condiciones de precisión restringida a la hora de tomar datos. Por otro lado, el valor de la función de trabajo  $\phi = (1.3 \pm 0.7) \times 10^{-19} \text{J}$ , no parece corresponder con valores de metales consultados.

[1] L. Liu and P. Solis. Determination of planck's constant using the photoelectric effect, 2007.

[2] J. Mejía and N. Berrío. *Guías de laboratorio. Física Moderna*. 2021.

- [3] M. Nikolić, S. Radić, V. Minić, and M. Ristić. The dependence of the work function of rare earth metals on their electron structure. *Microelectronics Journal*, 27(1):93–96, 1996.
- [4] J. C. Rojas Velásquez and T. Andrade Hernández. *Modern Phy Lab*, Aug. 2023.
- [5] Wikipedia. Efecto fotoeléctrico — wikipedia, la enciclopedia libre, 2023. [Internet; descargado 12-junio-2023].

## Apéndice A: Cálculos numéricos

Para el cálculo de incertidumbre del modelo se tiene el siguiente código en Python que se puede encontrar en repositorio de GitHub [4].

### 1. Cálculo de error en las regresiones

La librería que se usó para hallar las regresiones fue `numpy.polyfit` para que el programa hiciera una aproximación por mínimos cuadrados a un polinomio de orden uno.

Para el cálculo de error de las regresiones se utilizaron las fórmulas

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - b)^2}{N - 2}}$$

$$\sigma_m = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}}$$

$$\sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}}$$

donde  $\sigma_y$ ,  $\sigma_m$  y  $\sigma_b$  son las incertidumbres del modelo, la pendiente y el término independiente, respectivamente. Los valores arrojados por el programa para las incertidumbres de la pendiente y el término independiente se pueden encontrar reportados en el Cuadro I.

### 2. Cálculo de correlación

Para el cálculo de los coeficientes de correlación se usaron las fórmulas

$$S_r = \sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - b)^2$$

$$S_t = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

$$R^2 = 1 - \frac{S_r}{S_t}$$

Los valores del coeficiente de correlación de cada una de las regresiones están reportadas en cada una de las gráficas que tengan una regresión lineal.

### 3. Propagación de error para la frecuencia

Dada la Ecuación (2) se tiene que la frecuencia del fotón está dada por

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

dada la incertidumbre de las longitudes de onda  $\sigma_\lambda = 30$  nm se hizo la propagación del error

$$\sigma_\nu = \sqrt{\left(\frac{\partial \nu}{\partial \lambda} \sigma_\lambda\right)^2}$$

$$= \frac{\partial \nu}{\partial \lambda} \sigma_\lambda = \frac{c \sigma_\lambda}{\lambda^2}$$

Se tienen las siguientes incertidumbres para cada una de las frecuencias de los LED. Arrojadas por el programa de Python. Estos valores son reportados en la Figura 4.

	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
$\nu$ [THz]	455	508	529	639
$\sigma_\nu$ [THz]	21	26	28	41