

Efecto Fotoeléctrico: Medición de h

Miguel Ángel Sánchez Cortés*

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N, Coyoacán,
Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México. [†]

(Dated: August 7, 2021)

En este trabajo se verificó experimentalmente la hipótesis de Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico aplicándole un determinado voltaje a una fotocelda que fue iluminada con una lámpara de H_g a la que se le filtraron las longitudes de onda utilizando un monocromador. Se obtuvo una gráfica para la relación entre la corriente y el voltaje medidos para cada longitud de onda de la lámpara de H_g y a su vez se ajustaron los datos para el voltaje de frenado y la frecuencia de manera lineal mediante el Método de Montecarlo. Se obtuvo un valor para la constante de Planck de $h = (3.90 \pm 0.03) \times 10^{-34} Js$ con una diferencia del 37% respecto al valor de referencia y se obtuvo también un valor para la función de trabajo de la fotocelda de $P = (1.42 \pm 0.01) \times 10^{-19} J$.

I. INTRODUCCIÓN

A. El efecto fotoeléctrico

El *efecto fotoeléctrico* es un fenómeno físico descubierto en 1887 como consecuencia de los experimentos de Hertz para observar la propagación de las “ondas de radio”, conocidas más tarde como *ondas electromagnéticas*. De manera simple, este efecto consistía en la observación de que al iluminar una placa de metal con luz ultravioleta surge un flujo de partículas cargadas negativamente que son expulsadas de la superficie del mismo metal. La explicación de este fenómeno evadió a los académicos por años y a pesar que las aportaciones de varios científicos arrojaron luz a la explicación de este fenómeno, uno en especial se destacó por su importancia. En 1902, Philipp Lenard realizó una serie de experimentos sobre el efecto fotoeléctrico en los que descubrió que la velocidad máxima con la que los electrones son expulsados por la luz ultravioleta es independiente de la intensidad de la luz. Este resultado lo llevó a proponer la hipótesis de que la luz solamente desencadena la liberación de ciertos electrones, pero no les proporciona energía.[1]

B. La hipótesis de Einstein

La hipótesis de Lenard fue la base aceptada por los científicos de la época para entender el efecto fotoeléctrico hasta alrededor de 1911, sin embargo, antes de esta época, fue Einstein quien introdujo una idea revolucionaria que lograría explicar este fenómeno a pesar de ser muy controversial ¹. En 1905, Albert Einstein propuso que la luz se comportaba como si consistiera de un

número de unidades de energía independientes de magnitud ² $(R\beta/N)\nu$ que él mismo llamó “cuantos de energía”. Bajo esta hipótesis, en el efecto fotoeléctrico, los cuantos de energía penetran la superficie de un material y su energía se transforma, al menos en parte, en la energía de los electrones, que al recibir dicha energía, realizan un trabajo P en contra del material y son expulsados de la superficie del mismo. [2] Esta explicación le permitió a Einstein formular que la energía máxima asociada a los electrones emitidos bajo la influencia de la luz está dada por [3]:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - P, \quad (1)$$

donde $h\nu$ es la energía ³ que absorben los electrones gracias a la influencia de los cuantos de luz, $\frac{1}{2}mv^2$ es la energía con la que los electrones dejan la superficie del material y P es la llamada *función de trabajo*, propia de cada material, que representa el trabajo que deben hacer los electrones para llegar a la superficie de dicho material.

C. El voltaje de frenado

En el mismo artículo que introdujo la hipótesis cuántica, Einstein también introdujo una manera de comprobar el efecto fotoeléctrico, pues menciona que si el material es cargado positivamente bajo la influencia de un potencial V_0 , si está rodeado por conductores bajo potencial cero y si V_0 es lo suficientemente grande para prevenir

* miguel.sanchezcortes@ciencias.unam.mx

[†] Laboratorio de Física Contemporánea I.

¹ La hipótesis cuántica de Einstein no fue aceptada por la mayoría de los académicos hasta 1926, cuando se explicó el efecto Compton utilizando esta hipótesis y nació el concepto de *fotón*. [1]

² En este contexto, R es la constante universal de los gases, N el número de Avogadro, $\beta = h/k$, donde h es la constante de Planck y k la constante de Boltzmann y ν la frecuencia asociada a la luz. Muchas de estas constantes aún no eran nombradas como tal en esa época.

³ En 1916, Robert Millikan asoció experimentalmente la constante $R\beta/N$ con la constante h introducida por Planck, quien explicó la radiación del cuerpo negro también en términos de *cuantos* con energía $h\nu$. [4]

la pérdida de electricidad del material, la ecuación (1) se vuelve [2]:

$$eV_0 = h\nu - P, \quad (2)$$

donde e es la carga del electrón y V_0 es el llamado *voltaje de frenado*, necesario para disminuir a cero la energía cinética de los electrones. Como podemos ver, esta ecuación efectivamente es independiente de la intensidad de la luz ⁴ pero depende de la frecuencia de la misma.

En este trabajo se pretende verificar experimentalmente la hipótesis de Einstein para el efecto fotoeléctrico. En concreto, se utilizará la ecuación (2) para calcular la constante h de Planck y la función de trabajo P de una fotocelda que será iluminada con luz monocromática de frecuencia ν y estará sujeta a un voltaje de frenado V_0 .

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A. Arreglo experimental

El arreglo experimental y la consecuente recopilación de los datos fueron hechos previamente por Gamboa-Castillo et al. [5] y en esta sección se hará un breve resumen de lo hecho por completez y para entender mejor el análisis que se hará posteriormente. El arreglo experimental consistió en una lámpara de mercurio cuya luz fue filtrada con un monocromador para poder obtener una longitud de onda λ específica que posteriormente iluminaba una fotocelda, a la que se le aplicaba un determinado voltaje V_0 medido por un multímetro. De la misma forma, la corriente producida por los *cuantos de luz* era medida con un electrómetro. El esquema del arreglo se muestra en la Figura 1.

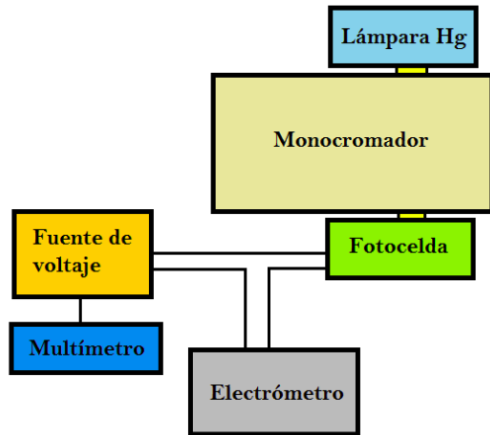


FIG. 1: Arreglo experimental utilizado para la recopilación de los datos. Imagen tomada de Gamboa-Castillo et al. [5].

Se realizaron dos mediciones para cada λ de la lámpara de mercurio. La primera medición consistió en encontrar el voltaje de frenado V_0 bajo el cual la corriente se hace cero. Al encontrar este voltaje, se dividió su valor entre cuatro y se registró el valor de la corriente para cada una de las cuatro divisiones; este proceso se repitió 5 veces. La segunda medición consistió en medir la relación entre corriente y voltaje, comenzando desde $0V$ y terminando en $2V$ avanzando en intervalos de $0.250V$.

B. Especificaciones técnicas ⁵

La lámpara de mercurio que se utilizó era de la marca Pasco Scientific, modelo OS-9286 y la luz que entraba al monocromador lo hacía a través de una rendija con un ancho de $(0.125 \pm 0.005)cm$ y salía por otra rendija de ancho $(0.250 \pm 0.005)cm$. El monocromador empleado era de la marca SPEX Industries, Minimate. El electrómetro utilizado era de la marca Keithley Instruments, modelo 610B. Para caracterizar el error en la medición asociado al monocromador se midió la distancia entre los dos mínimos de corriente alrededor de un máximo para cada longitud de onda de la lámpara de mercurio. Esta medición se realizó tres veces por diferentes integrantes del equipo Gamboa-Castillo et al. [5]. Luego, se promediaron estas tres distancias y la mitad de este promedio se tomó como la incertidumbre del monocromador para la longitud de onda respectiva. Estos valores se presentan en el Apéndice A.

El electrómetro se utilizó en el rango de $(10^{-7}-10^{-11}A)$ con el switch del multiplicador en 1. Bajo estas condiciones, el electrómetro posee una incertidumbre de $\pm 2\%$ de la máxima escala. El voltaje se midió con un multímetro Steren MUL-600. En el rango trabajado, la incertidumbre para el voltaje es de $(\pm 0.8\% + 3)V$. Sin embargo, como la última cifra del voltaje fluctuaba mucho, se decidió tomar solamente $\pm 0.8\%$ como incertidumbre y redondear la última cifra significativa de las mediciones en el rango de mV .

El análisis de los datos fue hecho en Python 3.5 y el código utilizado para la graficación y el ajuste de los datos puede ser encontrado en el Apéndice B.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Relación entre voltaje y corriente

Los datos resultantes de la medición de la relación entre corriente y voltaje para cada longitud de onda λ se

⁴ Como se mencionó en la sección IA, lo predijo Lenard en 1902.

⁵ Esta sección se tomó de manera casi textual de Gamboa-Castillo et al. [5] con el fin de registrar las especificaciones de los aparatos de medición utilizados por ellos para obtener los datos.

encuentran en las Tablas II-VII. La gráfica de estos datos se muestra en la Figura 2.

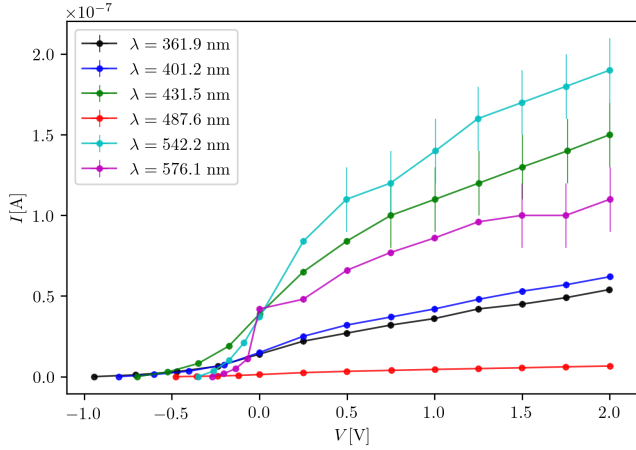


FIG. 2: Gráfica con barras de error que muestra la relación entre corriente y voltaje para cada longitud de onda λ de la lámpara de mercurio.

Podemos observar de esta gráfica que en general, para todas las λ 's, existe un aumento de corriente para voltajes dentro del rango $0 \leq V \leq 0.5$. Para valores mayores a este rango la pendiente de la gráfica disminuye notablemente, indicando que la corriente se aproxima a un máximo o *valor de saturación* a partir del cual ya no hay aumento de corriente aunque se aumente el voltaje. Este comportamiento puede explicarse observando la ecuación (2), pues al ser P una constante, podemos esperar que el número de electrones emitidos por la fotocelda aumente con el número de *fotones* disponibles, es decir, con la intensidad de la luz; esto quiere decir que para una intensidad dada, en este caso la intensidad de la luz emitida por el monocromador, existe un número máximo de electrones que pueden ser emitidos y por tanto, un valor máximo para la corriente medida.

A su vez, se observa que conforme la longitud de onda λ aumenta, el voltaje de frenado V_0 es menor en magnitud. Esto se puede explicar nuevamente observando la ecuación (2), pues al ser P una constante inherente a la fotocelda, la ecuación puede escribirse como ⁶:

$$K = \frac{hc}{\lambda} - eV_0, \quad (3)$$

donde K es una constante. Por tanto, si λ aumenta, el primer término de la resta tiende a hacerse más pequeño y esto quiere decir que necesariamente el término del voltaje de frenado debe hacerse también más pequeño, para mantener la ecuación en un valor constante. Esto es, si λ aumenta, V_0 debe disminuir para que la relación se siga satisfaciendo.

⁶ Se utilizó la relación entre frecuencia y longitud de onda: $c = \lambda\nu$.

B. La constante de Planck

Los datos resultantes de la medición del voltaje de frenado V_0 y el cálculo de la frecuencia ν para cada longitud de onda λ utilizada se encuentran en la Tabla VIII. Los valores para el voltaje de frenado fueron calculados de acuerdo a un promedio ⁷ de los datos extensos obtenidos por Gamboa-Castillo et al. [5]. Para calcular la constante h de Planck se hizo uso de la relación *lineal* que existe entre el voltaje de frenado V_0 y la frecuencia de la luz ν dada por la ecuación (2):

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{P}{e}, \quad (4)$$

donde, en una gráfica de V_0 vs ν , h/e es la pendiente de la recta y P/e la ordenada al origen. Para ajustar los datos obtenidos en la Tabla VIII a una recta de esta forma se utilizó el *Método de Montecarlo* cuyo programa se encuentra en el Apéndice B y cuyo ajuste puede ser observado en la gráfica mostrada en la Figura 3.

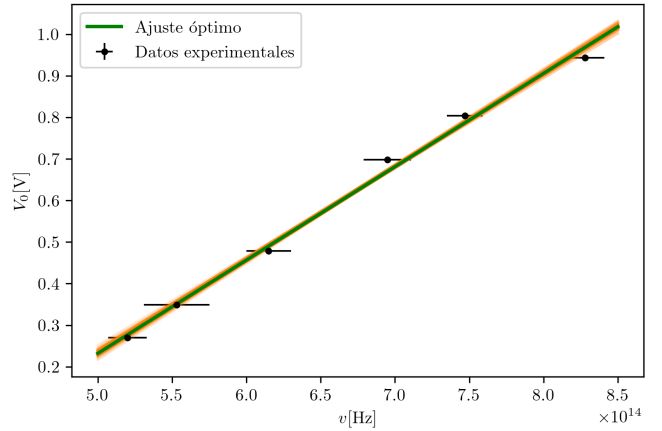


FIG. 3: Gráfica que muestra la relación lineal entre V_0 y ν dada por (4) y su ajuste hecho mediante el Método de Montecarlo. En naranja se muestran las franjas de error asociadas al ajuste lineal hecho para distintos parámetros y en verde el ajuste lineal óptimo.

Se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.994$ para el ajuste y los parámetros del mismo se identificaron con lo visto en la ecuación (4) de tal forma que para la pendiente de la recta se obtuvo el valor ⁸:

$$\frac{h}{e} = (2.44 \pm 0.02) \times 10^{-15} \text{ Js/C}, \quad (5)$$

⁷ La incertidumbre de dicho promedio fue calculada con la fórmula $\Delta\sigma = \sqrt{S_\sigma^2 + \delta_\sigma^2}$, donde S_σ es la desviación estándar y δ_σ el promedio de las incertidumbres asociadas a cada medición.

⁸ La incertidumbre asociada se obtuvo como la desviación estándar de la distribución de parámetros obtenidos por las simulaciones Montecarlo.

donde se sustituyó el valor de $e = 1.602176634 \times 10^{-19}C$ [6] y se obtuvo finalmente el valor de la constante de Planck $h = (3.90 \pm 0.03) \times 10^{-34}Js$, que comparada con el valor de referencia⁹, mostró una diferencia porcentual de alrededor del 37%, siendo un valor bastante inexacto a comparación del verdadero. A pesar que el error relativo fue de 0.007, lo cual muestra que hubo precisión en las mediciones, el valor de referencia no se encontró dentro del intervalo de error obtenido.

De la misma forma, identificando la ordenada al origen de la recta con lo visto en la ecuación (4) se obtuvo el siguiente valor para el cociente P/e :

$$\frac{P}{e} = (0.89 \pm 0.01)J/C, \quad (6)$$

que a su vez, si se multiplica por e [6], se obtiene el valor para la función de trabajo de la fotocelda, en este caso $P = (1.42 \pm 0.01) \times 10^{-19}J$. En este caso se desconoce el valor de referencia de P , pues no se especifica el material de la fotocelda en Gamboa-Castillo et al. [5], sin embargo, se puede afirmar que el ajuste lineal fue exitoso pues el coeficiente de determinación $R^2 \approx 1$ y los datos se ajustan al modelo dentro de sus barras de error.

Cabe mencionar que los valores para las longitudes de onda de la lámpara de mercurio mostradas en la Tabla I son menores a los valores de referencia [8] por al menos $4nm$, lo que puede indicar un error de calibración del monocromador o algún otro error sistemático en la medición. Esto podría explicar hasta cierto punto los errores obtenidos al obtener h y P junto con los errores asociados a los instrumentos de medición o los factores externos que podrían haber influido a la hora de medir.

IV. CONCLUSIONES

Se logró verificar experimentalmente la hipótesis de Einstein para el efecto fotoeléctrico dada por la relación

lineal (2) haciendo un ajuste a los datos obtenidos de voltaje V_0 y frecuencia ν mediante el Método de Montecarlo e identificando la pendiente de la recta con el cociente h/e y la ordenada al origen con el cociente P/e . Se obtuvo un valor para la constante de Planck de $h = (3.90 \pm 0.03) \times 10^{-34}Js$ y un valor para la función de trabajo de la fotocelda utilizada de $P = (1.42 \pm 0.01) \times 10^{-19}J$. El valor obtenido para h tuvo un error relativo de 0.007 y una diferencia porcentual del 37% con el valor de referencia [7] que no se encontró dentro del intervalo de error obtenido. A su vez, se observó la presencia de un *valor de saturación* para la corriente de la fotocelda al aumentar el voltaje, esto a causa de la intensidad de la luz emitida por el monocromador. También se observó que la longitud de onda de la luz y el voltaje de frenado siguen una relación inversa, pues entre mayor sea la longitud de onda, menor es el voltaje de frenado y viceversa.

Para futuros trabajos se sugiere realizar la medición de h utilizando otros conceptos o mediante otros métodos experimentales más exactos, como lo hecho por Petley et al. [9] haciendo uso del efecto Josephson y el efecto Hall cuántico o lo hecho por Eichenberger et al. [10] para medir h mediante una balanza de Watt, que utiliza la equivalencia entre potencia mecánica y eléctrica para medir la masa de un objeto y que sirvió también para que el NIST redefiniera el kilogramo en términos de h y la nombrara una constante fundamental [11]. A su vez, para profundizar en el trabajo actual, se sugiere hacer más mediciones sobre la relación entre voltaje y corriente de la fotocelda para poder observar de manera más clara el valor de saturación de la corriente mencionado en la sección III A. Finalmente, también se sugiere calibrar de mejor manera el monocromador para evitar la propagación de un error sistemático como el encontrado en la Tabla I.

-
- [1] B. M. M. Niaz, S. Klassen and D. Metz, Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications for general physics textbooks., Sci. Ed. **94**, 903 (2010).
 - [2] A. Einstein, On a heuristic viewpoint concerning the production and transformation of light., Annalen der Physik **17**, 132 (1905).
 - [3] S. Klassen, The photoelectric effect: Reconstructing the story for the physics classroom, Sci. Ed. **20**, 719 (2011).
 - [4] R. Millikan, A direct photoelectric determination of planck's h ., Phys. Rev. **7**, 355 (1916).
 - [5] J. A.-C. A.J. Gamboa-Castillo, V. Knapp-Pérez, *Efecto fotoeléctrico: Medición de h* , Práctica de laboratorio, Facultad de Ciencias, UNAM (2019).
 - [6] NIST, Elementary charge e (2021).
 - [7] NIST, Planck constant h (2021).
 - [8] NIST, Persistent lines of neutral mercury hgi (2021).
 - [9] A. H. B. Petley, B. Kibble, A measurement of the planck constant, Nature **327**, 605 (1987).
 - [10] A. Eichenberger, H. Baumann, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, P. Richard, and W. Beer, Determination of the planck constant with the METAS watt balance, Metrologia **48**, 133 (2011).
 - [11] S. Schlamminger and D. El, The kibble balance and the kilogram <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.11.006> (2019).
 - [12] NIST, Speed of light in vacuum (2021).

⁹ $h = 6.62607015 \times 10^{-34}Js$ [7]

Appendix A: Datos experimentales

TABLE I: Longitudes de onda de las líneas de la lámpara de mercurio utilizada. Los valores de referencia y las incertidumbres fueron obtenidas de Gamboa-Castillo et al. [5].

λ_{ref} [nm]	λ_{med} [nm]	Dif % ^a	Error rel.
365.0153	361.9 ± 5.7	0.8	0.02
404.656	401.2 ± 6.3	0.8	0.02
435.8328	431.5 ± 10.2	1.0	0.02
491.604	487.6 ± 11.5	0.8	0.02
546.074	542.2 ± 21.8	0.7	0.04
576.959	576.1 ± 14.3	0.1	0.02

^a La diferencia porcentual entre un x_{exp} y un x_{ref} se calcula como: $\frac{|x_{ref}-x_{exp}|}{x_{ref}} \times 100$. El error relativo se calcula como $\frac{\delta x_{exp}}{x_{exp}}$.

TABLE II: Relación entre corriente y voltaje para una $\lambda = 361.9 \pm 5.7nm$. Los valores y las incertidumbres fueron obtenidas de Gamboa-Castillo et al. [5].

I [A]	δ_I [A]	V [V]	δ_V [V]
0	2×10^{-12}	-0.943	0.008
1.1×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.707	0.006
3.1×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.471	0.004
6.5×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.236	0.002
1.4×10^{-8}	2×10^{-9}	0.001	0.001
2.2×10^{-8}	2×10^{-9}	0.251	0.002
2.7×10^{-8}	2×10^{-9}	0.499	0.004
3.2×10^{-8}	2×10^{-9}	0.750	0.006
3.6×10^{-8}	2×10^{-9}	0.998	0.008
4.2×10^{-8}	2×10^{-9}	1.250	0.010
4.5×10^{-8}	2×10^{-9}	1.501	0.012
4.9×10^{-8}	2×10^{-9}	1.751	0.014
5.4×10^{-8}	2×10^{-9}	1.998	0.016

TABLE III: Relación entre corriente y voltaje para una $\lambda = 401.2 \pm 6.3nm$. Los valores y las incertidumbres fueron obtenidas de Gamboa-Castillo et al. [5].

I [A]	δ_I [A]	V [V]	δ_V [V]
0	2×10^{-12}	-0.804	0.006
1.3×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.602	0.005
3.4×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.402	0.003
7.3×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.202	0.002
1.5×10^{-8}	2×10^{-9}	0.001	0.001
2.5×10^{-8}	2×10^{-9}	0.250	0.002
3.2×10^{-8}	2×10^{-9}	0.498	0.004
3.7×10^{-8}	2×10^{-9}	0.751	0.006
4.2×10^{-8}	2×10^{-9}	1.000	0.008
4.8×10^{-8}	2×10^{-9}	1.253	0.010
5.3×10^{-8}	2×10^{-9}	1.500	0.012
5.7×10^{-8}	2×10^{-9}	1.751	0.014
6.2×10^{-8}	2×10^{-9}	2.002	0.016

TABLE IV: Relación entre corriente y voltaje para una $\lambda = 431.5 \pm 10.2nm$. Los valores y las incertidumbres fueron obtenidas de Gamboa-Castillo et al. [5].

I [A]	δ_I [A]	V [V]	δ_V [V]
0	2×10^{-12}	-0.698	0.006
2.9×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.524	0.005
8.2×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.349	0.003
1.9×10^{-8}	2×10^{-9}	-0.174	0.002
3.9×10^{-8}	2×10^{-9}	0.002	0.001
6.5×10^{-8}	2×10^{-9}	0.250	0.002
8.4×10^{-8}	2×10^{-9}	0.498	0.004
1.0×10^{-7}	2×10^{-8}	0.750	0.006
1.1×10^{-7}	2×10^{-8}	1.003	0.008
1.2×10^{-7}	2×10^{-8}	1.252	0.010
1.3×10^{-7}	2×10^{-8}	1.500	0.012
1.4×10^{-7}	2×10^{-8}	1.758	0.014
1.5×10^{-7}	2×10^{-8}	1.999	0.016

TABLE V: Relación entre corriente y voltaje para una $\lambda = 487.6 \pm 11.5nm$. Los valores y las incertidumbres fueron obtenidas de Gamboa-Castillo et al. [5].

I [A]	δ_I [A]	V [V]	δ_V [V]
0	2×10^{-12}	-0.478	0.006
2.0×10^{-10}	6×10^{-11}	-0.358	0.005
4.0×10^{-10}	2×10^{-11}	-0.239	0.003
7.6×10^{-10}	3×10^{-11}	-0.119	0.002
1.3×10^{-9}	2×10^{-10}	0.001	0.001
2.5×10^{-9}	2×10^{-10}	0.250	0.002
3.3×10^{-9}	2×10^{-10}	0.498	0.004
3.9×10^{-9}	2×10^{-10}	0.753	0.006
4.5×10^{-9}	2×10^{-10}	1.001	0.008
5.0×10^{-9}	2×10^{-10}	1.250	0.010
5.5×10^{-9}	2×10^{-10}	1.499	0.012
6.1×10^{-9}	2×10^{-10}	1.749	0.014
6.6×10^{-9}	2×10^{-10}	2.002	0.016

TABLE VI: Relación entre corriente y voltaje para una $\lambda = 542.2 \pm 21.8nm$. Los valores y las incertidumbres fueron obtenidas de Gamboa-Castillo et al. [5].

I [A]	δ_I [A]	V [V]	δ_V [V]
0	2×10^{-12}	-0.349	0.003
3.5×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.262	0.002
1.0×10^{-8}	1×10^{-9}	-0.174	0.002
2.1×10^{-8}	2×10^{-9}	-0.088	0.001
3.7×10^{-8}	2×10^{-9}	0.001	0.001
8.4×10^{-8}	2×10^{-9}	0.251	0.002
1.1×10^{-7}	2×10^{-8}	0.497	0.004
1.2×10^{-7}	2×10^{-8}	0.748	0.006
1.4×10^{-7}	2×10^{-8}	1.005	0.008
1.6×10^{-7}	2×10^{-8}	1.247	0.010
1.7×10^{-7}	2×10^{-8}	1.499	0.012
1.8×10^{-7}	2×10^{-8}	1.750	0.014
1.9×10^{-7}	2×10^{-8}	1.999	0.016

TABLE VII: Relación entre corriente y voltaje para una $\lambda = 576.1 \pm 14.3nm$. Los valores y las incertidumbres fueron obtenidas de Gamboa-Castillo et al. [5].

I [A]	δ_I [A]	V [V]	δ_V [V]
0	2×10^{-12}	-0.270	0.002
1.9×10^{-9}	2×10^{-10}	-0.203	0.002
5.0×10^{-9}	1×10^{-10}	-0.135	0.001
1.1×10^{-8}	2×10^{-9}	-0.068	0.001
4.2×10^{-8}	2×10^{-9}	-0.001	0.001
4.8×10^{-8}	2×10^{-9}	0.250	0.002
6.6×10^{-8}	2×10^{-9}	0.500	0.004
7.7×10^{-8}	2×10^{-9}	0.749	0.006
8.6×10^{-8}	2×10^{-9}	1.000	0.008
9.6×10^{-8}	2×10^{-9}	1.249	0.010
1.0×10^{-7}	2×10^{-8}	1.498	0.012
1.0×10^{-7}	2×10^{-8}	1.749	0.014
1.1×10^{-7}	2×10^{-8}	2.001	0.016

TABLE VIII: Valores de frecuencia para las λ medidas en la lámpara de mercurio y para su respectivo voltaje de frenado. Los valores y las incertidumbres fueron obtenidas de Gamboa-Castillo et al. [5].

λ [m]	δ_λ	ν^a [Hz]	δ_ν	V_0 [V]	δ_{V_0}
3.619×10^{-7}	5.7×10^{-9}	8.28×10^{14}	1.3×10^{13}	0.943	0.008
4.012×10^{-7}	6.3×10^{-9}	7.47×10^{14}	1.2×10^{13}	0.804	0.006
4.315×10^{-7}	1.02×10^{-8}	6.95×10^{14}	1.6×10^{13}	0.698	0.006
4.876×10^{-7}	1.15×10^{-8}	6.15×10^{14}	1.5×10^{13}	0.478	0.006
5.422×10^{-7}	2.18×10^{-8}	5.53×10^{14}	2.2×10^{13}	0.349	0.003
5.761×10^{-7}	1.43×10^{-8}	5.20×10^{14}	1.3×10^{13}	0.270	0.002

^a Se utilizó la relación $c = \nu\lambda$ para calcular la frecuencia ν utilizando un valor de $c = 299792458m/s$ [12].

Appendix B: Método de Montecarlo

El programa usado para el ajuste lineal mediante simulaciones Montecarlo se encuentra en el siguiente link. A su vez, la distribución de los parámetros m y b para el modelo de ajuste lineal $V_0 = m\nu + b$ puede ser observada en la Figura 4.

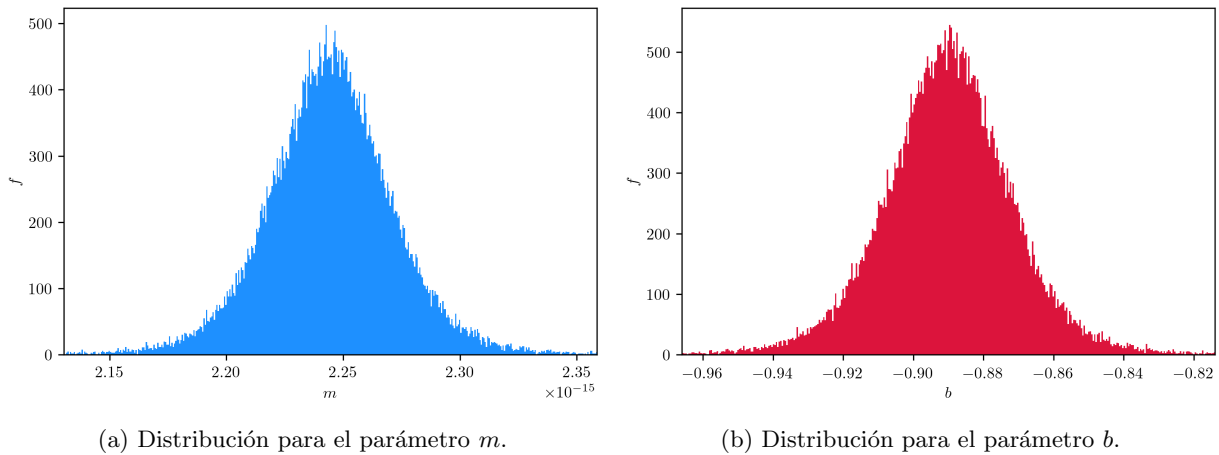


FIG. 4: Distribuciones de frecuencia para los parámetros m y b obtenidas mediante el ajuste lineal hecho con simulaciones de Montecarlo.