



Universidad de Alicante

Práctica 1A y 1C: Determinación de la constante de Planck.

Mireia Serrano Beltrá

Técnicas Experimentales II
Curso 2023-2024

Índice

1. Resumen	1
2. Efecto fotoeléctrico y determinación de la constante de Planck	1
2.1. Introducción	1
2.2. Materiales	2
2.3. Método experimental	2
2.4. Resultados	3
2.4.1. Dependencia con la frecuencia	3
2.4.2. Dependencia con la intensidad	5
2.5. Conclusiones	6
3. Determinación de la constante de Planck con diodos emisores de luz (LEDs)	7
3.1. Introducción	7
3.2. Materiales	8
3.3. Método experimental	8
3.4. Resultados	9
3.4.1. Actividad 1	9
3.4.2. Actividad 2	10
3.4.3. Actividad 3	14
3.5. Conclusión	14
4. Actividad extra.	15
5. Apéndice	16
6. Bibliografía	17

1. Resumen

Estudiar el efecto fotoeléctrico mediante una fotocélula y una lámpara espectral de mercurio para distintas frecuencias e intensidades. De esta manera determinaremos el valor de la función de trabajo.

Verificaremos la dependencia lineal de la energía de los electrones y la frecuencia incidente, que nos permitirá calcular la constante de Planck.

2. Efecto fotoeléctrico y determinación de la constante de Planck

2.1. Introducción

En 1886, Frank Hertz, observó que una descarga eléctrica entre dos electrodos ocurría más fácilmente cuando sobre el cátodo incidía luz ultravioleta. Posteriormente, Lenard, demostró que la descarga era debida a la emisión de electrones que tenía lugar desde la superficie del cátodo cuasada por la incidencia de la luz ultravioleta. Esta emisión de electrones desde la superficie de un metal por la acción de la luz es denominada **efecto fotoeléctrico**.. Consiste en la emisión de electrones de un metal a causa de la incidencia de luz de determinada frecuencia.

Este fenómeno presentaba una serie de características peculiares que no tenían explicación posible en el marco de la teoría ondulatoria de la luz. En el año 1905, Albert Einstein propuso una explicación basándose en la teoría cuántica de la radiación de Planck, que estaba constituida por los cuantos de energía $h \cdot \nu$, a los que llamó fotones.

Las principales características de este experimento son:

- No se observa un intervalo de tiempo medible entre la incidencia de la luz y la emisión de electrones. El hecho de que se emitan o no depende de la intensidad de la luz.
- La emisión depende de la frecuencia incidente. Existe una frecuencia umbral característica del material por debajo de la cual no se produce el efecto.
- La corriente, si existe, es proporcional a la intensidad de la luz.
- La energía total de los electrones emitidos es independiente de la intensidad de la luz pero varía linealmente con la frecuencia:

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

La clave está en el hecho de que los electrones pueden ser excitados si interaccionan con un fotón, llegando a ser arrancados del metal si la energía es suficiente. A la energía necesaria para que un electrón pueda escapar del metal la llamaremos función de trabajo del metal, representada por Φ .

Sin embargo, no detectaremos nada si los electrones no tienen aunque sea una pequeña energía cinética. A partir de la siguiente ecuación, relacionamos la velocidad, la función de trabajo y la frecuencia incidente:

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

No todos los electrones están ligados de la misma manera al metal, y por tanto sus energía cinéticas para una misma frecuencia pueden ser distintas. Por ello definimos la energía cinética máxima como aquella que adquirirán los electrones menos ligados, ya sea porque son los más extensos y han sufrido un menos número de colisiones internas o por otros motivos microscópicos.

Además, debemos definir el potencial de frenado como aquel que debemos aplicar contra los electrones emitidos para que no lleguen a la fotocélula ni siquiera los de energía cinética máxima:

$$eV = \frac{1}{2}mv_{max}^2 \quad (3)$$

De esta forma, midiendo en cada caso el potencial de frenado y la función de trabajo asociada a la energía cinética máxima (y por tanto mínima función de trabajo, Φ_0) podemos caracterizar el fenómeno con la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = eV = h\nu - \Phi_0 \quad (4)$$

2.2. Materiales

- Lámpara espectral de mercurio.
- Lente de distancia focal de 10 cm.
- Filtros interferenciales:

Color	λ (nm)
Amarillo	578
Verde	546
Violeta	436
Violeta	405
UV	365

Tabla 1: Longitudes de onda de los filtros interferenciales.

- Fototubo en el interior de una caja con obturador.
- Polímetro, cables de conexión.
- Amplificador.
- Filtros de densidad óptica.

2.3. Método experimental

Para poder estudiar el efecto fotoeléctrico, utilizamos una lámpara espectral de mercurio, cuyo espectro discreto tiene un gran número de líneas en el espectro visible. Para seleccionar tan solo una de estas líneas (una sola frecuencia), utilizamos distintos filtros interferenciales que solo dejan pasar una determinada λ . Colocaremos estos filtros en la entrada de un fototubo, que

está conectado a un circuito interno que automáticamente compensa la corriente de electrones al incidir la luz. También se utiliza un amplificador como electrómetro, se debe tener en cuenta que entre cada medida (con el fototubo tapado) hay que descargarlo debido a su gran impedancia. Mediante un polímetro medimos el potencial de frenado, a partir de esta medida podemos realizar el siguiente ajuste lineal:

$$V_f = \frac{h}{e}\nu - \frac{\Phi_0}{e} \quad (5)$$

donde $\nu = \frac{c}{\lambda_{filtro}}$. Si la ecuación lineal es $y = mx + n$, a partir de la pendiente m obtenemos:

$$h = m \cdot e \quad (6)$$

y a partir de la ordenada n :

$$\Phi_0 = -e \cdot n \quad (7)$$

Además, calcularemos la frecuencia umbral a partir de la cual es posible la emisión:

$$\nu_0 = \frac{\Phi_0}{h} \quad (8)$$

De esta manera, verificaremos la cuantización del intercambio de energía, es decir, la radiación se comporta como partículas (fotones) y comprobaremos el valor de la constante de Planck.

2.4. Resultados

2.4.1. Dependencia con la frecuencia

A continuación estudiamos los resultados obtenidos experimentalmente, siguiendo el método descrito en el apartado anterior.

En la tabla 2 se muestran los datos medidos con el polímetro de los potenciales de frenado para cada frecuencia. Hemos añadido un error de $\pm 1\text{nm}$ a cada longitud de onda al considerar la precisión del dato, como si se tratara de un error de sensibilidad. Tanto los errores del potencial de frenado como de la frecuencia se detallan en el apéndice 5.

$\lambda \pm 1$ (nm)	V1	V2	V3	\bar{V} (V)	Frecuencia (Hz)
578	0,631	0,65	0,624	$0,6350 \pm 0,013$	$(5,187 \pm 0,009) \times 10^{14}$
546	0,789	0,785	0,81	$0,7945 \pm 0,013$	$(5,49 \pm 0,01) \times 10^{14}$
436	1,344	1,32	1,359	$1,34 \pm 0,02$	$(6,876 \pm 0,016) \times 10^{14}$
405	1,523	1,541	1,578	$1,54 \pm 0,03$	$(7,402 \pm 0,018) \times 10^{14}$
366	1,833	1,813	1,835	$1,8270 \pm 0,012$	$(8,19 \pm 0,02) \times 10^{14}$

Tabla 2: Potenciales de frenado para cada filtro.

Representamos los valores de \bar{V} en función de la frecuencia.

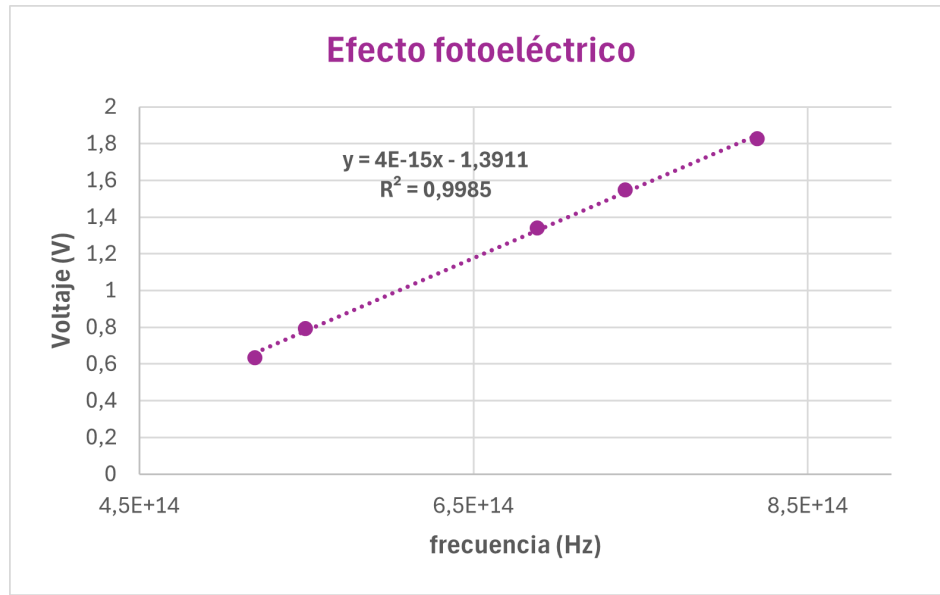


Figura 1: Efecto fotoeléctrico.

Utilizando la función de excel **AJUSTE.LINEAL()** obtenemos la siguiente expresión del ajuste lineal:

$$V_f = m\nu + n$$

R^2	m (pendiente)	n (ordenada en el origen)
0,9985	$(3,95 \pm 0,09) \times 10^{-15}$	$-1,39 \pm 0,06$

Tabla 3: Resultados del ajuste lineal.

Utilizando las ecuaciones 6 y 7 obtenemos los valores de h y Φ_0 :

Constante de Planck h ($J \cdot s$)	Función de trabajo Φ_0 (eV)
$(6,32 \pm 0,14) \times 10^{-34}$	$1,39 \pm 0,06$

Tabla 4: Resultados

La frecuencia umbral se obtiene de la ecuación 8 :

$$\nu_0 = \frac{1,39 \cdot 1,6 \times 10^{-19}}{6,32 \times 10^{-34}} = 3,5 \times 10^{14} \text{Hz}$$

2.4.2. Dependencia con la intensidad

A continuación vamos a añadir un filtro de densidad óptica para controlar la intensidad de la luz incidente sobre el material. Utilizaremos filtros de las siguientes densidades: 0,1/0,2/0,3/0,4/0,7/1.

Frecuencia (Hz)	Diferencia de potencial (V)					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1
$(5,187 \pm 0,009) \times 10^{14}$	0,618	0,606	0,598	0,583	0,555	0,522
$(5,49 \pm 0,01) \times 10^{14}$	0,764	0,751	0,739	0,728	0,683	0,643
$(6,876 \pm 0,016) \times 10^{14}$	1,236	1,202	1,179	1,146	1,05	0,987
$(7,402 \pm 0,018) \times 10^{14}$	1,343	1,313	1,273	1,232	1,116	1,041
$(8,19 \pm 0,02) \times 10^{14}$	1,438	1,387	1,325	1,253	1,005	0,825

Tabla 5: Potencial de frenado con cada filtro de densidad óptica.

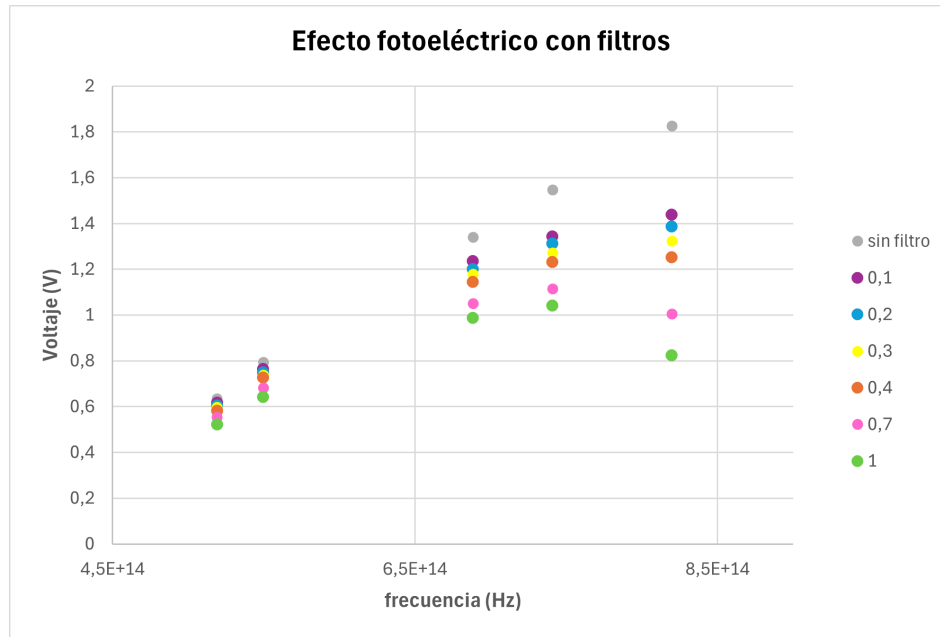


Figura 2: Potencial de frenado para cada filtro de densidad óptica

En la gráfica 2 se ha representado el potencial de frenado respecto de la frecuencia, utilizando un color para cada filtro. Para las frecuencias más altas, los filtros modifican más la medida en comparación con las frecuencias bajas. A mayor densidad del filtro más notorio es este efecto.

Esto se debe a que para haces de longitudes de onda más bajas (frecuencias altas) el filtro modifica la frecuencia de la luz que lo atraviesa, no solo influye en la intensidad. Es por esto que cuanto más opaco es este instrumento menos fiable es la medida obtenida.

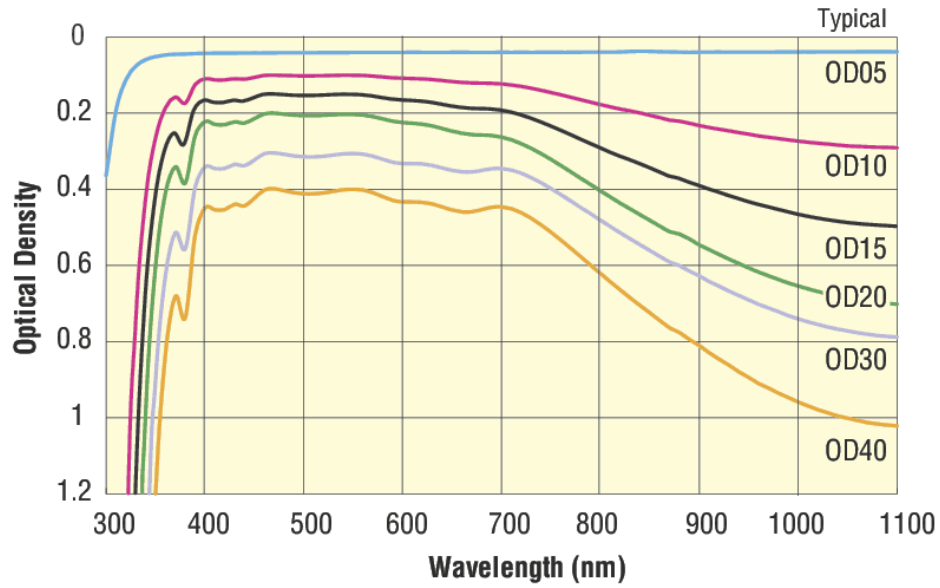


Figura 3: Gráfica eficiencia filtros de densidad óptica.

Tal y como se ve en la imagen 3 cuando la densidad es casi nula la longitud de onda permanece constante.

2.5. Conclusiones

De esta primera parte, podemos concluir que el ajuste lineal obtenido es correcto como se observa en el coeficiente de correlación lineal (aproximadamente 1).

El valor obtenido de la constante de Planck $h = (6,32 \pm 0,14) \times 10^{-34}$ Js es compatible con el valor tabulado.

No obstante la función de trabajo $\Phi_0 = 1,39 \pm 0,06$ eV es muy baja, y no coincide con los valores tabulados de los materiales más comunes utilizados en la fotocélula, y por tanto sucede lo mismo con la frecuencia umbral. Podemos pensar que se trata de Cesio ya que su función de trabajo es $\Phi_0 = 2,14$ eV y se trata del valor más próximo al que hemos obtenido experimentalmente.

Por tanto, hay una gran desviación en la ordenada en el origen, pero no se ve afectada la pendiente. Probablemente, se debe a efectos no tenidos en cuenta en la realización de la práctica, que hacen disminuir este valor.

Una posible fuente de error, es el calentamiento del metal por la lámpara espectral, que podría aportar radiación adicional mayor, un flujo extra de electrones y un potencial de frenado mayor para compensarlo.

3. Determinación de la constante de Planck con diodos emisores de luz (LEDs)

3.1. Introducción

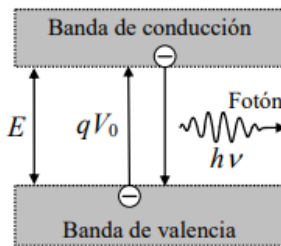
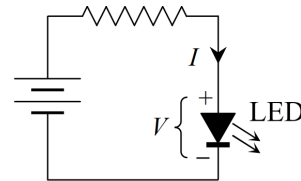
En esta segunda parte determinaremos la constante de Planck teniendo en cuenta la relación entre la energía y la frecuencia:

$$E = h\nu \quad (9)$$

Conocida la longitud de onda de los fotones emitidos por el led podemos obtener la frecuencia ya que:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (10)$$

Utilizaremos LEDs, que son dispositivos electrónicos que emiten luz cuando circula por él una corriente eléctrica I . Para que esta corriente circule es necesario que la diferencia de potencial entre sus terminales, V , sea superior a un cierto valor umbral V_0 .



En los materiales semiconductores los electrones se encuentran en niveles de energía muy próximos formando "bandas". La de menor energía es la banda de valencia, que está llena de electrones, y existe otra banda con menor energía y pocos electrones, denominada banda de conducción. Ambas están separadas por una banda "prohibida" de energía E .

Un LED, es un tipo de diodo semiconductor, que consta de capas dopadas n (exceso de electrones) y p (con exceso de huecos). Cuando una corriente eléctrica se hace pasar a través de esta unión, tipo p-n, la recombinación de electrones y los huecos libera energía en forma de fotones.

Para excitar un electrón desde la banda de valencia hasta la de conducción debe absorber, como mínimo, una energía:

$$E = qV_0 \quad (11)$$

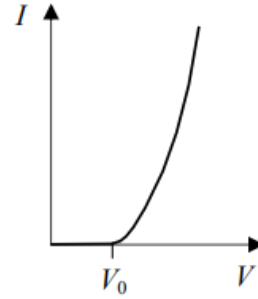
donde q es la carga elemental. Esta energía es aportada por la fuente de alimentación del circuito con el LED.

Cuando el electrón se desexcita y regresa a la banda de valencia se emite un fotón de energía $E = h \cdot \nu$, donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de radiación emitida.

La relación teórica entre la corriente y la tensión en el diodo está dada por la ecuación de Shockley:

$$I(V) = I_S \cdot (e^{(qV/nK_B T)} - 1) \quad (12)$$

I_s es la corriente de saturación, q la carga del electrón, K_B la constante de Boltzman, T la temperatura, n es un factor de nominado de idealidad y suele valer 1.62 para los leds más comunes.



3.2. Materiales

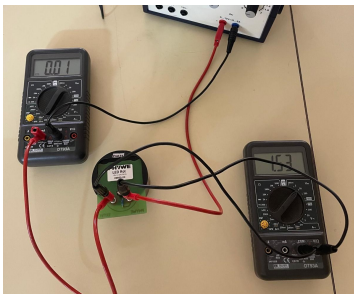
- LEDs:

LEDs	λ (nm)
UV	399 nm
Azul	463 nm
Verde	530 nm
Rojo	632 nm
IR	921 nm

Tabla 6: LEDs

- 2 multímetros
- Cables
- Fuente de alimentación

3.3. Método experimental



En la segunda parte del informe, distinguiremos diferentes actividades.

Primero, debemos montar el circuito de forma que el LED se encuentre en polarización directa y se pueda medir el potencial y la intensidad. Tal y como se ve en la imagen.

1. **Actividad 1:** debemos medir del potencial umbral, a partir del cual empieza a haber corriente. Para ello, aumentamos el potencial hasta que el amperímetro mida 0,01 mA. Aplicando la ecuación $E = h \cdot \nu$ se obtiene la constante de Planck.
2. **Actividad 2:** mediremos la intensidad para varios valores del voltaje aplicado y se representa para obtener una curva I-V.

3. **Actividad 3:** el objetivo es el mismo que en la actividad 1, sin embargo, no utilizaremos un amperímetro. Detectamos el voltaje umbral a simple vista, observando cuándo se empieza a emitir luz.

3.4. Resultados

3.4.1. Actividad 1

Los resultados obtenidos y sus respectivos errores¹:

λ (nm)	ν (Hz)	V (V)	E (J)
399 ± 1	$(7,519 \pm 0,019) \times 10^{14}$	$2,36 \pm 0,01$	$(3,776 \pm 0,016) \times 10^{-9}$
463 ± 1	$(6,880 \pm 0,014) \times 10^{14}$	$2,12 \pm 0,01$	$(3,392 \pm 0,016) \times 10^{-9}$
530 ± 1	$(5,660 \pm 0,011) \times 10^{14}$	$1,76 \pm 0,01$	$(2,816 \pm 0,016) \times 10^{-9}$
632 ± 1	$(4,747 \pm 0,008) \times 10^{14}$	$1,35 \pm 0,01$	$(2,160 \pm 0,016) \times 10^{-9}$
921 ± 1	$(3,257 \pm 0,004) \times 10^{14}$	$0,74 \pm 0,01$	$(1,184 \pm 0,016) \times 10^{-9}$

Tabla 7: Resultados actividad 1.

Representamos la energía $E = q \cdot V_{th}$ frente a la frecuencia para hallar la constante de Planck.

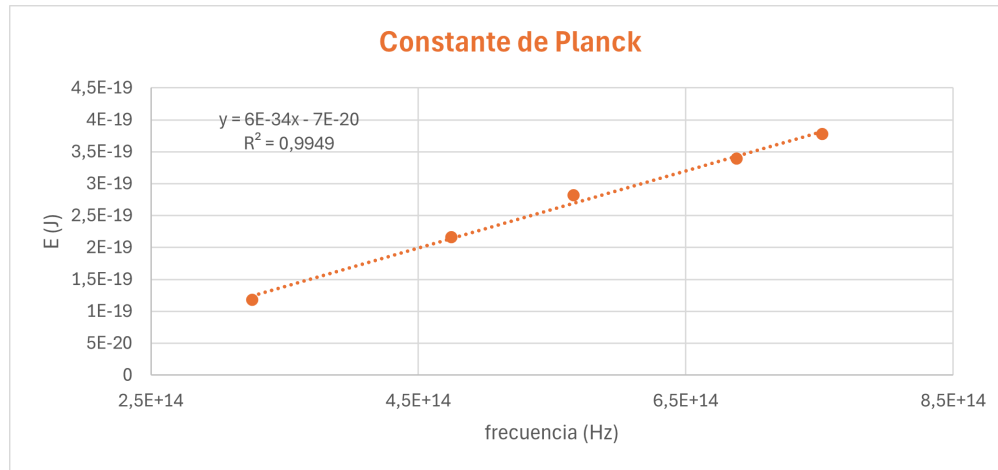


Figura 4

La pendiente de la recta es $h = (6,1 \pm 0,3) \times 10^{-34} J \cdot s$ que es compatible con el valor tabulado $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$.

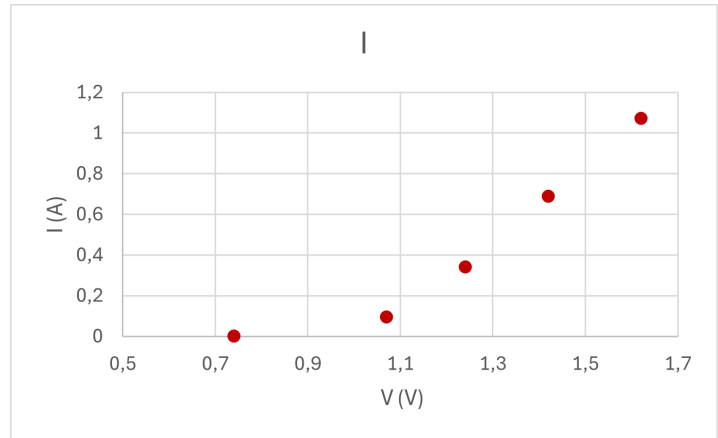
¹Los errores se detallan en el apéndice 5.

3.4.2. Actividad 2

Ahora medimos la intensidad de corriente para diversos valores del voltaje para cada LED, y obtenemos las siguientes curvas I-V:

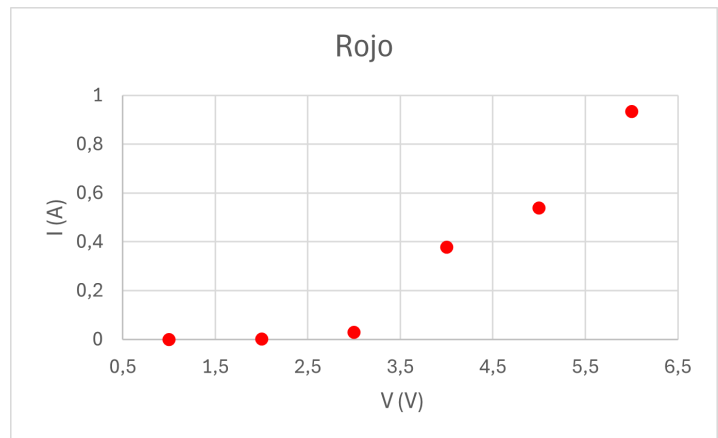
IR $\lambda = 921 \text{ nm}$	
V (V)	I (A)
$0,74 \pm 0,01$	$0,001 \pm 0,001$
$1,07 \pm 0,01$	$0,096 \pm 0,001$
$1,24 \pm 0,01$	$0,343 \pm 0,001$
$1,42 \pm 0,01$	$0,689 \pm 0,001$
$1,62 \pm 0,01$	$1,073 \pm 0,001$

Tabla 8: Infrarrojo.



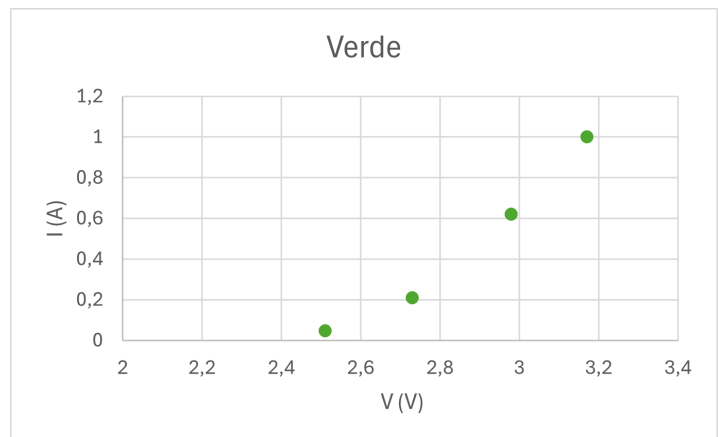
Rojo ($\lambda = 632 \text{ nm}$)	
V (V)	I (A)
$1,35 \pm 0,01$	$0,001 \pm 0,001$
$1,61 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,001$
$1,87 \pm 0,01$	$0,378 \pm 0,001$
$1,95 \pm 0,01$	$0,539 \pm 0,001$
$2,16 \pm 0,01$	$0,934 \pm 0,001$

Tabla 9: Rojo.



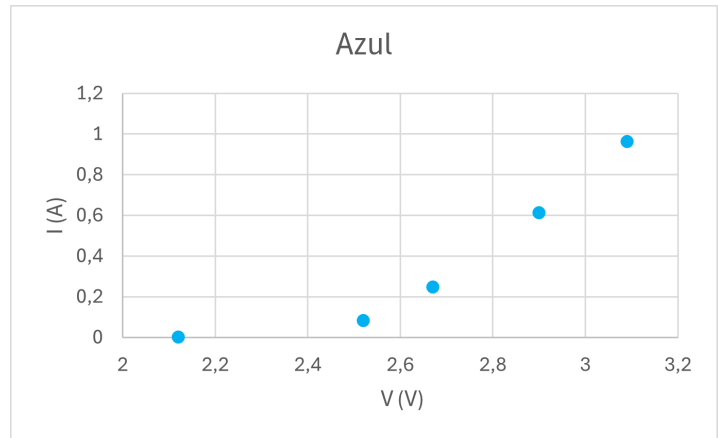
Verde ($\lambda = 530 \text{ nm}$)	
V (V)	I (A)
$1,76 \pm 0,01$	$0,001 \pm 0,001$
$2,51 \pm 0,01$	$0,047 \pm 0,001$
$2,73 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,001$
$2,98 \pm 0,01$	$0,62 \pm 0,001$
$3,17 \pm 0,01$	$1,002 \pm 0,001$

Tabla 10: Verde



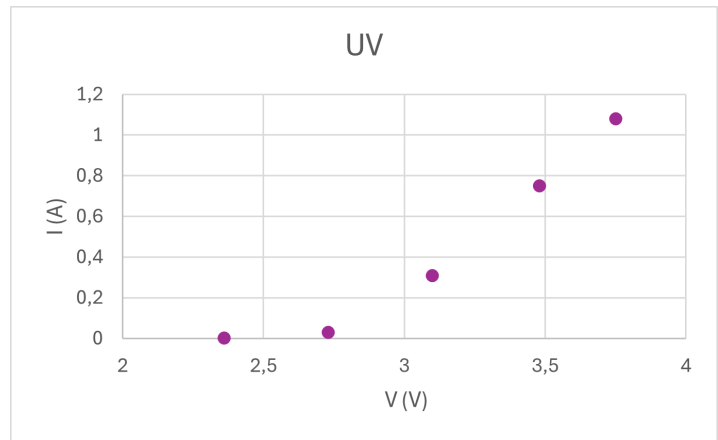
Azul ($\lambda = 463 \text{ nm}$)	
V (V)	I (A)
$2,12 \pm 0,01$	$0,001 \pm 0,001$
$2,52 \pm 0,01$	$0,082 \pm 0,001$
$2,67 \pm 0,01$	$0,249 \pm 0,001$
$2,9 \pm 0,01$	$0,614 \pm 0,001$
$3,09 \pm 0,01$	$0,964 \pm 0,001$

Tabla 11: Azul



UV $\lambda = 399 \text{ nm}$	
V (V)	I (A)
$2,36 \pm 0,01$	$0,001 \pm 0,001$
$2,73 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,001$
$3,1 \pm 0,01$	$0,309 \pm 0,001$
$3,48 \pm 0,01$	$0,749 \pm 0,001$
$3,75 \pm 0,01$	$1,08 \pm 0,001$

Tabla 12: UV



La relación entre intensidad y voltaje para un diodo viene dada por una ecuación exponencial. Para ajustar los datos experimentales con la curva teórica probamos con el siguiente modelo exponencial:

$$I = a \cdot e^{b \cdot V} \quad (13)$$

Con este ajuste obtenemos las siguientes gráficas:

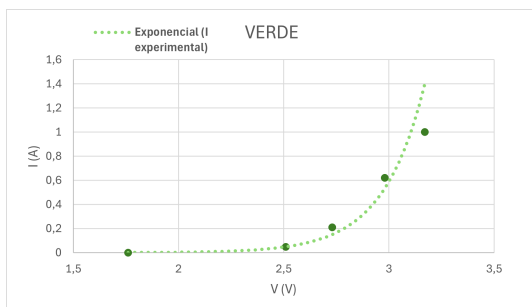


Figura 5: Verde.

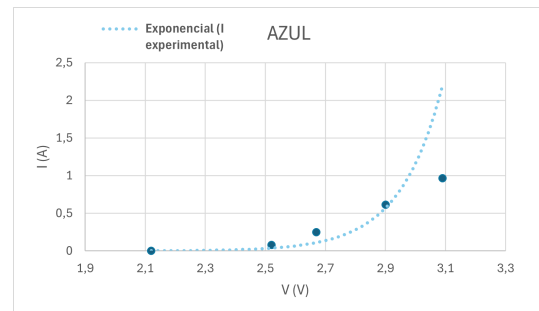


Figura 6: Azul.

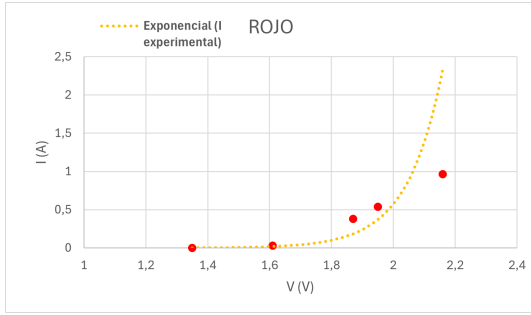


Figura 7: Rojo.

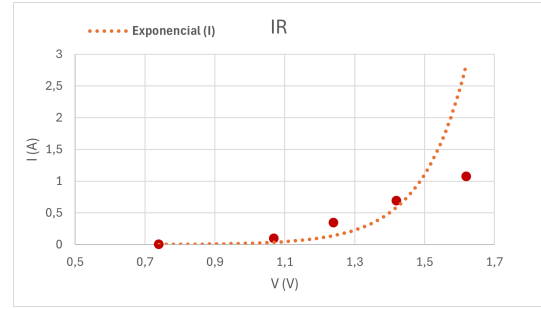


Figura 8: Infrarrojo.

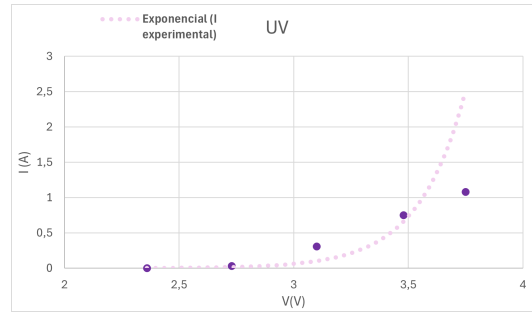


Figura 9: Ultravioleta.

Figura 10: Ajuste curva teórica IV con datos experimentales, modelo exponencial.

El modelo exponencial no proporciona un buen ajuste de los datos. Para estos dispositivos, diodos semiconductores, la conducción de la corriente a través de la unión PN viene dada por el modelo de Shockley. Teniendo en cuenta la ecuación 15, realizamos el siguiente ajuste:

$$I = a(e^{bV} - 1) \quad (14)$$

Puesto que este modelo no es uno de los ajustes predeterminados de excel, utilizaremos Python, en concreto la biblioteca SciPy. La función `curve_fit` ajusta la ecuación de Shockley a los datos experimentales. Encuentra los valores óptimos de los parámetros a y b que minimizan el error entre la función de Shockley y los datos experimentales. Los parámetros obtenidos son:

Modelo de Shockley		
LED	a	b
AZUL	$4,022 \times 10^{-5}$	3.273
VERDE	$2,569 \times 10^{-5}$	3.343
UV	$5,025 \times 10^{-4}$	2.057
IR	0.0069	3.139
ROJO	$4,144 \times 10^{-4}$	3.602

Tabla 13: Parámetros del ajuste de Shockley

Representamos la intensidad frente al voltaje para cada color:

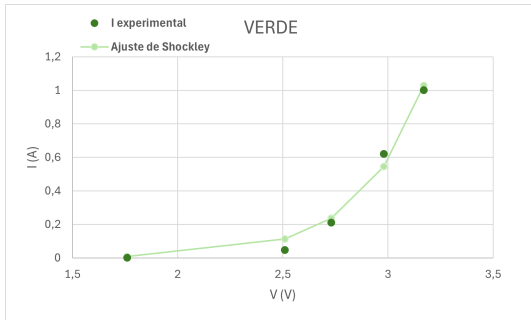


Figura 11: Verde.

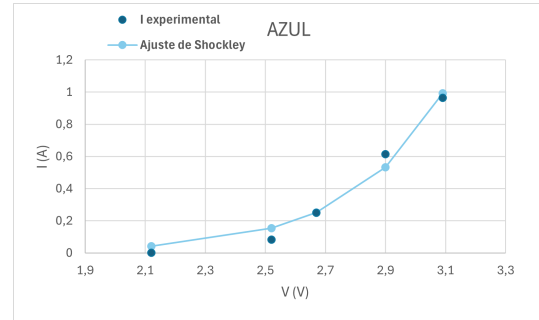


Figura 12: Azul.

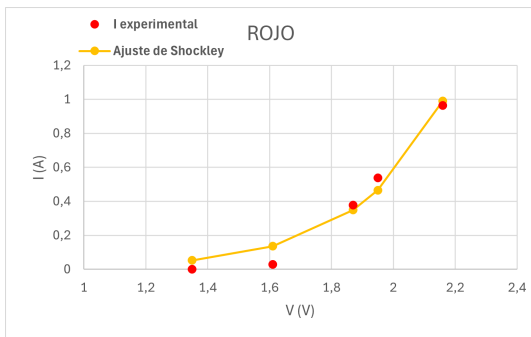


Figura 13: Rojo.

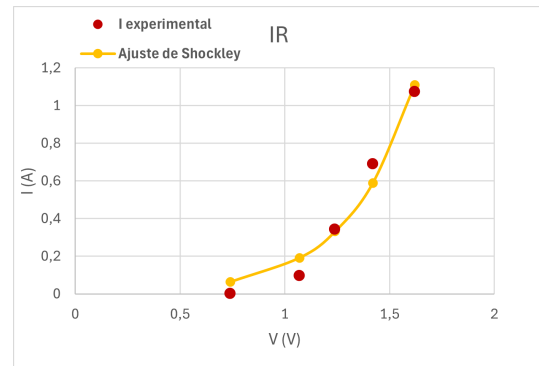


Figura 14: Infrarrojo.

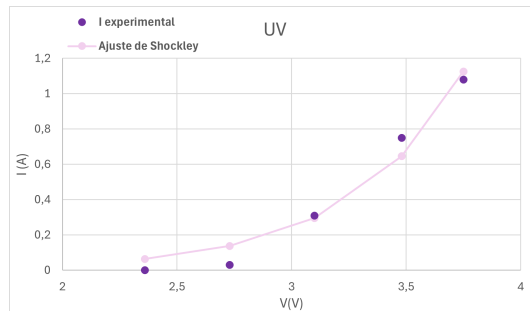


Figura 15: Ultravioleta.

Figura 16: Ajuste curva teórica IV con datos experimentales, modelo exponencial.

Tal y como muestran las gráficas, el modelo teórico es preciso y aplicable a los dispositivos que se han empleado.

3.4.3. Actividad 3

λ (nm)	ν (Hz)	V (V)	E (J)
399 ± 1	$(7,5188 \pm 0,0019) \times 10^{14}$	$2,88 \pm 0,01$	$(4,608 \pm 0,016) \times 10^{-19}$
463 ± 1	$(6,8807 \pm 0,0014) \times 10^{14}$	$2,53 \pm 0,01$	$(4,048 \pm 0,016) \times 10^{-19}$
530 ± 1	$(5,6604 \pm 0,0011) \times 10^{14}$	$2,14 \pm 0,01$	$(3,424 \pm 0,016) \times 10^{-19}$
632 ± 1	$(4,7468 \pm 0,0008) \times 10^{14}$	$1,67 \pm 0,01$	$(2,672 \pm 0,016) \times 10^{-19}$

Tabla 14: Resultados experimentales montaje 2.

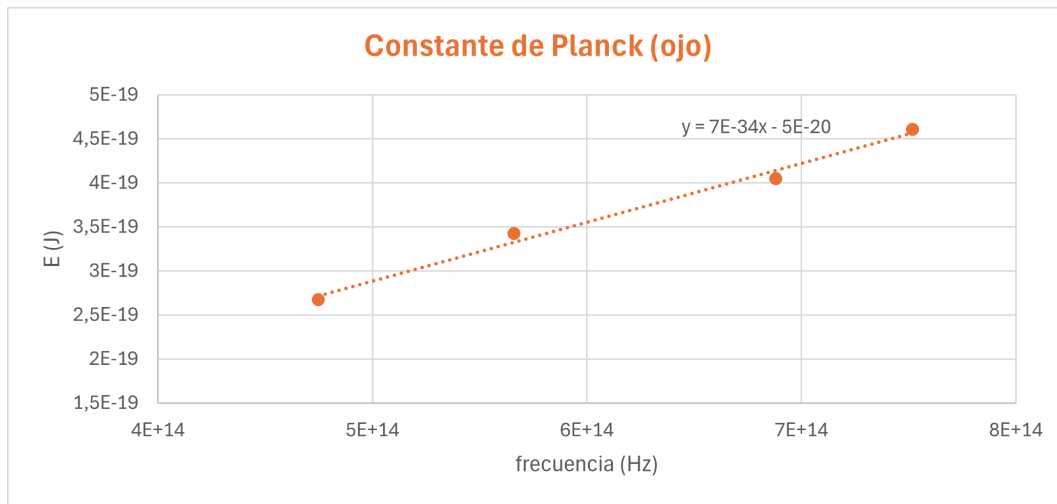


Figura 17: Ajuste lineal mediciones sin amperímetro.

La pendiente de la recta es $h = (6,7 \pm 0,5) \times 10^{-34} J \cdot s$ que es compatible con el valor tabulado $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$.

3.5. Conclusión

En primer lugar, se ha obtenido que la constante de Planck

El uso de un voltímetro para determinar el potencial umbral de los LEDs es más preciso que viéndolo a simple vista, y proporciona un valor de la constante de Planck más próximo al valor tabulado.

Además hemos aplicado el modelo de Shockley al experimento, por tanto se han utilizado diferentes herramientas, no solo de mecánica cuántica, si no también de electrónica para la comprensión de este fenómeno.

En conclusión, se ha estudiado el efecto fotoeléctrico, y hemos verificado la dependencia lineal con la frecuencia de la luz incidente. Este hecho nos ha ayudado a obtener la constante de Planck y comprender la cuantización del intercambio de energía en este fenómeno.

4. Actividad extra.

Por último, añadiremos una actividad extra donde calcularemos la constante de Boltzmann a partir de la relación entre la intensidad y voltaje en los LEDs.

La constante de Boltzmann (k_B) es esencial para entender la relación entre la temperatura y la energía de las partículas en un sistema. Por otro lado, el comportamiento de los diodos, está descrito por la ecuación del diodo de Shockley, que proporciona una relación entre la corriente y el voltaje aplicados. Haremos uso de dicha ecuación para determinar la constante de Boltzmann.

La ecuación del modelo de Shockley :

$$I(V) = a \cdot (e^{bV} - 1) = I_S \cdot (e^{qV/nK_B T} - 1) \quad (15)$$

En el apartado anterior hemos realizado un ajuste para cada LED, de donde hemos obtenido los diferentes valores de b . De este ajuste también podemos extraer la constante de Boltzmann, ya que:

$$b = \frac{q}{nK_B T}$$

En el ajuste se han obtenido valores muy similares entre sí. Estos valores deberían ser constantes, pero las pequeñas variaciones entre sí se deben a posibles errores en la medición. Calculamos la constante para cada uno de ellos, y finalmente obtenemos el valor medio, con su error calculado a partir de la desviación estándar.

$$k_B = (1,1 \pm 1,3) \times 10^{-22} J \cdot K^{-1}$$

El valor tabulado es $1,380649 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$, está dentro del rango de incertidumbre del valor experimental. Aunque el valor obtenido no es del todo preciso, es compatible con el valor aceptado de la constante de Boltzmann.

5. Apéndice

Cálculo de errores

En esta sección detallaremos el cálculo de los errores utilizados a lo largo de este informe. Aquellos que no se incluyen se han obtenido mediante herramientas de excel, ya que vienen dados al utilizar la función AJUSTE.LINEAL().

Para obtener los errores del potencial de frenado, como se trata de un valor medio:

$$\Delta \bar{V} = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{nominal}^2}$$

Donde σ_{est} es la desviación típica:

$$\sigma_{est} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (V_j - \bar{V})^2}{3 - 1}}$$

Así para cada longitud de onda. Teniendo la incertidumbre de las medidas obtenidas del multímetro, tomamos el siguiente error nominal: $\sigma_{nom} = 0,001$.

Por otro lado, para el error de la frecuencia seguimos el método de propagación de errores:

$$\Delta \nu = \frac{c}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2} = \frac{c}{\lambda} \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)$$

Puesto que el valor de la velocidad de la luz no tiene error.

Para obtener el error de la energía (Actividad 1, práctica 1C):

$$E = qV$$

$$\Delta E = qV \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2} = q \cdot \Delta V$$

Ajuste de Shockley

```

1 Modelo de Shockley
2
3 import numpy as np
4 from scipy.optimize import curve_fit
5
6 def sh(x, a, b):
7     return a * (np.exp(b * x) - 1)
8
9 #IR
10 i1 = np.array([0.001, 0.096, 0.343, 0.689, 1.073])
11 v1 = np.array([0.74, 1.07, 1.24, 1.42, 1.62])
12
13 #ROJO
14 i1 = np.array([0.001, 0.03, 0.378, 0.539, 0.964])
15 v1 = np.array([1.35, 1.61, 1.87, 1.95, 2.16])
16
17 #AZUL
18 i1 = np.array([0.001, 0.082, 0.249, 0.614, 0.964])
19 v1 = np.array([2.12, 2.52, 2.67, 2.9, 3.09])
20
21 #VERDE
22 i1 = np.array([0.001, 0.047, 0.21, 0.62, 1.002])
23 v1 = np.array([1.76, 2.51, 2.73, 2.98, 3.17])
24
25 #UV
26 i1 = np.array([0.001, 0.03, 0.309, 0.749, 1.08])
27 v1 = np.array([2.36, 2.73, 3.1, 3.48, 3.75])
28
29 sh1 = curve_fit(sh,v1,i1,p0 = (5,5),maxfev = 5000)
30 a_shockley, b_shockley = sh1
31 print("Valores de a y b para el ajuste de Shockley:", a_shockley, b_shockley)

```

6. Bibliografía

Algunas de las referencias bibliográficas empleadas para la realización de este informe son:

- Guión de prácticas 1C y 1A, Técnicas Experimentales II.
- Error medición e incertidumbre del resultado de una medición. Capítulo 4.
- Apuntes de Mecánica Cuántica I, María José Caturla, Grado en Física, Universidad de Alicante.
- Newport Corporation. "FS-3R - High-Precision Optical Filter Sets".
<https://www.newport.com/p/FS-3R>.