



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



# Análisis del Efecto Fotoeléctrico presente en Fotodetectores para Comunicaciones Ópticas

---

## Trabajo Fin de Grado

*Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación*

**AUTORA: ALBA LÓPEZ SEGOVIA**

**DIRECTOR: JOSÉ VÍCTOR RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ**

**CODIRECTOR: IGNACIO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ**

*OCTUBRE 2017*

---



<b>Autora</b>	Alba López Segovia
<b>E-mail del Autor</b>	Albalsg24@gmail.com
<b>Director</b>	José Víctor Rodríguez Rodríguez
<b>E-mail del Director</b>	jvictor.rodriguez@upct.es
<b>Título del TFG</b>	Análisis del Efecto Fotoeléctrico presente en Fotodetectores para Comunicaciones Ópticas
<p><b>Resumen</b></p> <p>El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio del denominado “Efecto Fotoeléctrico”, consistente en la generación de una intensidad eléctrica a partir de la incidencia de luz sobre una superficie metálica o semiconductor, Este fenómeno es el que se produce en los fotodetectores de comunicaciones ópticas con el fin de transformar la luz que se recibe por las fibras ópticas (fotones) en una señal eléctrica de información (electrones). En este trabajo, se analizará el efecto fotoeléctrico mediante un dispositivo comercial de medición de dicho fenómeno y diversos experimentos realizados con el mismo.</p> <p>El dispositivo cuenta con un fototubo necesario para generar la transformación de fotones en electrones, así como un conjunto de filtros de colores a diferentes frecuencias (diferentes longitudes de onda) para seleccionar varias fuentes de luz, Además, el aparato dispone de un conjunto de distintas aperturas con el fin de poder elegir otras tantas intensidades lumínicas sobre la superficie metálica del fototubo.</p> <p>De esta manera, se estudiará, en detalle, la existencia del efecto fotoeléctrico dentro del dispositivo así como la relación entre la iluminación suministrada al fototubo (a diferentes longitudes de onda y amplitudes) y la fotocorriente generada. Además, se realizará el cálculo de la constante de Planck, se demostrará la relación lineal existente entre la energía del fotón y la frecuencia, y realizaremos un análisis de la distribución de la energía de los electrones generados en el fototubo.</p>	
<b>Titulación</b>	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación
<b>Departamento</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación</b>	4 de Octubre de 2017



# Índice

Introducción .....	6
1.1 Fotodetectores ópticos .....	6
1.2 Definición del efecto fotoeléctrico.....	8
1.3 Historia del efecto fotoeléctrico .....	8
1.4 Teoría del Efecto fotoeléctrico.....	11
1.4.1 Efecto fotoeléctrico en semiconductores .....	15
1.4.2 Efecto fotoeléctrico en metales .....	16
1.5 Dualidad de la luz .....	16
Equipo de medición.....	17
2.1 Contenido del equipo.....	17
2.1.1 Dispositivo de efecto fotoeléctrico .....	17
2.1.2 Fototubo.....	21
2.1.3 Batería.....	23
2.1.4 Fuente luminosa.....	23
2.1.5 Filtros de colores .....	24
2.1.6 Aperturas.....	25
Instalación del equipo de medida .....	26
3.1 Montaje del dispositivo de medida.....	26
Experimentos y Resultados .....	27
4.1 Comprobación del efecto de la temperatura sobre el fototubo.....	27
4.1.1 Desarrollo teórico del experimento .....	27
4.2.2 Mediciones y obtención de resultados del experimento.....	27
4.2 Demostración del efecto fotoeléctrico .....	28
4.2.1 Desarrollo teórico del experimento .....	28
4.2.2 Mediciones y obtención de resultados del experimento.....	29
4.3 Cálculo de la Constante de Planck ( $h$ ) .....	31
4.3.1 Desarrollo del experimento .....	31
4.3.2 Porcentaje de error en el cálculo .....	33
4.4 Cálculo y representación de la energía cinética ( $E_c$ ) de los electrones y su velocidad $V$ , en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ).....	34
4.4.1 Cálculo y representación de la energía cinética ( $E_c$ ) en función de la longitud de onda ( $\lambda$ )	34

4.4.2	Cálculo y representación de la velocidad $V$ en función de la longitud de onda ( $\lambda$ )	35
4.5	Relación entre cantidad de iluminación e intensidad eléctrica generada .....	37
4.5.1	Desarrollo teórico del experimento .....	37
4.5.2	Mediciones y obtención de resultados del experimento.....	38
4.6	El voltaje de frenado no depende de la intensidad de iluminación.....	41
4.6.1	Desarrollo teórico del experimento .....	41
4.6.2	Mediciones y obtención de resultados del experimento.....	43
4.7	Distribución de energías de los electrones liberados .....	45
4.7.1	Desarrollo teórico del experimento .....	45
4.7.2	Mediciones y obtención de resultados del experimento.....	45
Conclusiones .....		58
5.1	Demostración del efecto fotoeléctrico .....	58
5.2	Cálculo de la Constante de Planck ( $h$ ) .....	58
5.3	Cálculo y representación de la energía cinética ( $E_c$ ) de los electrones y su velocidad $V$ en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ) .....	59
5.4	Relación entre cantidad de iluminación e intensidad eléctrica generada .....	59
5.5	El voltaje de frenado no depende de la intensidad de iluminación.....	60
5.6	Distribución de energías de los electrones liberados .....	60
5.7	Dualidad de la luz (onda o partícula).....	60
Bibliografía .....		62

# Capítulo 1

## Introducción

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio del denominado “Efecto Fotoeléctrico”, consistente en la generación de una intensidad eléctrica a partir de la incidencia de luz sobre una superficie metálica o semiconductor, Este fenómeno es el que se produce en los fotodetectores de comunicaciones ópticas con el fin de transformar la luz que se recibe por las fibras ópticas (fotones) en una señal eléctrica de información (electrones). En este trabajo, se analizará el efecto fotoeléctrico mediante un dispositivo comercial de medición de dicho fenómeno y diversos experimentos realizados con el mismo.

El dispositivo cuenta con un fototubo necesario para generar la transformación de fotones en electrones, así como un conjunto de filtros de colores a diferentes frecuencias (diferentes longitudes de onda) para seleccionar varias fuentes de luz, Además, el aparato dispone de un conjunto de distintas aperturas con el fin de poder elegir otras tantas intensidades lumínicas sobre la superficie metálica del fototubo.

De esta manera, se estudiará, en detalle, la existencia del efecto fotoeléctrico dentro del dispositivo así como la relación entre la iluminación suministrada al fototubo (a diferentes longitudes de onda y amplitudes) y la fotocorriente generada. Además, se realizará el cálculo de la constante de Planck, se demostrará la relación lineal existente entre la energía del fotón y la frecuencia, y realizaremos un análisis de la distribución de la energía de los electrones generados en el fototubo.

### 1.1 Fotodetectores ópticos

Como ya se ha mencionado, el objetivo de este Trabajo Fin de Grado es demostrar el comportamiento que tiene la luz en un fotodetector de comunicaciones ópticas, es decir, el estudio del efecto fotoeléctrico en estos detectores ópticos.

Un fotodetector óptico es un dispositivo, formado por semiconductores, en el que se genera un flujo de corriente eléctrica cuando se detectan fotones (lo cual es el fundamento del efecto fotoeléctrico, que posteriormente se explicará). La función de estos dispositivos es transformar la señal óptica, que proviene de las fibras ópticas, en señal eléctrica. Además, se encargará de la demodulación de la señal óptica recibida para transformarla en una señal eléctrica que contendrá la información enviada por el transmisor en el extremo inicial de la fibra (denominada señal en banda base).

La intensidad de la luz en la fibra será la que nos marcará la amplitud de la salida de señal eléctrica que obtendremos en la recepción al realizar la conversión nombrada anteriormente. Esto se debe a que esta intensidad de la luz es proporcional a

la amplitud de la moduladora. Por tanto, no se necesitaría un bloque demodulador porque, como podemos ver, esta demodulación la llevaría a cabo el propio fotodetector.

El fotodetector será capaz de, a partir de la luz que le llega, transformar los fotones que la forman en electrones mediante un proceso conocido como absorción (Figura 1).

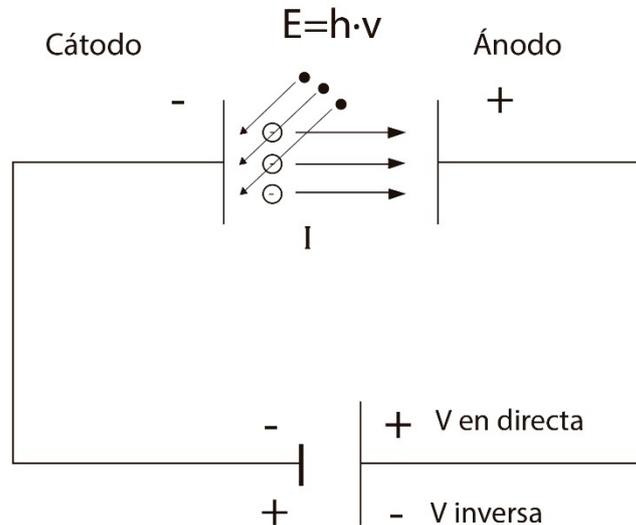


Figura 1: Esquema del proceso de absorción en fotodetectores. Fuente: Elaboración propia.

Este proceso de absorción se producirá en la zona activa de la llamada unión P-N que, en este caso, se encontrará polarizada en inversa. Para que esta absorción tenga lugar, es necesario que los fotones se encuentren (impacten) con electrones fijos (aquéllos que se encuentran orbitando alrededor del núcleo de los átomos que conforman el material) y no libres. Si tuviéramos una mayoría de electrones libres, se podrían generar fotones, lo cual no se desea, mientras que si tenemos una mayoría de electrones fijos, entonces los fotones chocarían contra ellos, haciendo que se liberen. Esta situación es la que se propicia en la zona activa del fotodetector mediante la polarización en inversa de la unión P-N.

Nos interesa trabajar con fotodetectores ópticos lo más eficientes posibles y, para medir este parámetro, utilizamos la llamada responsividad. La responsividad se define como la relación entre la intensidad eléctrica media generada y la potencia óptica media incidente.

Dentro de las comunicaciones ópticas, tenemos dos tipos de fotodetectores. En primer lugar, el fotodetector PIN que, en el mejor de los casos, generará un electrón libre por cada fotón incidente. Posteriormente se buscó la posibilidad de que ante un fotón, se diera lugar a más de un electrón y se consiguió con una polarización inversa mayor, dando lugar a los denominados fotodetectores APD o de avalancha.

Haciendo una comparación entre los dos tipos de detectores ópticos, podemos ver que los APD tiene una sensibilidad mayor que los PIN, ya que será capaz de detectar bien una señal con pocos fotones y amplificar la señal eléctrica generada. Por otro lado, los APD serán más complejos y más caros que los PIN. Además, necesitan una temperatura de funcionamiento estable, tienen un menor ancho de banda debido al

proceso de avalancha que tiene lugar en su interior y son más lentos en la fotodetección que los PIN [1].

## **1.2 Definición del efecto fotoeléctrico**

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno, presente en los fotodetectores de comunicaciones ópticas, según el cual, cuando hacemos incidir una luz de determinada frecuencia sobre un metal o un semiconductor, éste liberará electrones de su superficie, dando lugar a una corriente eléctrica.

Este fenómeno se producirá debido a que los fotones, partículas que componen la luz, al impactar con los electrones, les dotarán de la energía suficiente para ascender hasta la superficie del metal o el semiconductor. Una vez allí, con esta misma energía, se liberarán de la atracción electrostática que realiza la superficie metálica o semiconductor sobre ellos para, finalmente, producir la corriente o intensidad que nombrábamos anteriormente. [1]

## **1.3 Historia del efecto fotoeléctrico**

En 1887, H. Hertz (Figura 2) realizaba diversos experimentos con un detector formado por una espira abierta que emitía una chispa cuando recibía ondas. Uno de estos experimentos consistía en provocar una chispa con una bobina de inducción y detectar los efectos de la radiación electromagnética emitida observando la existencia de otra chispa entre las puntas de un alambre enrollado en forma de círculo y a cierta distancia del emisor (espira). Para observar mejor la pequeña chispa en el receptor, Hertz solía usar una cubierta oscura. Al hacerlo, notó que la chispa cambiaba de longitud y, bajo ciertas condiciones, incluso desaparecía. Esto le permitió concluir que la luz proveniente de la chispa emisora era la causante de este extraño fenómeno. De hecho, con un prisma, descompuso la luz del emisor y descubrió que la chispa en el emisor era más intensa al ser expuesta a la luz ultravioleta. A partir de este estudio, se comprobó que la espira chispeaba más intensamente cuando le llegaba luz situada en la banda de frecuencias ultravioleta.



Figura 2: H. Hertz. Fuente: Wikipedia.

Un año después, W. Hallwachs, un estudiante de H. Hertz, repitió el experimento de forma más simple. Notó que al incidir luz ultravioleta sobre una placa de zinc cargada negativamente, ésta se descargaba rápidamente, mientras que, si la placa estaba cargada positivamente, la descarga no se producía. También observó que si la placa inicialmente estaba sin carga, ésta adquiría carga positiva. Probó a realizar los mismos pasos con luz visible y, en este caso, el efecto descrito anteriormente no se llegaba a producir. A pesar de realizar todas estas aclaraciones acerca del efecto, no propuso explicaciones teóricas o de las posibles causas de estos hechos.

En 1889, J. Elster y H. Geitel descubrieron que, en algunos metales alcalinos, este efecto sí que se producía con luz visible. Además, notaron que el número de partículas emitidas, que posteriormente se sabrían que eran electrones, era directamente proporcional a la intensidad que tenía la luz ultravioleta.

Más de una década después, en 1900, J. J. Thomson logró identificar las partículas emitidas con algo similar a un tubo de rayos catódicos. Utilizó un tubo de vacío, donde colocó dos láminas metálicas situadas una en frente de la otra (cátodo y ánodo). En lugar de poner un voltaje alto entre los electrodos, hizo incidir la luz sobre el cátodo, determinando así que las partículas que se emitían tenían la misma relación carga-masa que los rayos catódicos y, por lo tanto, eran electrones. Por este y otros trabajos, J. J. Thomson recibió el premio Nobel en 1906.

En 1902, P. Von Lenard, haciendo uso de un equipo muy similar al de J.J.Thomson, estudió cómo variaba la energía de salida de los electrones al variar la intensidad. Cargando una de las placas negativamente, agregó un potencial que tenía la función de oponerse al movimiento de los electrones fotoemitidos, el llamado potencial de frenado, cuyo valor umbral es la energía cinética máxima de los electrones generados. Descubrió que esta energía máxima de salida de los electrones era un valor fijo que no dependía de la intensidad de la luz, sino que dependía del color de la luz, es decir, de su longitud de onda o frecuencia. Esta energía aumentaba según aumentaba la frecuencia y, por lo tanto, disminuía según aumentaba la longitud de onda. En 1905, P. Von Lenard también recibió el premio Nobel por su trabajo en este campo.

Sin embargo, no fue hasta 1905, que A. Einstein, basándose en todos los estudios desarrollados anteriormente, explicó totalmente el denominado efecto fotoeléctrico, postulando que la luz no interactuaba con la materia en forma de un flujo continuo, sino en cuantos de energía, hoy llamados fotones. La energía de estos sería proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética. Además, con este estudio, se planteó la dualidad en el comportamiento de la luz como onda y partícula a la vez. Este año, A. Einstein publicó cinco artículos, a cual más extraordinario (por lo que fue llamado el año milagroso), y entre los que estaba el titulado “*Punto de vista heurístico concerniente a la emisión y la transformación de la luz*”, en el que explicaba el efecto fotoeléctrico. Al contradecir la idea de que la luz era solamente una onda y postular la naturaleza dual de la luz, al comportarse como partícula y onda, Einstein contribuyó a fundar la mecánica cuántica y a poner las bases, con el efecto fotoeléctrico, para varias tecnologías modernas [2]. Todo su estudio le hizo ganar el premio Nobel en 1921 (Figura 3).

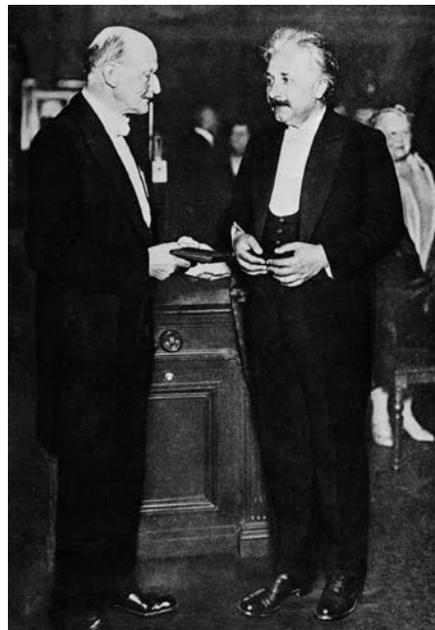


Figura 3: A.Einstein recibiendo el Premio Nobel de Física 1921. Fuente: <https://cuentos-cuanticos.com/2012/12/18/el-premio-nobel-concedido-a-einstein/>

Hubo numerosos científicos que se pusieron en contra de todo lo desarrollado por Einstein, pero no pudieron demostrar que esta teoría era incorrecta.

En 1912, Arthur Lewelyn Hughes, Owes William Richardson y Karl Taylor Compton demostraron experimentalmente el crecimiento lineal con la frecuencia de la energía cinética de los electrones fotoemitidos. Pero fue Robert Andrews Millikan quien midió, en 1916, tanto la frecuencia de la luz como la energía de los electrones emitidos, y obtuvo un valor de la constante de Planck en buen acuerdo con el obtenido en experimentos de radiación de cuerpo negro realizados posteriormente, y que darían el valor de la constante con el que trabajamos actualmente.

Karl Taylor Compton fue el hermano mayor de Arthur Holly Compton, quien descubrió y explicó el efecto que lleva su nombre. Los resultados satisfactorios de los

estudios del efecto Compton terminaron por dejar por sentado el carácter corpuscular de la radiación electromagnética. Por su parte, K. T. Compton estuvo posteriormente involucrado en el proyecto de la bomba atómica.

Cabe resaltar que Millikan intentaba demostrar que la teoría de Einstein era incorrecta, ya que estaba a favor de la teoría de Maxwell y del carácter ondulatorio de la radiación electromagnética. Para ello, realizó una serie de experimentos en donde puso todo su ingenio y destreza experimental. No lo consiguió, pero pudo medir con mucha exactitud la constante de Planck, de forma que se le otorgó el premio Nobel de Física correspondiente al año de 1923 por sus contribuciones al entendimiento del efecto fotoeléctrico [3].

## 1.4 Teoría del Efecto fotoeléctrico

Para poder entender con claridad el efecto fotoeléctrico, vamos a partir de un circuito DC con una batería, un amperímetro y una resistencia, tal y como se muestra en la Figura 4.

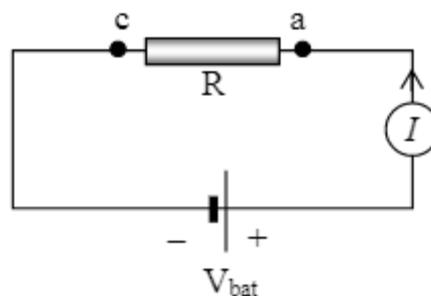


Figura 4: Esquema del circuito DC con amperímetro y resistencia. Fuente: [2].

El voltaje entre el cátodo y ánodo (“c” y “a” en la figura) de la resistencia será  $V_{bat}$ . Este voltaje puede ser positivo o negativo dándole la vuelta a la batería, y este hecho hace que la gráfica que relacione corriente y voltaje sea una recta, debido a la relación lineal en un circuito Óhmico.

A continuación, reemplazamos la resistencia por un tubo de vacío con una placa para el ánodo y otra para el cátodo, y calentamos esta última de alguna manera (Figura 5).

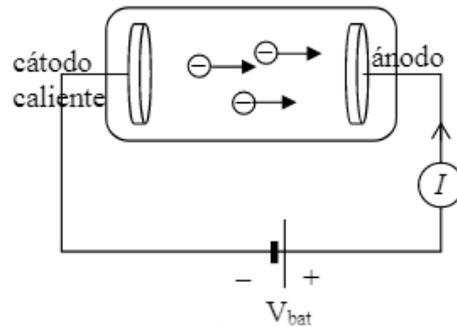


Figura 5: Esquema del circuito con tubo de vacío. Fuente: [2].

Debido a la alta temperatura del cátodo, algunos electrones de la superficie del metal adquieren energía suficiente para poder salir, formando una especie de nube de electrones junto al cátodo. A este fenómeno se le conoce como emisión termiónica.

También contaremos con una energía umbral, denominada función de trabajo ( $W$ ), que será la mínima energía que necesita absorber un electrón para liberarse del metal.

El efecto térmico libera electrones a distintas velocidades y a una tasa dada, de manera que, al aumentar la temperatura, se liberarán un mayor número de electrones y estos tendrán una mayor energía.

Al aplicar un voltaje positivo como el de la figura, aparecerá un campo eléctrico entre los electrodos que acelerará los electrones hacia el ánodo y establecerá una corriente en el circuito. Si se aumenta el voltaje, la corriente no variaría en gran medida, ya que está limitada por la tasa de emisión de electrones del cátodo.

Si trabajamos con un voltaje o tensión nulos ( $V=0$ ), los electrones siguen llegando hacia el ánodo, aunque de manera más lenta, y la corriente será aproximadamente igual.

Si aplicamos un voltaje o tensión negativos, el campo eléctrico frenará a los electrones que se desplazan hacia el ánodo provocando incluso que los que tienen una menor energía den la vuelta sin llegar al mismo. De esta manera, la corriente disminuirá. Si continuamos aumentando esta tensión negativa, llegará un punto en que ningún electrón consiga alcanzar el ánodo y, por lo tanto, la corriente será nula.

Por otro lado, debemos tener en cuenta que, al aumentar la temperatura, la corriente será también mayor debido a que aumentará la energía de los electrones y, por lo tanto, aumentará el nivel de voltaje negativo que debemos aplicar a nuestro circuito para que la corriente se anule (línea discontinua en le Figura 6).

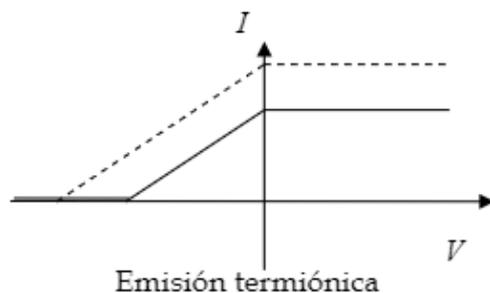


Figura 6: Relación Corriente-Voltaje. Fuente: [2].

A continuación, consideraremos el mismo estudio con un circuito similar pero, esta vez, en vez de calentar el cátodo, hacemos incidir una luz sobre él (Figura 7).

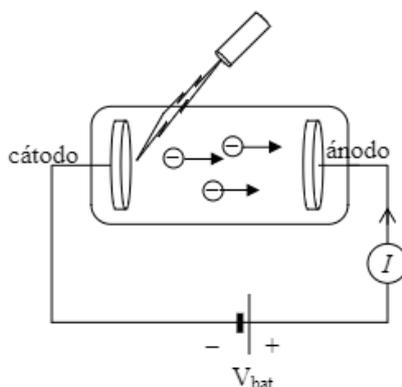


Figura 7: Esquema del circuito con tubo de vacío y luz incidente al cátodo. Fuente: [2].

Por tanto, estaríamos ante la misma situación que hemos visto anteriormente: llega energía al cátodo que arranca electrones y aparece una corriente que será mayor cuanto mayor sea la potencia lumínica incidente. Así mismo, también ocurrirá que, aplicando un voltaje inverso suficiente, la corriente se anulará, pero esta vez de forma más clara y definida que en el caso térmico.

Los principales cambios de este nuevo método serán que la emisión de electrones no ocurre si la frecuencia de la luz está por debajo de un cierto valor umbral, independientemente de la intensidad. Si la frecuencia está por encima de este valor, la emisión será inmediata y, además, al aplicar un voltaje inverso, el valor necesario para frenar la corriente ( $V_{\text{stop}}$  o  $V_0$ ) también será independiente de la intensidad de la luz, ya que sólo dependerá de la frecuencia de la misma (Figura 8).

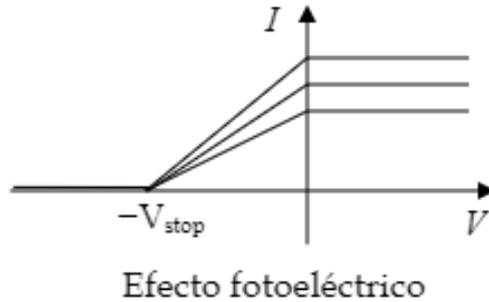


Figura 8: Relación Corriente-Voltaje en el efecto fotoeléctrico. Fuente: [2]

En la Figura 8, podemos observar la relación entre la corriente del circuito y el voltaje aplicado para diversas intensidades. Las curvas superiores corresponderán con los casos donde la intensidad de la luz sea mayor, pudiendo comprobar que, para cualquier valor de intensidad, obtenemos un valor constante de voltaje de frenado (este hecho se comprobó experimentalmente en el marco de este trabajo fin de grado, como más adelante se mostrará).

El valor de la frecuencia de radiación será fundamental, ya que de él depende el voltaje al que se hará nula la corriente. Este valor será diferente para cada material. Para explicar la importancia tan relevante del papel de la frecuencia, Einstein tomó una idea ya usada por Max Planck años atrás. Esta idea se basaba en que la radiación y la materia no se transfieren energía de forma continua, sino en cuantos, con un valor proporcional a la frecuencia de la onda:

$$E_f = h \cdot f \quad (1)$$

donde  $E_f$  es la energía de la onda electromagnética (en nuestro caso, de los fotones de la luz),  $h$  es la constante de Planck y  $f$  es la frecuencia de la onda. Einstein tomó esta propuesta y postuló que no sólo se trataba de unidades de transferencia de energía, sino de la cuantización de la propia luz. Estos cuantos tendrán la energía descrita anteriormente y su *momentum* será esta energía dividida entre la velocidad de la luz. Teniendo en cuenta esto y la función de trabajo de la que hablábamos anteriormente, podemos deducir el comportamiento del efecto fotoeléctrico.

Un haz de luz de frecuencia dada corresponde a un flujo de cuantos de luz, más conocidos como fotones, cada uno con una energía dependiente de la frecuencia. La intensidad de la luz dependerá de la cantidad de fotones que formen ésta.

Cuando este haz de luz incide sobre un metal o un semiconductor, el proceso de absorción de energía ocurre a nivel de cada fotón por cada electrón. Si la energía del fotón ( $E_f$ ) es suficiente, el electrón absorberá parte de la misma y la usará como energía potencial ( $E_i$ ) para salir del material, y el resto como energía cinética ( $E_c$ ):

$$E_f = h \cdot f = E_i + E_c \quad (2)$$

Los electrones menos unidos a las órbitas de los átomos que conforman el material saldrán con la máxima energía cinética de entre todos los electrones que se liberen. El voltaje de frenado se podrá definir como el voltaje que logra frenar al electrón más energético. Este voltaje sólo dependerá de la frecuencia de la luz, de manera proporcional, y, además, existe un valor finito (dependiente del material) de frecuencia de la luz para el cual este voltaje de frenado es cero (frecuencia umbral  $f_0$ ), es decir, los fotones no serán suficientemente enérgicos como para vencer la función de trabajo y liberar electrones. Esta frecuencia umbral también se halló, de manera experimental, para el caso del dispositivo utilizado, tal y como se mostrará posteriormente [2].

### 1.4.1 Efecto fotoeléctrico en semiconductores

Los semiconductores están, típicamente, formados por tres bandas energéticas: la banda de valencia, donde estarán los electrones que no están liberados y donde quedarán los llamados huecos (ausencias de electrones que suelen considerarse como partículas virtuales de igual carga que estos, pero positiva, y cuya densidad se representa con la letra p) cuando estos se liberen; la banda de conducción, donde ascenderán los electrones que han aumentado su energía y han sido liberados (cuya densidad se representa con la letra n). Y, por último, la banda prohibida, que no puede ser ocupada por electrones, y cuyo margen energético deberán superar los electrones para poder liberarse hasta la banda de conducción.

Un ejemplo de semiconductor es el silicio, que presenta cuatro electrones en sus últimas capas y enlaces covalentes con los electrones de los átomos vecinos.

Los electrones, inicialmente, y típicamente a bajas temperaturas, estarán orbitando con una energía situada en la banda de valencia. Cuando aumentan su energía, se podrán liberar de la banda de valencia, dejando un hueco en ella, y ascendiendo a la banda de conducción, tal y como se observa en la Figura 9.

Los electrones pueden aumentar su energía para liberarse debido al efecto de la temperatura o al choque de fotones, los cuales les darán su energía y, al liberarse, los electrones generarán una pequeña corriente o intensidad [1].

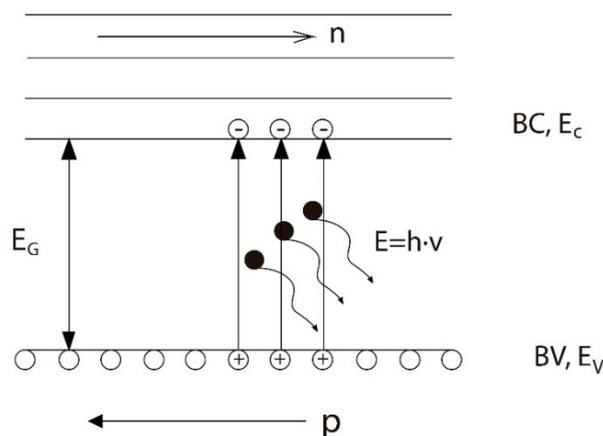


Figura 9: Esquema del diagrama de bandas energéticas en semiconductores. Fuente: Elaboración Propia.

### 1.4.2 Efecto fotoeléctrico en metales

Cabe resaltar que, en el contexto de este trabajo, nos interesa conocer cómo funciona el efecto fotoeléctrico en metales, ya que el dispositivo de medición de este fenómeno con el que vamos a realizar los experimentos dispone de una superficie de metal.

En este caso, a diferencia de los semiconductores, en los metales no tendremos banda prohibida, sino que tan sólo tendremos banda de conducción y banda de valencia por lo que los electrones pasarán directamente de una a otra cuando se liberen, generando también la corriente o intensidad de la que hablábamos anteriormente (Figura 10) [1].

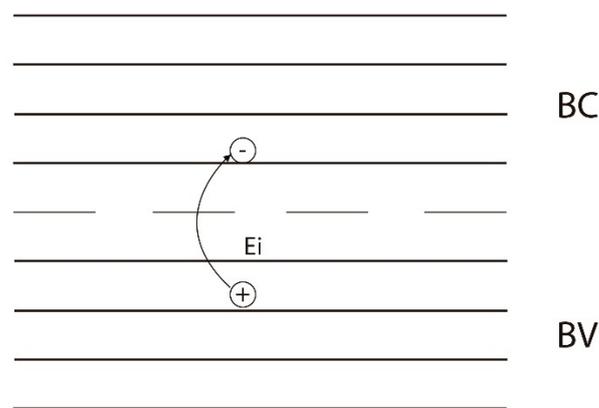


Figura 10: Esquema del diagrama de bandas energéticas en metales. Fuente: Elaboración Propia.

## 1.5 Dualidad de la luz

Antes de Einstein, se conocía la teoría corpuscular (partículas materiales) de la luz propuesta por Newton y la teoría ondulatoria postulada por Huygens. Una vez realizados los diversos estudios de Einstein, la luz se empezó a entender como una partícula y una onda a la vez. Es decir, la luz estaría formada por partículas de energía discretas pero, al mismo tiempo, albergaría propiedades de onda. Según Einstein, la luz, por tanto, consistiría en una dualidad onda-partícula, mostrando ambos comportamientos en función del experimento al que fuera sometida.

Apenas en 1900, Max Planck había sugerido que la materia era una discontinuidad de la energía, al indicar la existencia de cantidades discretas conocidas como cuantos de energía. Sin embargo, a la luz se le consideraba teóricamente como una onda electromagnética que oscilaba suavemente. Con la propuesta de Einstein, fueron unificadas las diversas teorías al demostrar que los cuantos de luz, también llamados partículas de energía, podían explicar los fenómenos teórica y experimentalmente [4].

## Capítulo 2

# Equipo de medición

### 2.1 Contenido del equipo

En este trabajo, se ha utilizado un equipo de medición del efecto fotoeléctrico de la marca Ventus Experimental, (Figura 11) que constará de las partes explicadas con detalle a continuación [5].

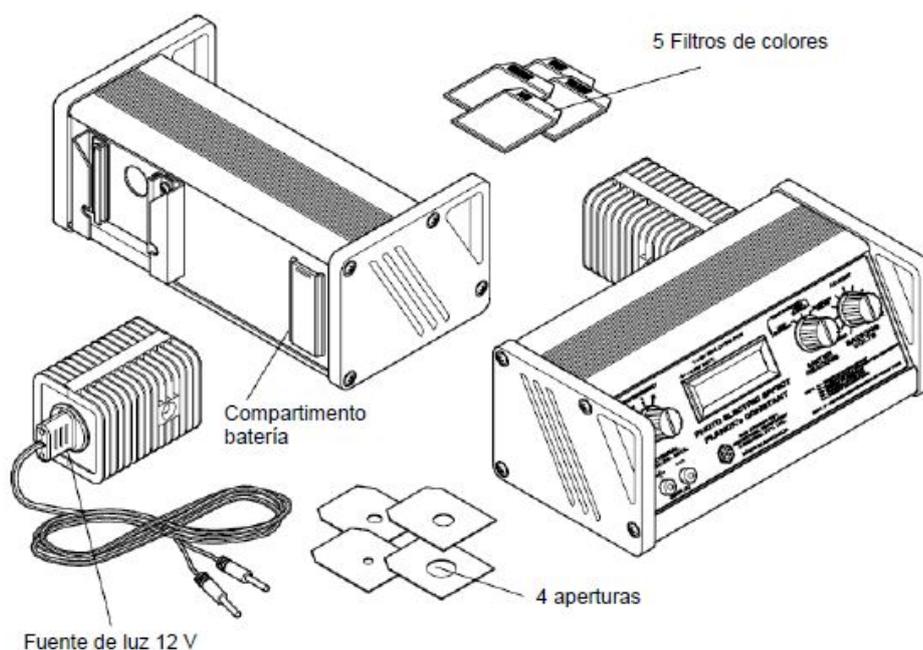


Figura 11: Dibujo esquemático del equipo a trabajar. Fuente: [5].

#### 2.1.1 Dispositivo de efecto fotoeléctrico

La unidad fotoeléctrica con la que se han realizado las medidas es un instrumento de sobremesa con un medidor digital que nos indicará tanto la corriente que atraviesa el fototubo como la tensión aplicada al mismo (Figura 12).

Sus dimensiones son 272 mm de largo, 160 mm de ancho y 110 mm de alto, con un peso de 1.3 kg con todos los componentes debidamente acoplados.

El dispositivo dispone de un compartimento trasero donde se almacenan tantos los filtros de colores como las diferentes aperturas a utilizar (Figura 13).

Además, presenta un acoplamiento para la fuente de luz luminosa necesaria para los experimentos.

En todo momento, el dispositivo llevará acoplado un obturador que permite que la luz incida directamente sobre el fototubo. Este obturador se puede retirar para poder ver el cátodo y el ánodo de manera completa.

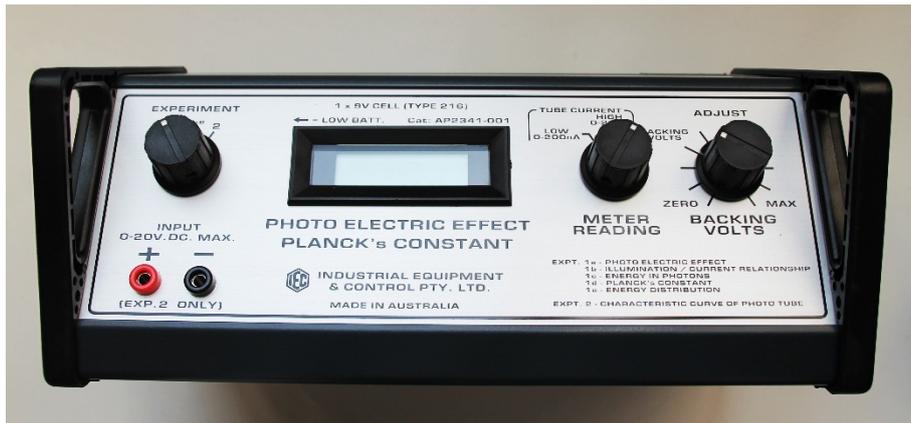


Figura 12: Parte delantera del dispositivo de medición del efecto fotoeléctrico. Fuente: Elaboración Propia.



Figura 13: Parte trasera del dispositivo de medición del efecto fotoeléctrico. Fuente: Elaboración Propia.

Esta unidad consta de varias partes explicadas a continuación.

### ***Conmutador rotatorio “Experiment”***

Es un conmutador situado a la izquierda del medidor digital con tres posiciones, para encender o apagar el dispositivo y para seleccionar el tipo de experimento a realizar (Figura 14).

La primera posición corresponde al estado ON/OFF de la alimentación del dispositivo, y sirve para apagar o encender el mismo.

La segunda posición corresponde al Experimento 1, que nos permitirá medir el efecto fotoeléctrico, es decir, la iluminación y relación de corriente, y así poder hallar la energía del fotón, la constante de Planck y la distribución de energías.

La tercera y última posición nos permite trabajar con un voltaje externo en lugar del propio del dispositivo.



Figura 14: Conmutador rotatorio "Experiment". Fuente: Elaboración Propia.

### ***Conmutador rotatorio "Meter Reading"***

Es un conmutador situado a la derecha del medidor digital, con tres posiciones para leer corrientes y voltajes (Figura 15).

La primera posición posibilita que el medidor digital pueda detectar corrientes muy pequeñas a través del fototubo (0-200 nA). El límite inferior que puede indicar es 0.1 nA.

La segunda posición propicia que en el medidor digital se puedan leer corrientes mayores a través del fototubo (0-20  $\mu$ A). El límite inferior que puede indicar es 0.01  $\mu$ A.

La tercera y última posición tiene como objetivo que el medidor digital ofrezca la lectura del voltaje de frenado aplicado al tubo en el Experimento 1. Este voltaje será ajustable, de 0 a -1.8 V, mediante un mando rotatorio que se explicará a continuación. En caso de aplicar un voltaje externo, esta posición del conmutador medirá el valor del mismo, pudiendo ir de 0 a 20 V.



Figura 15: Conmutador rotatorio "Meter Reading". Fuente: Elaboración Propia.

### ***Mando rotatorio "Adjust Backing Volts"***

Este mando rotatorio servirá para ajustar el voltaje de frenado que vamos a aplicar al fototubo en el Experimento 1, con un margen de 0 a -1.8 V (Figura 16). La funcionalidad de este mando rotatorio es ir aumentando el voltaje inverso aplicado a nuestro fototubo, de manera que llegue un punto en el que este voltaje anule por completo la corriente que pasa a través del fototubo. Esto nos permitirá determinar el voltaje de frenado que necesitaremos aplicar, dependiendo de la luz que incida.



Figura 16: Mando rotatorio "Adjust Backing Volts". Fuente: Elaboración Propia.

### ***Bornes "External"***

Estos bornes de 4 mm permiten conectar un voltaje externo, siempre que no supere los 20 V (DC), y se utilizarán únicamente en el denominado Experimento 2 (Figura 17).



Figura 17: Bornes "External". Fuente: Elaboración Propia.

### **Medidor**

Se trata de un medidor digital, que será el que realizará las medidas (Figura 18).

Para el Experimento 1, indicará bien el flujo de corriente a través del fototubo (entre 0 y 200 nA o entre 0 y 20  $\mu$ A), o bien el voltaje de frenado aplicado al tubo (entre 0 y -1.8 V).

Si introducimos un voltaje externo, indicará el flujo de corriente, entre 0 y 20  $\mu$ A, o los voltajes directos ajustables, entre 0 y 20 V.

Las mediciones que realice, y en qué experimento las realice (si trabajamos con el voltaje del dispositivo o trabajamos con un voltaje externo), se podrán seleccionar mediante los conmutadores explicados con anterioridad.

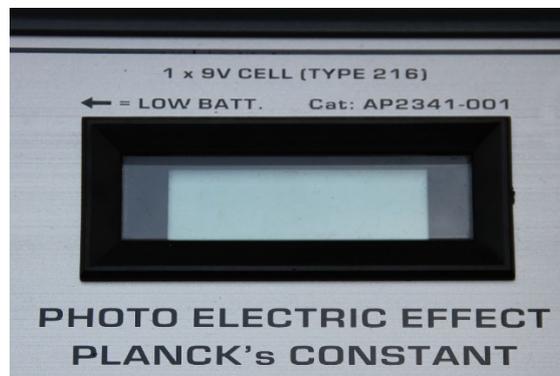


Figura 18: Display o medidor digital. Fuente: Elaboración Propia.

### **2.1.2 Fototubo**

El fototubo es un tubo de vidrio al que se le ha realizado un vacío y en cuyo interior contiene un electrodo con forma de medio cilindro. En la boca abierta de este electrodo, se encuentra otro electrodo, con forma de varilla rectilínea, aproximadamente en el foco de la superficie curvada (Figura 19).

Es la parte fundamental del dispositivo, y está formado por dos partes: el cátodo y el ánodo.

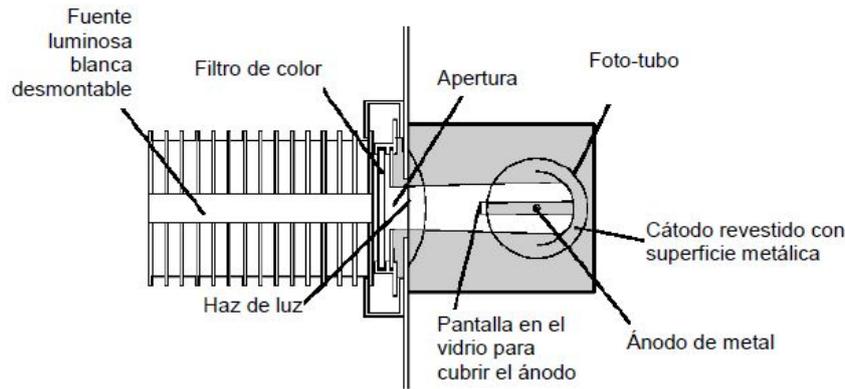


Figura 19: Esquema de la estructura del fototubo. Fuente: [5].

### ***Ánodo***

El ánodo es una varilla de metal, situada delante del cátodo, a la que los electrones fluyen, y que estará iluminada, al igual que el cátodo, cuando la luz entre en el dispositivo (Figura 19).

Este bombardeo con fotones hace que la superficie metálica de la varilla del ánodo libere algunos electrones, provocando un efecto fotoeléctrico no deseado que puede influir levemente en los resultados obtenidos en los diversos experimentos a realizar, incluyendo cierto error (tal y como se indicará, más adelante, en la interpretación de algunos resultados de los experimentos).

Este efecto fotoeléctrico no deseado se debe a que la luz que incide sobre el fototubo se refleja tanto en la ampolla de vidrio que recubre al cátodo y al ánodo, como sobre la misma superficie del cátodo curvado. Estas reflexiones llegan hacia la varilla del ánodo, provocando la liberación de electrones no deseada.

Las consecuencias de este efecto pueden interferir de manera perjudicial en el paso normal de electrones desde la superficie del cátodo hasta el ánodo y producir los errores de los que hemos hablado anteriormente, los cuales afectarían principalmente a la medición del voltaje de frenado exacto que se precisará para parar el flujo de electrones desde el cátodo hasta el ánodo.

Nos interesa evitar o reducir en la medida de lo posible esta emisión, minimizando así el error que se pudiera provocar en las medidas. Para reducir este error, se instala en la ampolla de vidrio del fototubo una pantalla para proteger a la varilla del ánodo de la luz directa. Esto hace que se minimice el error, pero nunca se anularía por completo, ya que las reflexiones dentro del tubo no pueden ser evitadas fácilmente.

### ***Cátodo***

El cátodo es la superficie curvada del cilindro, que estará revestida con un componente especial. Este componente será Cesio sobre Óxido de Plata (en este caso es un material metálico), que facilita la liberación de electrones al incidir la luz (Figura 20).

El proceso de liberación de electrones ocurre cuando la luz incide sobre la superficie metálica y la energía que contienen los fotones se transmite a los electrones. Estos electrones primero subirán a la superficie del material del cátodo, posteriormente, deberán contrarrestar la tendencia a permanecer en la superficie y, finalmente, deberán salir de la superficie para viajar por el vacío hacia la varilla del ánodo.

Mientras la luz incide sobre el cátodo, el proceso explicado anteriormente se produce miles de millones de veces por segundo, de manera que una corriente muy pequeña está fluyendo constantemente entre el cátodo y el ánodo.

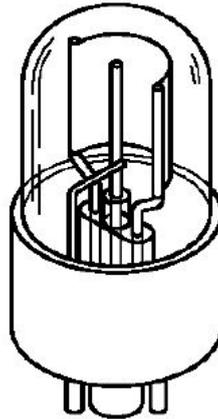


Figura 20: Esquema de la estructura del cátodo y el ánodo. Fuente: [5].

### 2.1.3 Batería

La batería será una pila de 9 V, imprescindible para el funcionamiento del dispositivo. Se acoplará en la parte trasera del equipo, en un pequeño soporte o compartimento.

El consumo de esta batería será muy pequeño y, una vez gastada, habrá que sustituirla para el funcionamiento del dispositivo.

Cuando el voltaje de esta pila llegue a los 7 V, en el medidor digital aparecerá un aviso “LO BAT” y una flecha indicando el lado izquierdo donde estará instalada la batería. Este aviso indicará la necesaria sustitución de la pila.

### 2.1.4 Fuente luminosa

La fuente luminosa será una lámpara de 12 V (CA o CC) y 2 A (Figura 21). Funcionará con bombillas con dos pines, de 25 a 30 W, y Cat: PA2043-004.

Será un sencillo filamento incandescente y, por ello, no tiene una componente de longitud de onda muy corta, es decir, no hay un alto contenido de las frecuencias del azul o el violeta. Esto afectará levemente a las medidas realizadas, ya que no se trata de una luz perfectamente blanca, sino algo amarillenta.

Su instalación se llevará a cabo en la parte trasera del dispositivo, entre dos rieles en los que encajará perfectamente el grueso acolchado que recubre la lente de plástico de la fuente. De esta manera, la fuente se posicionará alineada al fototubo.

Cuando se conecte a la corriente, emitirá la luz que será captada por la lente de plástico y la dirigirá a la cara activa del fototubo.



**Figura 21: Fuente luminosa. Fuente: Elaboración Propia.**

Con el funcionamiento, esta fuente de luz, se calentará, y, por ello, no se recomienda dejarla encendida durante largos periodos de tiempo o sin ser controlada, ya que se pueden producir sobrecalentamientos. Este aumento de temperatura podría tener consecuencias en los resultados obtenidos, ya que, teóricamente, un aumento de la temperatura en las inmediaciones del fototubo aumentaría la liberación de electrones. Por este motivo, el dispositivo está preparado para que estas variaciones de temperaturas no afecten en las medidas obtenidas.

Es muy importante que a la hora de realizar los experimentos no llegue al fototubo otra luz que no sea la que ha atravesado el filtro previamente y que la fuente esté correctamente acoplada para que sólo interfiera la luz que esta emite.

Retirando la fuente de luz incandescente, pueden utilizarse otras fuentes luminosas, como una lámpara de vapor de mercurio o fuentes de luz monocromáticas que emitan a longitudes de onda conocidas. Al sustituir la fuente luminosa proporcionada, lo único que debemos tener en cuenta sería tapar con un paño o trapo opaco la superficie entre el nuevo foco de luz y el fototubo para evitar que influya otra luz externa.

### **2.1.5 Filtros de colores**

El equipo consta de cinco filtros de colores calibrados en longitud de onda, en nm, con los que realizar los experimentos. Se colocarán en unos rieles de la parte trasera del dispositivo.

Serán un filtro azul de 428 nm, un filtro verde de 460 nm, un filtro amarillo de 492 nm, un filtro naranja de 530 nm y un filtro rojo de 590 nm (Figura 22).



Figura 22: Filtros de colores a diferentes longitudes de onda. Fuente: Elaboración Propia.

Estos filtros, colocados en la trayectoria de la luz, eliminan todas las longitudes de onda por debajo de un valor determinado. De esta manera, conoceremos el valor de la frecuencia máxima de la luz que alcanza al fototubo, siéndonos esto muy útil a la hora de trabajar con la constante de Planck y la energía de los fotones.

### 2.1.6 Aperturas

El equipo consta de cuatro aperturas, útiles a la hora de ajustar la cantidad de luz de la fuente luminosa que queremos hacer llegar al fototubo (Figura 23).

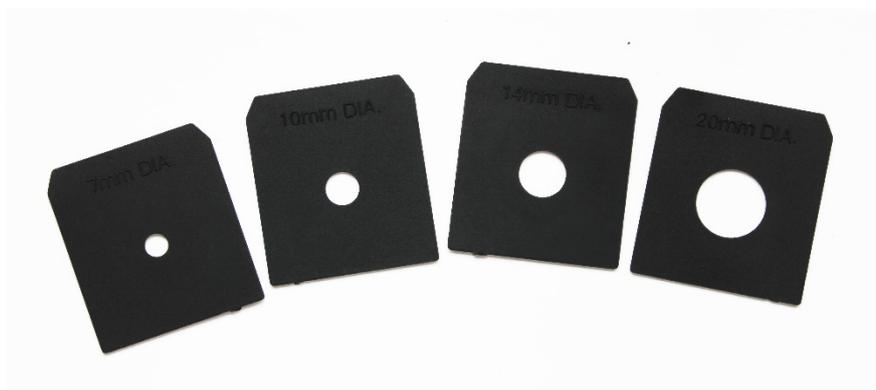


Figura 23: Aperturas a diferentes diámetros. Fuente: Elaboración Propia

Estas aperturas serán de un diámetro de 7 mm, 10 mm, 14 mm y 20 mm.

Se instalarán en la parte trasera del dispositivo, en unos rieles, de la misma manera que los filtros de colores.

## Capítulo 3

# Instalación del equipo de medida

### 3.1 Montaje del dispositivo de medida

Para comenzar a utilizar el dispositivo de medida, debemos situar la batería, o pila de 9V, en el compartimento de la parte trasera izquierda del dispositivo.

Una vez situada la batería, podemos encender el equipo como se ha explicado con anterioridad, comprobando que no aparece el mensaje de batería baja, y que hay un correcto funcionamiento del aparato. En el conmutador rotatorio “Experiment” de la parte izquierda, seleccionamos la posición número dos, que corresponde con el – denominado por el dispositivo- Experimento 1. Seleccionamos este experimento ya que, en nuestro caso, para las mediciones que queremos realizar y las relaciones que queremos obtener, nos interesa trabajar con el voltaje propio del dispositivo, y no con un voltaje externo.

Dentro de este experimento, se podrán tomar medidas de la intensidad y del voltaje, que nos permitirán hallar las relaciones en las que estamos interesados y así poder explicar con detalle la iluminación y relación de corriente, la energía de los fotones, la constante de Planck y la distribución de energías; es decir, realizar un estudio completo del efecto fotoeléctrico.

Todas estas medidas pueden ser tomadas para los diferentes filtros de colores y las aperturas, y siempre las realizaremos con la utilización y el control (para evitar sobrecalentamientos) de la fuente de luz de 12 V que acompaña a nuestro dispositivo.

Para la instalación de estos tres elementos, iremos a la parte trasera derecha del equipo, y allí encontraremos tres ranuras, de fuera hacia dentro: la primera para el acople de la fuente de luz y, las otras dos, para los filtros de colores (la ranura más ancha) y las aperturas (la más estrecha).

En todo momento, tendremos acoplado el foco para poder tomar las medidas y, dependiendo de los datos que queramos obtener en cada momento, situaremos los filtros de colores o los diferentes tamaños de aperturas.

Una vez que todos los componentes del equipo estén debidamente acoplados al dispositivo, podemos empezar a realizar medidas, variando tanto la intensidad como el voltaje, con el otro conmutador “Meter Reading” y el mando rotatorio “Adjust Backing Volts”, explicados anteriormente.

## Capítulo 4

# Experimentos y Resultados

### 4.1 Comprobación del efecto de la temperatura sobre el fototubo

#### 4.1.1 Desarrollo teórico del experimento

Teóricamente, sabemos que, con un aumento de la temperatura del metal, el número de electrones que se liberen debería ser mayor. Esto se debe a que, con el aumento de la temperatura, aumenta la energía de los electrones que componen el metal. A veces, este aumento de energía es suficiente para que algunos electrones asciendan a la superficie metálica y sean liberados.

A nuestro dispositivo no debería afectarle este efecto, ya que, como se comentó anteriormente, está debidamente preparado para ser inmune a los cambios de temperatura, debido a que el foco, en ocasiones, puede calentarse, y esto afectaría directamente a las medidas obtenidas por el dispositivo. Sin embargo, antes de comenzar con los experimentos objeto de este trabajo, se decidió comprobar esta hipótesis.

#### 4.2.2 Mediciones y obtención de resultados del experimento

Para poder comprobar si la inmunidad a variaciones de temperatura de nuestro dispositivo es real, cubrimos, primeramente, el orificio por el cual entra luz al fototubo para que así la corriente generada fuera 0 A y ninguna luz exterior interfiriera en las medidas. A continuación, quisimos provocar un aumento de temperatura en el fototubo y, para ello, nos ayudamos de un objeto que proporcionara el calor suficiente como para que nuestro fototubo se calentara. En nuestro caso, hicimos uso de un generador de aire caliente y le aplicamos calor al fototubo durante un minuto, aproximadamente, de manera que pudimos comprobar, a través del tacto, que el fototubo había aumentado su temperatura. Sin embargo, en el medidor digital pudimos comprobar que la intensidad generada siguió siendo de 0 A. Por tanto, de esta manera, se comprobó el aislamiento térmico del fototubo.

Este aislamiento nos protegerá de variaciones de los resultados no deseadas por la liberación de electrones a causa del efecto de la temperatura.

## 4.2 Demostración del efecto fotoeléctrico

### 4.2.1 Desarrollo teórico del experimento

En este primer experimento, tenemos como objetivo demostrar la existencia del efecto fotoeléctrico explicado anteriormente.

Teóricamente, los fotones de luz inciden sobre las superficies metálicas haciendo que cada fotón transmita su energía a un electrón, y será entonces cuando el electrón tenga energía suficiente para ser liberado de esa superficie. Parte de la energía se utiliza para elevar el electrón a la superficie del metal y, posteriormente, esta energía se utilizará para soltar al electrón de la atracción electrostática que ejerce la superficie sobre el mismo y así permitir su liberación por completo. La energía restante moverá al electrón del cátodo hasta el ánodo (energía cinética).

Para demostrar la existencia de este fenómeno, instalaremos nuestro equipo de medición haciéndole incidir sobre el fototubo la luz de la fuente luminosa, de manera que se debería crear una corriente o intensidad generada por el flujo de electrones liberados entre el cátodo y el ánodo.

Los pasos a seguir serán la instalación del dispositivo acorde a lo ya explicado en el Capítulo 3 con la fuente de luz debidamente acoplada y encendida. Encendemos el dispositivo de medición y situamos el conmutador rotatorio “Experiment” en la posición dos. Nos aseguraremos de que el mando rotatorio “Adjust Backing Volts” está girado completamente en el sentido contrario de las agujas del reloj, es decir, de que no estamos introduciendo voltaje de frenado, para así obtener en la medición la corriente total que se está generando. Así mismo, situaremos el conmutador rotatorio “Meter Reading” en la posición dos con el fin de medir corrientes del fototubo elevadas (del orden de  $\mu\text{A}$ ).

Una vez medida la corriente, podemos ver el voltaje de frenado necesario para parar el flujo de electrones del cátodo al ánodo, es decir, la tensión inversa que necesitamos aplicar para que los electrones dejen de liberarse. Esto es debido a la imposibilidad de los electrones situados en el cátodo de moverse hacia el ánodo y, por lo tanto, la imposibilidad de generar el movimiento que provoca la corriente medida por nuestro dispositivo. Para realizar la medida, cambiaríamos el conmutador “Meter Reading” a la posición uno, para así medir corrientes pequeñas (del orden de nA) y asegurarnos que se ha detenido por completo el flujo de electrones que la genera. Para obtener este valor, debemos rotar el mando giratorio “Adjust Backing Volts” en el sentido de las agujas del reloj hasta que la corriente mostrada en el medidor digital sea de 0.0 nA y, a continuación, cambiar el conmutador rotatorio “Meter Reading” a la posición número tres, la cual mide el voltaje. Si seguimos aumentando este voltaje de frenado que aplicamos, la corriente comenzará a fluir hacia atrás, es decir, los electrones irían del ánodo al cátodo, por lo que obtendríamos un valor de intensidad negativo.

De esta manera, estaríamos midiendo la corriente generada y comprobando la existencia del efecto fotoeléctrico en nuestro fototubo.

Antes de comenzar con las medidas, debemos tener en cuenta que, en el manual de utilización del equipo de medición, nos aconsejan tomar los valores varias veces y hacer un promedio de los mismos. Esto tiene como fin minimizar los efectos no deseados que producen las reflexiones de luz que llegan directamente hasta el ánodo.

#### 4.2.2 Mediciones y obtención de resultados del experimento

Con las directrices teóricas vistas anteriormente, vamos a comprobar la existencia del efecto fotoeléctrico para cada uno de los filtros de color.

Tendremos en total cinco filtros. El azul con longitud de onda de 432 nm, el verde con 471 nm, el amarillo con 501 nm, el naranja con 522 nm y el rojo con 582 nm. A partir de estos valores de longitud de onda ( $\lambda$ ) y con la siguiente fórmula, podemos hallar la frecuencia ( $f$ ) para cada color, sabiendo que la constante de la velocidad de la luz en el vacío ( $c$ ), tiene un valor de  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Situando cada uno de los filtros de colores en los correspondientes rieles de la parte trasera derecha del dispositivo, podemos medir tanto la intensidad generada por el flujo de electrones liberado por la luz como el voltaje de frenado necesario para frenarla. Ambos valores han sido tomados siete veces y se ha realizado un promedio de estos con el fin de obtener la mayor precisión posible.

A continuación, en la Tabla 1, se muestran todos los datos que obtuvimos con este experimento.

<i>Color</i>	<i>Longitud de Onda (<math>\lambda</math>)</i>	<i>Frecuencia (<math>f</math>)</i>	<i>Intensidad (<math>I</math>)</i>	<i>Voltaje de Frenado (<math>V_0</math>)</i>
Azul	432 nm	694.44 THz	0.41 $\mu$ A	1.179 V
Verde	471 nm	636.94 THz	0.36 $\mu$ A	0.930 V
Amarillo	501 nm	598.80 THz	0.35 $\mu$ A	0.750 V
Naranja	522 nm	574.71 THz	0.28 $\mu$ A	0.628 V
Rojo	582 nm	515.46 THz	0.12 $\mu$ A	0.421 V

**Tabla 1: Datos del Color con su Longitud de Onda, Frecuencia, Intensidad y Voltaje de Frenado.**

En este sentido, en la Figura 24, se ha representado la variación de la intensidad eléctrica generada en función de la longitud de onda de la luz. Como puede observarse, y tal y como cabía esperar, cuanto menor es la longitud de onda (mayor frecuencia), la intensidad es mayor, ya que los fotones incidentes son cada vez más energéticos y pueden liberar electrones con mayor facilidad.

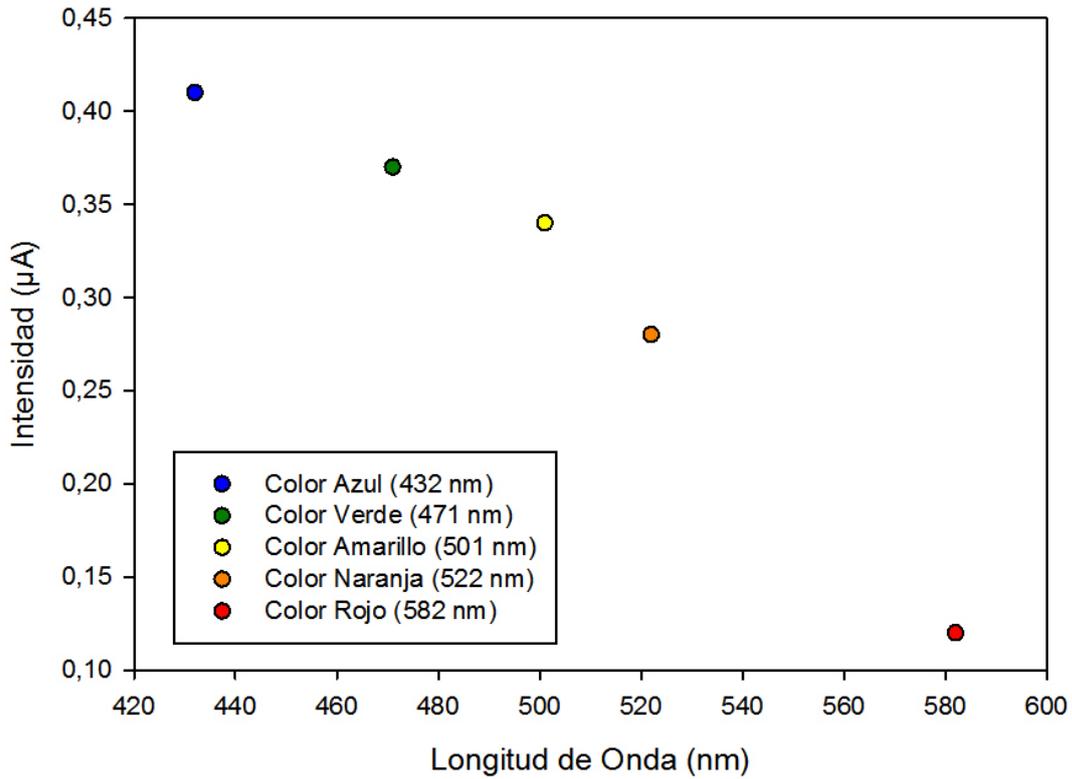


Figura 24: Relación Intensidad-Longitud de Onda.

Por otra parte, también se ha representado, en la Figura 25, el voltaje de frenado en función de la frecuencia de la luz.

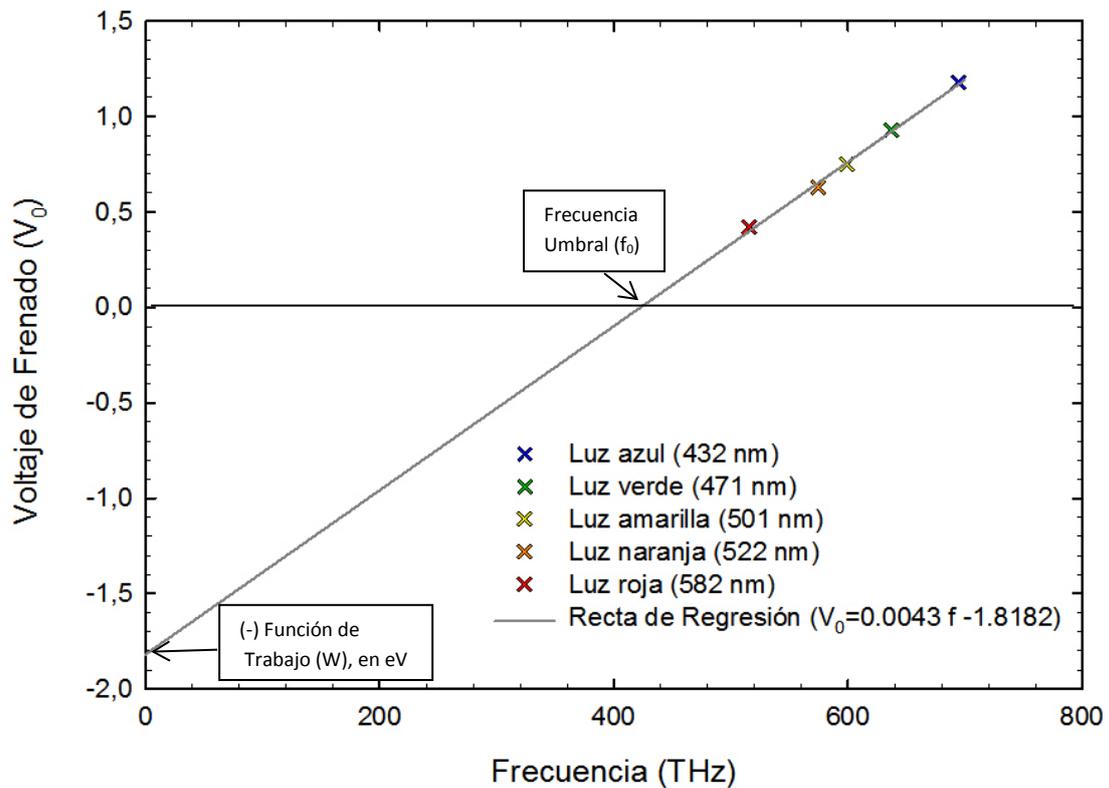


Figura 25: Relación Frecuencia-Voltaje de Frenado.

Como podemos ver, se cumple que, como cabía esperar, el voltaje de frenado necesario disminuye a medida que lo hace la frecuencia (energía) de los fotones, y los valores medidos dan lugar a una gráfica del tipo línea recta.

Además, podemos obtener dos valores de interés: la función de trabajo ( $W$ ), obtenida cuando  $f=0$ , e igual a 1.8182 eV y, por otra parte, la frecuencia umbral ( $f_0$ ). Este último valor lo calcularemos, de manera exacta, haciendo uso de la ecuación de la recta obtenida  $V_0 = 0.0043 \cdot f - 1.8182$ , (que se ha indicado en la Figura 25), considerando  $V_0=0$ :

$$f_0 = \frac{1.8182}{0.0043} = 422.84 \text{ THz} \quad (4)$$

## 4.3 Cálculo de la Constante de Planck ( $h$ )

### 4.3.1 Desarrollo del experimento

Para hallar el valor de la constante de Planck ( $h$ ), seguiremos el desarrollo que indicamos a continuación. En este experimento, comprobaremos si obtenemos un valor de la constante de Planck acorde con el ya conocido ( $h = 4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ ) y, además, calcularemos el porcentaje de error obtenido.

En este sentido, utilizaremos la ecuación de la recta que relaciona las frecuencias ( $f$ ) y los valores de voltaje de frenado ( $V_0$ ), hallada en el experimento anterior. De ella, como ya se comprobó en el apartado anterior, se obtuvieron los valores de la frecuencia umbral ( $f_0$ ) que, como ya se indicó, representa la frecuencia mínima de luz que arrastra algún electrón de la superficie del cátodo, y la función de trabajo ( $W$ ), o energía de los fotones que se utiliza para realizar “trabajo” sobre los electrones antes que éstos sean separados de la superficie del cátodo para pasar a través del vacío al ánodo o, lo que es lo mismo, la mínima energía que necesita absorber un electrón para liberarse del metal.

Además, para comprobar que los cálculos están correctamente realizados, ya se ha indicado que la constante de Planck ( $h$ ) tiene un valor de  $h = 4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ .

A continuación, vamos a explicar el método por el que podemos hallar el valor de la Constante de Planck y, posteriormente, lo aplicaremos.

#### **Método:**

Según lo propuesto por Einstein en 1905, un fotón de luz tendrá una energía igual a ( $h \cdot f$ ), donde ( $h$ ) será la constante de Planck y ( $f$ ), la frecuencia en Hz de la emisión radiada.

En el efecto fotoeléctrico, un fotón entregará toda su energía a un electrón de la superficie del material iluminado. La energía se usará con el propósito de elevar al

electrón a la superficie del metal, liberarlo de la atracción electrostática del éste y aportar energía cinética al electrón libre.

Como ya sabemos, la energía necesaria para liberar al electrón de la atracción electrostática se conoce como función de trabajo ( $W$ ) del metal del fototubo, mientras que la energía cinética de los electrones más enérgicos de la superficie del metal se representará como  $E_c$ . Ambos valores se pueden relacionar como:

$$h \cdot f = W + E_c \quad (5)$$

En el experimento debemos conocer la frecuencia superior de la luz que incide sobre la superficie metálica en el interior del fototubo. Para ello, insertamos los filtros de colores en la trayectoria de la luz, haciendo que estos corten toda la luz de cualquier longitud de onda más corta (frecuencia más alta) que la señalada en el marco del filtro, es decir, que la correspondiente a cada color.

La energía cinética máxima de los electrones sólo puede ser determinada aplicando un voltaje inverso (voltaje de frenado,  $V_0$ ) al tubo de manera que un campo eléctrico que se oponga detenga completamente los electrones más enérgicos y les impida alcanzar el ánodo.

En cualquier caso, la energía suministrada por el campo eléctrico al parar los electrones emitidos y evitar que alcancen el ánodo será ( $q_e \cdot V_0$ ), siendo  $q_e$  la carga del electrón, con un valor de  $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C.

Esta energía igualará a la energía cinética de los electrones dando lugar a:

$$q_e \cdot V_0 = h \cdot f - W \quad (6)$$

Dividiendo ambos lados de esta fórmula por la carga del electrón, obtenemos una expresión del tipo línea recta ( $y = ax + b$ ), al igual que la gráfica explicada al inicio del experimento:

$$V_0 = f \cdot \left(\frac{h}{q_e}\right) - \left(\frac{W}{q_e}\right) \quad (7)$$

Fijándonos en la gráfica, veremos que la pendiente de la misma será  $\left(\frac{h}{q_e}\right)$  y el corte con el eje y será  $\left(-\frac{W}{q_e}\right)$ . Además, de esta gráfica, ya sabemos que obtendremos el valor de la función de trabajo ( $W$ ), ya que el corte de la recta con el eje y nos dará el valor de la misma, en eV.

Finalmente, para hallar la constante de Planck, despejaremos de (6):

$$h = \frac{W + V_0 \cdot q_e}{f} \quad (8)$$

Por tanto, ya tan sólo nos quedaría sustituir los datos para hallar la constante de Planck ( $h$ ). La función de trabajo ( $W$ ) ya la obtuvimos, con un valor de 1.8182 eV. Y, para los valores de voltaje de frenado ( $V_0$ ) y la frecuencia ( $f$ ), trabajaremos con el punto donde hallamos la frecuencia umbral ( $f_0$ ), es decir, un voltaje de frenado ( $V_0$ ) nulo y una frecuencia umbral ( $f_0$ ) de 422.84 THz. Sabemos, además, que el valor de la constante carga del electrón es  $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C.

Una vez que tenemos todos los valores, pasamos a sustituir en la ecuación (8), obteniendo así la constante de Planck ( $h$ ):

$$h = \frac{1.8182 + 0 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{422.84 \cdot 10^{12}} = 4.299 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (9)$$

### 4.3.2 Porcentaje de error en el cálculo

#### *Porcentaje de error en el cálculo de la pendiente de la recta*

Según el manual de nuestro dispositivo, debido a factores propios del fototubo que no podemos controlar, y a causa de la luz que se refleja sobre el cátodo y llega hasta el ánodo haciendo que éste libere electrones, efecto no deseado, se producirán en nuestros cálculos ciertos errores poco significativos que harán que varíen en cierta medida los valores obtenidos respecto a los esperados.

Debido a esto, la pendiente de la recta en la gráfica que relaciona voltaje de frenado ( $V_0$ ) y frecuencia umbral ( $f_0$ ) no será exactamente igual al valor teórico que se debería obtener. Podemos obtener errores de hasta el 20%, dependiendo de cómo afecten los efectos no deseados a las mediciones.

El valor teórico a obtener sería una pendiente de  $0.41 \cdot 10^{-14}$ , mientras que la que obtenemos es igual a  $0.43 \cdot 10^{-14}$ . Obtenemos un error de cálculo del 4% que, como hemos visto anteriormente, entra dentro de los valores de error esperados y asumibles.

#### *Porcentaje de error en el cálculo de la constante de Planck ( $h$ )*

Dependiendo del funcionamiento exacto y de la eficiencia del tubo fotoeléctrico, pueden esperarse errores de hasta el 10% en el cálculo de la constante de Planck ( $h$ ), o incluso mayores, aunque estos presentan una menor probabilidad.

Sabiendo que el valor teórico exacto de la constante de Planck ( $h$ ) es de  $4.14 \cdot 10^{-15}$  eV·s, vamos a calcular el error que se produce en el método que hemos utilizado para calcular este valor.

Obtenemos un valor de  $4.299 \cdot 10^{-15}$  eV·s, por lo que el error obtenido es del 3.84%, que, como hemos visto anteriormente, entra dentro de los valores de error esperados y asumibles.

## 4.4 Cálculo y representación de la energía cinética ( $E_c$ ) de los electrones y su velocidad ( $V$ ), en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ).

### 4.4.1 Cálculo y representación de la energía cinética ( $E_c$ ) en función de la longitud de onda ( $\lambda$ )

Para hallar el valor de la energía cinética ( $E_c$ ) de los electrones, es decir, la energía que da velocidad al electrón cuando éste se libera, tenemos que tener en cuenta la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (10)$$

donde  $m$  es la masa de los electrones y  $V$  su velocidad.

Para el cálculo, podemos igualar este parámetro a la energía de frenado, compuesta por el producto del voltaje de frenado ( $V_0$ ) y la carga del electrón, con un valor de  $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C:

$$E_c = V_0 \cdot q_e \quad (11)$$

Por tanto, puede generarse la Tabla 2 y su representación (Figura 26):

<i>Color</i>	<i>Longitud de onda (<math>\lambda</math>)</i>	<i>Energía cinética (<math>V_0 \cdot q_e</math>)</i>	<i>Energía cinética (<math>V_0 \cdot q_e</math>)</i>
Azul	432 nm	1.89·10-19 J	1.180 eV
Verde	471 nm	1.49·10-19 J	0.929 eV
Amarillo	501 nm	1.20·10-19 J	0.749 eV
Naranja	522 nm	1.10·10-19 J	0.627 eV
Rojo	582 nm	6.74·10-20 J	0.420 eV

Tabla 2: Datos del Color con la Longitud de Onda y la Energía Cinética de los electrones generados.

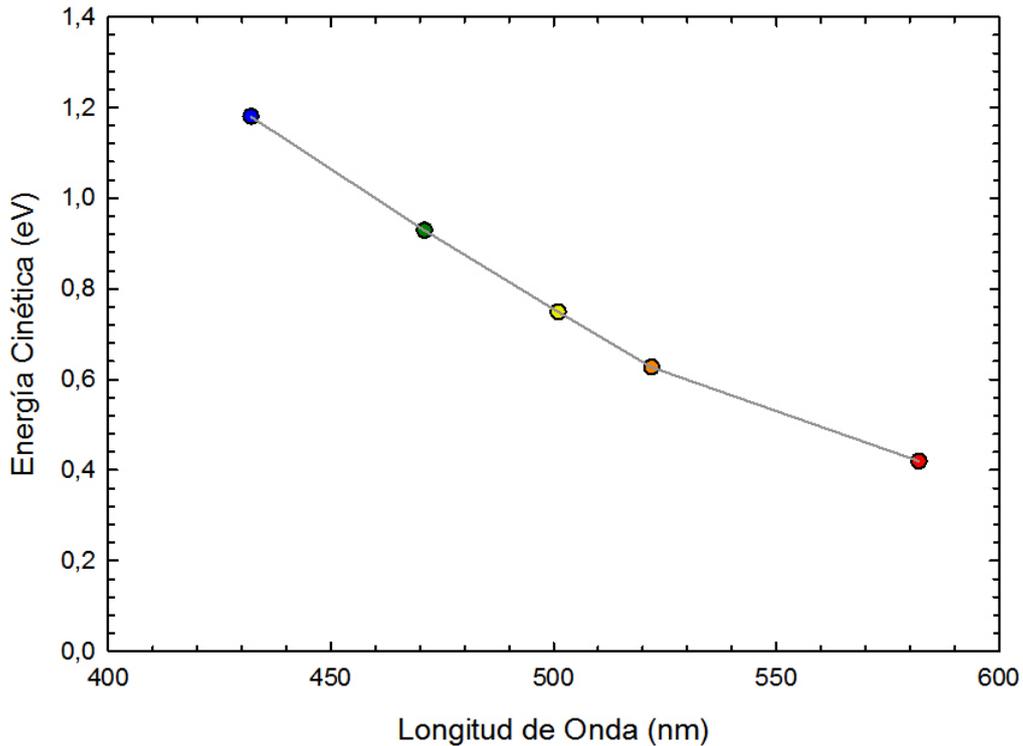


Figura 26: Relación Longitud de Onda-Energía Cinética.

Como puede observarse, cuanto mayor sea la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la luz (menor la frecuencia), menor será la energía cinética( $E_c$ ).

Esto se debe a que cuanto mayor sea la longitud de onda ( $\lambda$ ) de un color, la energía del fotón será menor y, por tanto, podrá entregar menor cantidad de energía a la cinética( $E_c$ ) del electrón una vez que éste se libere.

#### 4.4.2 Cálculo y representación de la velocidad ( $V$ ) en función de la longitud de onda ( $\lambda$ )

Para el cálculo de la velocidad ( $V$ ) haremos uso de la ecuación de Einstein, donde sustituiremos la energía cinética( $E_c$ ) por su fórmula:

$$h \cdot f = E_i + E_c = E_i + \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (11)$$

donde, ahora, hemos incluido  $E_i$ , denominada energía propia del material, en lugar de  $W$ , aunque ambas representan la misma energía.

La energía propia del material ( $E_i$ ) se correspondería con la energía característica del metal. Será la mínima necesaria que debe presentar un electrón para que pueda ser liberado en este material. Esta energía se puede obtener con el producto de ( $h \cdot f_0$ ), donde ( $h$ ) sería la constante de Planck y ( $f_0$ ), la frecuencia umbral o de corte en Hz:

$$E_i = h \cdot f_0 \quad (12)$$

Aunque también podemos calcular  $E_i$ , de manera empírica, para cada color, y los valores obtenidos deberían ser muy similares y próximos a  $h \cdot f_0 = 1.75 \text{ eV}$ . Para ello, utilizaremos la fórmula de Einstein general que hemos visto en el desarrollo teórico, donde la energía cinética se sustituye por  $V_0 \cdot q_e$ :

$$h \cdot f = E_i + E_c \rightarrow h \cdot f = E_i + V_0 \cdot q_e \quad (13)$$

De manera que, despejando la energía propia del material ( $E_i$ ), obtenemos:

$$E_i = h \cdot f - V_0 \cdot q_e \quad (14)$$

Por tanto, despejando de (11), obtenemos:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (h \cdot f - E_i)}{m}} \quad (15)$$

Sabemos que el valor de la masa del electrón ( $m$ ) es de  $9.1 \cdot 10^{-28} \text{ g}$  y el resto de datos los hemos obtenido anteriormente, por lo que ya podemos calcular la velocidad ( $V$ ) de los electrones en la Tabla 3, y representarla respecto a la longitud de onda ( $\lambda$ ) en la Figura 27:

<i>Color</i>	<i>Longitud de onda (<math>\lambda</math>)</i>	<i>Energía del fotón (<math>h \cdot f</math>)</i>	<i>Energía propia del material (<math>E_i</math>)</i>	<i>Velocidad (<math>V</math>)</i>
Azul	432 nm	2.88 eV	1.70 eV	20164.13 m/s
Verde	471 nm	2.64 eV	1.71 eV	17965.68 m/s
Amarillo	501 nm	2.48 eV	1.73 eV	16345.17 m/s
Naranja	522 nm	2.38 eV	1.75 eV	15233.07 m/s
Rojo	582 nm	2.13 eV	1.71 eV	12069.51 m/s

**Tabla 3: Datos del Color con su Longitud de Onda, Energía del Fotón, Energía propia del material y Velocidad.**

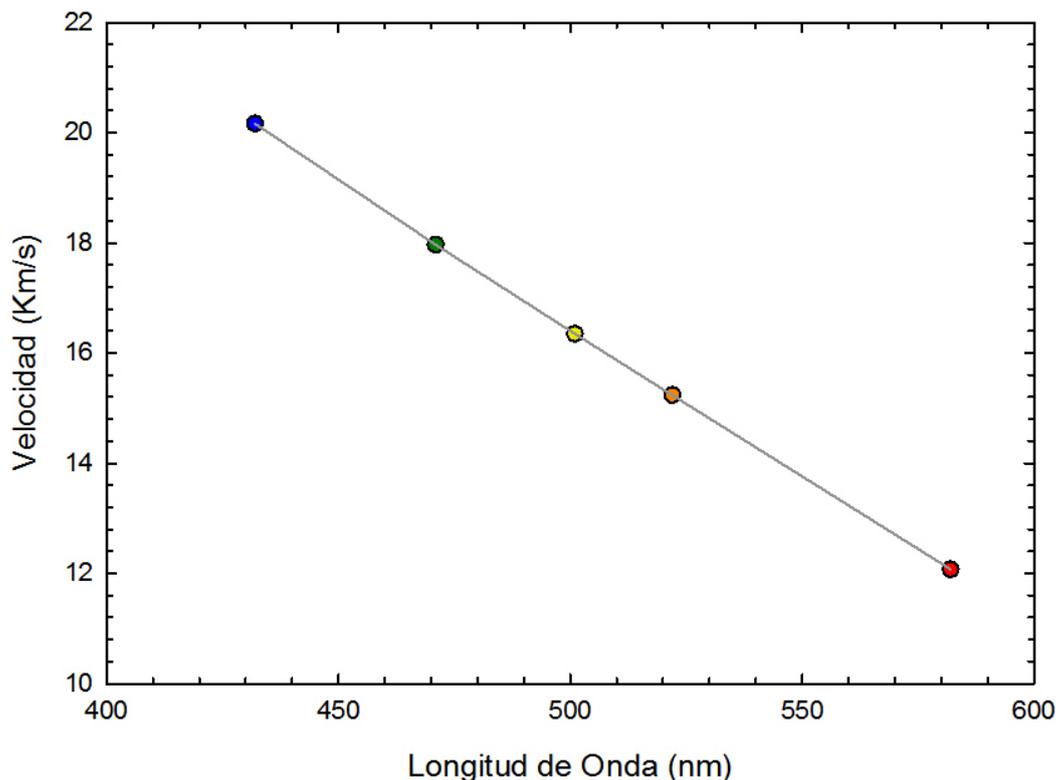


Figura 27: Relación Longitud de Onda-Velocidad de los electrones.

Como puede observarse, la velocidad de los electrones disminuye con la longitud de onda. Esto se debe a la misma razón que se ha descrito con anterioridad, ya que la energía cinética ( $E_c$ ) y la velocidad ( $V$ ) están estrechamente relacionadas y, al haber una disminución de la primera cuando aumenta la longitud de onda, por una menor energía de los fotones, disminuirá la otra.

## 4.5 Relación entre cantidad de iluminación e intensidad eléctrica generada

### 4.5.1 Desarrollo teórico del experimento

El objetivo de este experimento es observar la variación de intensidad ( $I$ ) eléctrica generada en el fototubo, para cada color, a medida que se va variando la cantidad de iluminación de luz por medio de unas aperturas de diámetro 7 mm, 10 mm, 14 mm y 20 mm.

Con la fuente luminosa en la misma posición que en los experimentos anteriores y el valor del voltaje de frenado ( $V_0$ ) ajustado en cero, debemos seleccionar, en el conmutador rotatorio, "Meter Reading" para leer intensidades altas (del orden de  $\mu A$ ). Una vez realizados estos pasos, pasaremos a insertar las diferentes aperturas de las que

dispone el dispositivo en el conjunto de ranuras más estrecho de la parte trasera del dispositivo. . A su vez, también introduciremos los diferentes filtros de color para ver el efecto de esta variación de cantidad de iluminación en cada uno de ellos.

Por tanto, realizaremos un gráfico que relacione la intensidad ( $I$ ) medida a través del fototubo frente a la superficie que tendrá la apertura de luz que utilizamos para la medición.

Teóricamente, sabemos que, con una menor cantidad de luz total, la intensidad desde el cátodo se verá reducida, ya que habrá un menor número de electrones liberados por los fotones que inciden sobre el cátodo.

El objetivo es comprobar esta relación teórica mediante la toma de medidas y la realización de la gráfica descrita anteriormente.

#### 4.5.2 Mediciones y obtención de resultados del experimento

El primer paso será la toma de medidas de la intensidad ( $I$ ) a través del fototubo para las diferentes aperturas y para cada uno de los filtros de color (Tablas 4 a 9).

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.21 $\mu$ A
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.30 $\mu$ A
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.37 $\mu$ A
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.44 $\mu$ A

**Tabla 4: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad sin filtro de color (luz blanca).**

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.14 $\mu$ A
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.24 $\mu$ A
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.32 $\mu$ A
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.39 $\mu$ A

**Tabla 5: Datos del Diámetro de la Apertura y la Intensidad con filtro Azul.**

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.13 $\mu$ A
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.21 $\mu$ A
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.28 $\mu$ A
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.34 $\mu$ A

**Tabla 6: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Verde.**

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.15 $\mu$ A
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.24 $\mu$ A
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.29 $\mu$ A
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.34 $\mu$ A

**Tabla 7: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Amarillo.**

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.09 μA
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.16 μA
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.21 μA
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.26 μA

Tabla 8: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Naranja.

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.02 μA
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.05 μA
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.07 μA
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.10 μA

Tabla 9: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Rojo.

A continuación, en la Figura 28, se representan todos los valores medidos en un gráfica para analizar si los resultados obtenidos encajan con nuestra explicación teórica.

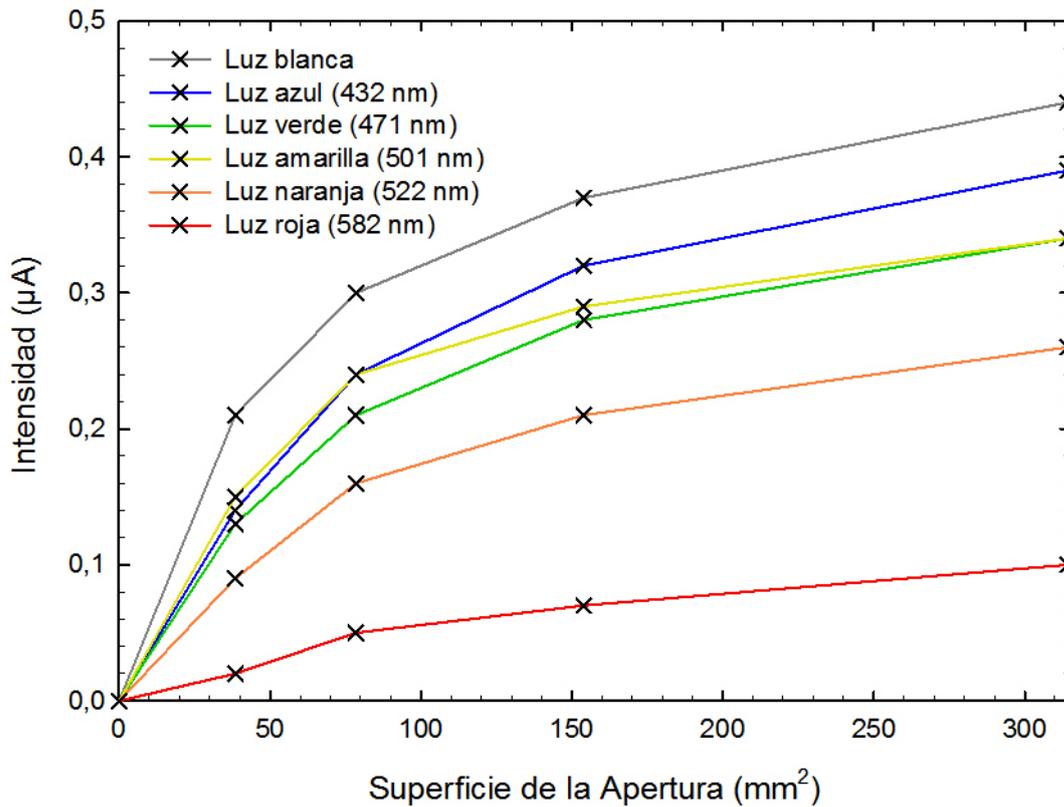


Figura 28: Relación de la Superficie de la Apertura con la Intensidad.

Como podemos ver, a medida que aumenta la superficie de la apertura, es decir, a medida que la apertura es mayor, se producirá un aumento de la intensidad (*I*) eléctrica generada en el fototubo. Esto se debe a lo explicado anteriormente, al haber una apertura mayor, la cantidad de luz que llegará a nuestro fototubo también será mayor, haciendo que una mayor cantidad de fotones impacten en el cátodo, produciendo una mayor liberación de electrones y, por lo tanto, una mayor intensidad (*I*).

Podemos ver que el punto mínimo de la curva sería cuando no hay ningún tipo de apertura (todo el fototubo cubierto, es decir, superficie de apertura igual a 0 mm<sup>2</sup>) y, en él, la intensidad ( $I$ ) será nula, ya que no entra luz.

Por otra parte, podemos ver que los colores con una menor longitud de onda ( $\lambda$ ) como el azul (mayor frecuencia), tendrán intensidades mayores, hecho que concuerda con las explicaciones hechas a partir de los experimentos anteriores, ya que los fotones serán más energéticos y podrán liberar más cantidad de electrones. Por el contrario, el color rojo será el que menor intensidad genere.

Sin embargo, observando la gráfica, podemos observar algo que teóricamente no tendría sentido, y es que la curva del color amarillo (492 nm) se sitúa por encima del color verde (460 nm) y, en algunos tramos, del color azul (428 nm), aunque tenga una longitud de onda ( $\lambda$ ) mayor, cosa que no debería ocurrir.

La explicación a este hecho podría residir en que la fuente luminosa de nuestro dispositivo incandescente no tiene un alto contenido de azul o violeta mientras que sí lo tiene de amarillo. Esto quiere decir que la luz con la que realizamos las mediciones no es perfectamente blanca, cosa que influiría en los resultados obtenidos falseándolos de alguna manera, sobre todo en lo que se refiere al color amarillo. Para comprobar esta hipótesis, sustituimos el foco de nuestro dispositivo por una luz perfectamente blanca, con cuidado de que ningún otro tipo de luz llegase al fototubo, y realizamos, de nuevo, las medidas que se muestran en las Tablas 10 a 14. Como puede observarse en la Figura 29, ahora las curvas sí que se ajustarían perfectamente a la explicación teórica, comprobando que es la fuente luminosa la que introdujo el efecto no deseado de la figura anterior.

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.42 $\mu$ A
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.52 $\mu$ A
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.58 $\mu$ A
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.63 $\mu$ A

**Tabla 10: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Azul y luz perfecta blanca.**

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.29 $\mu$ A
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.35 $\mu$ A
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.39 $\mu$ A
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.42 $\mu$ A

**Tabla 11: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Verde y luz perfecta blanca.**

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.27 $\mu$ A
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.34 $\mu$ A
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.38 $\mu$ A
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.41 $\mu$ A

**Tabla 12: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Amarillo y luz perfecta blanca.**

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.20 μA
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.26 μA
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.29 μA
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.32 μA

Tabla 13: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Naranja y luz perfecta blanca.

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.03 μA
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.06 μA
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.09 μA
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.11 μA

Tabla 14: Datos de la Superficie de la Apertura y la Intensidad con filtro Rojo y luz perfecta blanca.

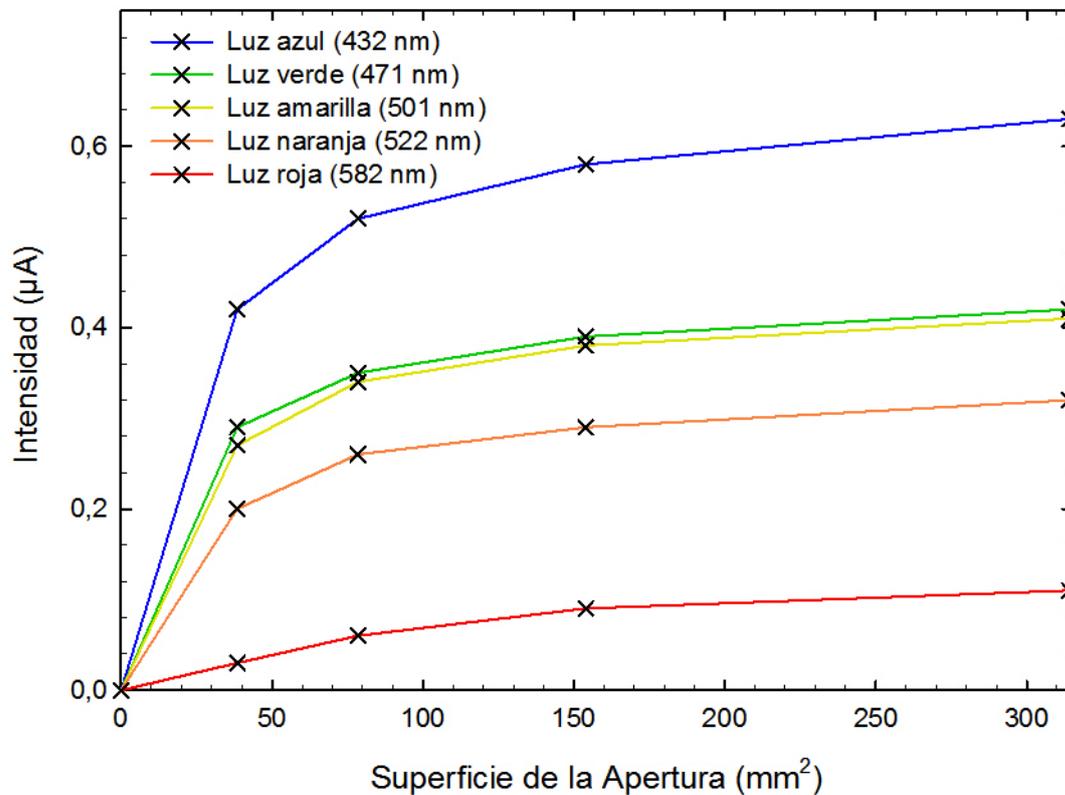


Figura 29: Relación de la Superficie de Apertura-Intensidad para luz perfectamente blanca.

## 4.6 El voltaje de frenado no depende de la intensidad de iluminación

### 4.6.1 Desarrollo teórico del experimento

La luz de la fuente luminosa atraviesa los filtros de colores suministrados por el equipo, de manera que la longitud de onda ( $\lambda$ ) que pasa es conocida. Esta luz llega a la

superficie del cátodo que forma el fototubo del dispositivo. Cuando los fotones alcanzan la superficie metálica curvada del cátodo, estos transmiten su energía a los electrones, los cuales escapan de la superficie del cátodo, liberándose y llegando al ánodo. Esto constituye una corriente ( $I$ ) muy pequeña detectada por el medidor digital de electrones entre el cátodo y el ánodo.

La energía (cinética) de los electrones puede determinarse aplicando un voltaje de frenado ( $V_0$ ) al fototubo en dirección inversa para así poder determinar el necesario para detener a todos los electrones, anulando el flujo de electrones entre el cátodo y el ánodo. Cuando la corriente ( $I$ ) desaparece, el valor del voltaje de frenado ( $V_0$ ) es una medición del nivel de energía de los electrones más energéticos. Esto quiere decir que estos electrones fueron excitados por los fotones de la componente de frecuencia ( $f$ ) más alta, es decir, la longitud de onda más corta ( $\lambda$ ), del haz de luz que entra al fototubo.

Diferentes filtros de colores harán que las frecuencias ( $f$ ) máximas correspondan a diferentes valores de longitud de onda ( $\lambda$ ); esto provocará que se necesiten diferentes valores de voltaje de frenado ( $V_0$ ) para parar la corriente ( $I$ ) producida, como hemos visto en los experimentos anteriores. Por lo tanto, la energía del fotón que fue transmitida al electrón depende de la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la luz.

Por otra parte, utilizando las aperturas conocidas de diferentes tamaños, pretendemos comprobar que, para un color determinado, si la cantidad de la luz (intensidad) aumenta o disminuye, no debería afectar al voltaje de frenado ( $V_0$ ) necesario para detener el flujo de electrones generado. De este hecho, deducimos que la energía de un fotón de luz depende de su longitud de onda ( $\lambda$ ) y no de la cantidad de luz o intensidad que incide sobre el fototubo. Este voltaje será constante ya que la energía de los fotones es la misma aunque aumente la intensidad de la luz y, por tanto, la corriente eléctrica generada ( $I$ ).

Insertaremos las diferentes aperturas de las que dispone el dispositivo en el conjunto de ranuras más estrecho de la parte trasera del dispositivo y, a su vez, también introduciremos los diferentes filtros de color para ver el efecto en cada uno de ellos. Con la fuente luminosa en la misma posición que en los experimentos anteriores y el valor del voltaje de frenado ( $V_0$ ) ajustado en cero, debemos seleccionar en el conmutador rotatorio “Meter Reading” para leer corrientes altas (del orden de  $\mu\text{A}$ ). De esta manera, mediremos la corriente ( $I$ ) y, posteriormente, giraremos el mando rotatorio “Adjust Backing Volts” hasta que la lectura de corrientes pequeñas (de orden de  $\text{nA}$ ) sea nula. Cambiaremos el conmutador “Meter Reading” a la posición tres y mediremos el voltaje de frenado ( $V_0$ ).

Para comprobar lo que acabamos de explicar, realizaremos una gráfica donde veamos relacionado el valor de las aperturas con la intensidad generada ( $I$ ) y el voltaje de frenado ( $V_0$ ) para cada filtro de color. De manera, la intensidad ( $I$ ) debe ir en aumento, como ya se comprobó anteriormente, pero el voltaje de frenado ( $V_0$ ) debe permanecer prácticamente constante.

#### 4.6.2 Mediciones y obtención de resultados del experimento

Para obtener las mediciones necesarias de este experimento, realizamos los mismos pasos que el experimento anterior pero, además de medir la corriente ( $I$ ), mediremos también el voltaje de frenado ( $V_0$ ).

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (<math>V_0</math>)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.14 $\mu$ A	1.132 V
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.24 $\mu$ A	1.138 V
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.32 $\mu$ A	1.166 V
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.39 $\mu$ A	1.186 V

Tabla 15: Datos de la Superficie de la Apertura, Intensidad y Voltaje de Frenado con filtro Azul.

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (<math>V_0</math>)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.13 $\mu$ A	0.892 V
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.21 $\mu$ A	0.900 V
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.28 $\mu$ A	0.917 V
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.34 $\mu$ A	0.943 V

Tabla 16: Datos de la Superficie de la Apertura, Intensidad y Voltaje de Frenado con filtro Verde.

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (<math>V_0</math>)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.15 $\mu$ A	0.725 V
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.24 $\mu$ A	0.737 V
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.29 $\mu$ A	0.744 V
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.34 $\mu$ A	0.762 V

Tabla 17: Datos de la Superficie de la Apertura, Intensidad y Voltaje de Frenado con filtro Amarillo.

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (<math>V_0</math>)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.09 $\mu$ A	0.610 V
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.16 $\mu$ A	0.626 V
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.21 $\mu$ A	0.624 V
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.26 $\mu$ A	0.639 V

Tabla 18: Datos de la Superficie de la Apertura, Intensidad y Voltaje de Frenado con filtro Naranja.

<i>Diámetro de la Apertura</i>	<i>Superficie de la Apertura</i>	<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (<math>V_0</math>)</i>
7 mm	38,4845 mm <sup>2</sup>	0.02 $\mu$ A	0.401 V
10 mm	78,5398 mm <sup>2</sup>	0.05 $\mu$ A	0.415 V
14 mm	153,9380 mm <sup>2</sup>	0.07 $\mu$ A	0.415 V
20 mm	314,1593 mm <sup>2</sup>	0.10 $\mu$ A	0.424 V

Tabla 19: Datos de la Superficie de la Apertura, Intensidad y Voltaje de Frenado con filtro Rojo.

Como se puede observar, el voltaje de frenado se mantiene prácticamente constante según varía la intensidad de luz incidente, para todos los colores, si bien es cierto que existen ciertas variaciones pequeñas en este voltaje de frenado ( $V_0$ ) dentro de cada color. En el azul tendríamos una diferencia entre el valor máximo y mínimo de 0.054 V, en el verde de 0.051 V, en el amarillo de 0.037 V, en el naranja de 0.029 V y en el rojo de 0.023 V.

Aunque estos valores deberían ser constantes, se producen pequeñas variaciones debido a los efectos no deseados que hemos estado viendo a lo largo del desarrollo de los experimentos, por los cuales realizamos las medidas varias veces y utilizamos un promedio de las mismas. Al realizar esto, minimizamos el error que se produce en la lectura del voltaje de frenado ( $V_0$ ), pero no podemos acabar con él en su totalidad y, por esta razón, se producen esas pequeñas variaciones inevitables.

A continuación, se muestra la Figura 30, que nos permite visualizar los datos obtenidos así como comprobar las conclusiones a las que se ha llegado.

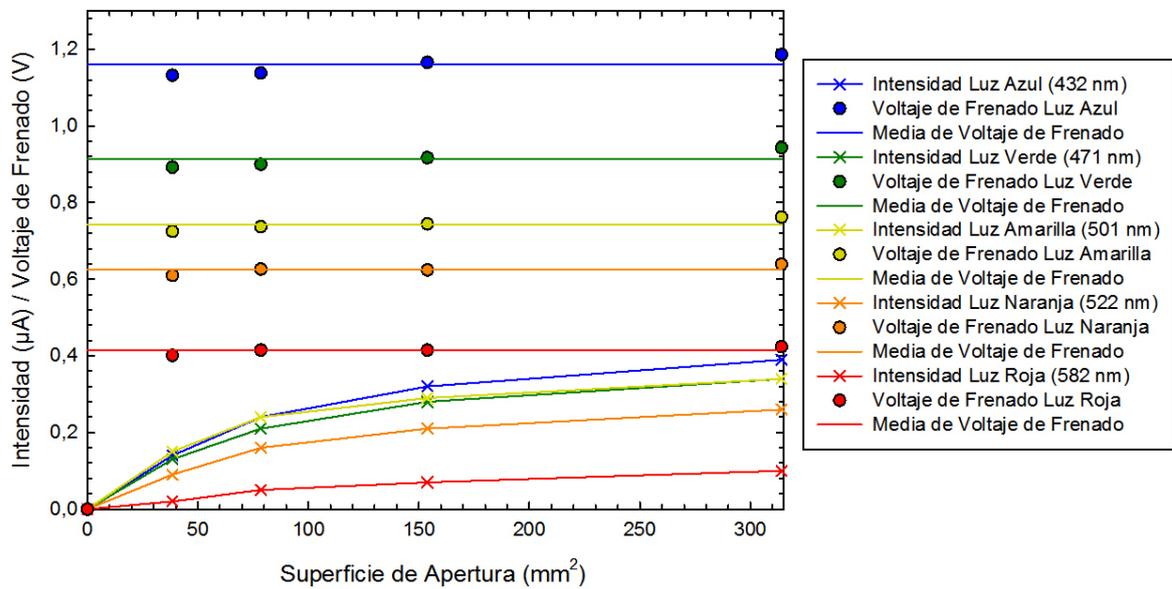


Figura 30: Relación Superficie de Apertura-Intensidad/Voltaje de Frenado.

Como podemos ver, aunque existen las variaciones explicadas anteriormente, tendríamos un voltaje de frenado ( $V_0$ ) muy similar para cada apertura en los diferentes colores, comprobando así que la cantidad de luz o intensidad de la misma, no influyen en la energía del fotón. Obtendríamos una media de voltaje de frenado ( $V_0$ ) de 1.16 V para el color azul, de 0.913 V para el verde, de 0.742 V para el amarillo, de 0.625 V para el naranja y de 0.414 V para el rojo. Además podemos ver que estos valores también son muy aproximados a los obtenidos al inicio de los experimentos, cuando no trabajábamos con aperturas, por lo que, obviando las variaciones producidas por efectos no deseados, tendríamos un voltaje de frenado ( $V_0$ ) constante. Por otro lado, de nuevo comprobamos que el voltaje de frenado promedio necesario disminuye a medida que lo hace la frecuencia (energía) de los fotones

Por otro lado, vemos que con la intensidad ( $I$ ) ocurre como en el experimento anterior, que ésta será mayor según aumenta la cantidad de luz que introducimos en nuestro fototubo.

Por tanto, todos los aspectos que deberían cumplirse en base a la teoría desarrollada vemos que se cumplen, demostrando así que la energía del fotón no dependerá de la intensidad o cantidad de luz que llegue al fototubo, sino que dependerá de la longitud de onda ( $\lambda$ ) o frecuencia ( $f$ ) que tenga esta luz.

## 4.7 Distribución de energías de los electrones liberados

### 4.7.1 Desarrollo teórico del experimento

Con este experimento queremos comprobar que no todos los electrones que se liberan del cátodo al ánodo tienen la misma energía cinética. Teóricamente, sabemos que no todos los electrones liberados lo van a hacer con la máxima energía posible, es más, estos van a ser una minoría. La mayoría de electrones tendrán una energía media o baja.

Para la comprobación de este hecho vamos a realizar una gráfica, para cada color, que relacione la energía del electrón con el número de electrones para así poder ver la distribución de energías que se producirá con los electrones liberados en nuestro fototubo.

Para obtener estos datos, debemos saber que la energía de un electrón es proporcional al voltaje de frenado ( $V_0$ ), mientras que el número de electrones es proporcional a la corriente generada en el fototubo ( $I$ ).

### 4.7.2 Mediciones y obtención de resultados del experimento

Para obtener estas gráficas, el primer paso será hacer mediciones de la corriente ( $I$ ) y del voltaje de frenado ( $V_0$ ). Para obtener la máxima precisión posible, haremos las variaciones de corriente ( $I$ ) más pequeñas posibles y, para cada una de estas variaciones, mediremos el voltaje de frenado ( $V_0$ ). El procedimiento para las mediciones será el mismo que hemos visto en los experimentos anteriores, disminuyendo la corriente ( $I$ ) con el mando rotatorio “Adjust Backing Volts” y viendo qué valor de voltaje de frenado ( $V_0$ ) provoca este descenso de intensidad, cambiando el conmutador rotatorio “Meter Reading” a la tercera posición.

Realizaremos este proceso hasta que en la posición número uno del conmutador rotatorio “Meter Reading”, la cual lee corrientes muy pequeñas (del orden de nA), tengamos un valor de corriente ( $I$ ) nulo, obteniendo así el voltaje de frenado ( $V_0$ ) que frena a todos los electrones.

Una vez que tengamos estos valores, obtendremos el número de electrones y la energía del electrón para así representar nuestras gráficas.

Para obtener el número de electrones utilizaremos la siguiente fórmula, sabiendo que la carga del electrón es  $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C:

$$N^{\circ} \text{ electrones} = \frac{I(A)}{q_e} \quad (16)$$

Por otro lado, para obtener la energía cinética de los electrones utilizaremos la relación que ya fue utilizada anteriormente en la ecuación (13):

$$E_c = V_0 \cdot q_e \quad (17)$$

Nos interesa trabajar con valores de energía en eV, por lo que realizaremos la conversión sabiendo que 1 Julio es igual a  $6.2415 \cdot 10^{18}$  eV.

Una vez que tenemos todos los datos para cada color, se presentan las Tablas 20 a 24, así como las Figuras 31 a 35:

<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (V<sub>0</sub>)</i>	<i>Nº electrones (· 10<sup>18</sup>)</i>	<i>Energía electrón</i>
0.00 µA	1.178 V	0.0000	1.1764 eV
0.01 µA	0.916 V	0.0625	0.9148 eV
0.02 µA	0.822 V	0.1250	0.8209 eV
0.03 µA	0.771 V	0.1875	0.7700 eV
0.04 µA	0.732 V	0.2500	0.7310 eV
0.05 µA	0.704 V	0.3125	0.7030 eV
0.06 µA	0.671 V	0.3750	0.6701 eV
0.07 µA	0.641 V	0.4375	0.6401 eV
0.08 µA	0.623 V	0.5000	0.6222 eV
0.09 µA	0.595 V	0.5625	0.5942 eV
0.10 µA	0.559 V	0.6250	0.5582 eV
0.11 µA	0.542 V	0.6875	0.5413 eV
0.12 µA	0.530 V	0.7500	0.5293 eV
0.13 µA	0.508 V	0.8125	0.5073 eV
0.14 µA	0.492 V	0.8750	0.4913 eV
0.15 µA	0.466 V	0.9375	0.4654 eV
0.16 µA	0.445 V	1.0000	0.4444 eV
0.17 µA	0.430 V	1.0625	0.4294 eV
0.18 µA	0.408 V	1.1250	0.4074 eV
0.19 µA	0.395 V	1.1875	0.3945 eV
0.20 µA	0.376 V	1.2500	0.3755 eV
0.21 µA	0.362 V	1.3125	0.3615 eV
0.22 µA	0.348 V	1.3750	0.3475 eV
0.23 µA	0.320 V	1.4375	0.3196 eV
0.24 µA	0.316 V	1.5000	0.3156 eV
0.25 µA	0.300 V	1.5625	0.2996 eV
0.26 µA	0.279 V	1.6250	0.2786 eV
0.27 µA	0.271 V	1.6875	0.2706 eV
0.28 µA	0.255 V	1.7500	0.2547 eV
0.29 µA	0.251 V	1.8125	0.2507 eV
0.30 µA	0.209 V	1.8750	0.2087 eV
0.31 µA	0.197 V	1.9375	0.1967 eV
0.32 µA	0.182 V	2.0000	0.1818 eV
0.33 µA	0.168 V	2.0625	0.1678 eV
0.34 µA	0.156 V	2.1250	0.1558 eV
0.35 µA	0.142 V	2.1875	0.1418 eV
0.36 µA	0.126 V	2.2500	0.1258 eV
0.37 µA	0.113 V	2.3125	0.1128 eV
0.38 µA	0.107 V	2.3750	0.1069 eV
0.39 µA	0.088 V	2.4375	0.0879 eV
0.40 µA	0.076 V	2.5000	0.0759 eV
0.41 µA	0.058 V	2.5625	0.0579 eV
0.42 µA	0.049 V	2.6250	0.0489 eV
0.43 µA	0.033 V	2.6875	0.0330 eV
0.44 µA	0.016 V	2.7500	0.0160 eV
0.45 µA	0.000 V	2.8125	0.0000 eV

Tabla 20: Datos de Intensidad, Voltaje de Frenado, Número de Electrones y Energía del Electrón para color Azul.

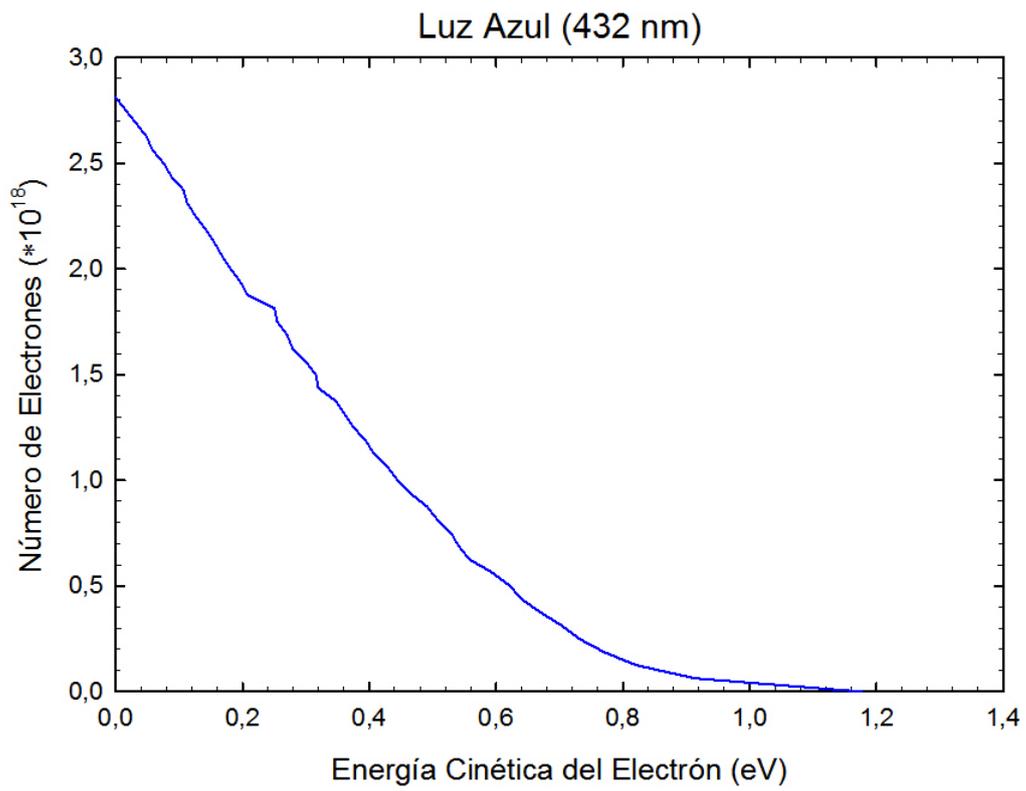


Figura 31: Relación Energía del Electrón-Número de Electrones para color Azul.

<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (V<sub>0</sub>)</i>	<i>Nº electrones (· 10<sup>18</sup>)</i>	<i>Energía electrón</i>
0.00 µA	0.929 V	0.0000	0.9277 eV
0.01 µA	0.674 V	0.0625	0.6731 eV
0.02 µA	0.634 V	0.1250	0.6331 eV
0.03 µA	0.602 V	0.1875	0.6012 eV
0.04 µA	0.574 V	0.2500	0.5732 eV
0.05 µA	0.550 V	0.3125	0.5493 eV
0.06 µA	0.509 V	0.3750	0.5083 eV
0.07 µA	0.493 V	0.4375	0.4923 eV
0.08 µA	0.470 V	0.5000	0.4694 eV
0.09 µA	0.458 V	0.5625	0.4574 eV
0.10 µA	0.439 V	0.6250	0.4384 eV
0.11 µA	0.416 V	0.6875	0.4154 eV
0.12 µA	0.405 V	0.7500	0.4044 eV
0.13 µA	0.387 V	0.8125	0.3865 eV
0.14 µA	0.366 V	0.8750	0.3655 eV
0.15 µA	0.352 V	0.9375	0.3515 eV
0.16 µA	0.332 V	1.0000	0.3315 eV
0.17 µA	0.315 V	1.0625	0.3146 eV
0.18 µA	0.296 V	1.1250	0.2956 eV
0.19 µA	0.280 V	1.1875	0.2796 eV
0.20 µA	0.263 V	1.2500	0.2626 eV
0.21 µA	0.249 V	1.3125	0.2487 eV
0.22 µA	0.241 V	1.3750	0.2407 eV
0.23 µA	0.226 V	1.4375	0.2257 eV
0.24 µA	0.213 V	1.5000	0.2127 eV
0.25 µA	0.193 V	1.5625	0.1927 eV
0.26 µA	0.186 V	1.6250	0.1857 eV
0.27 µA	0.173 V	1.6875	0.1728 eV
0.28 µA	0.151 V	1.7500	0.1508 eV
0.29 µA	0.143 V	1.8125	0.1428 eV
0.30 µA	0.128 V	1.8750	0.1278 eV
0.31 µA	0.122 V	1.9375	0.1218 eV
0.32 µA	0.098 V	2.0000	0.0979 eV
0.33 µA	0.091 V	2.0625	0.0909 eV
0.34 µA	0.076 V	2.1250	0.0759 eV
0.35 µA	0.059 V	2.1875	0.0589 eV
0.36 µA	0.047 V	2.2500	0.0469 eV
0.37 µA	0.027 V	2.3125	0.0270 eV
0.38 µA	0.022 V	2.3750	0.0220 eV
0.39 µA	0.000 V	2.4375	0.0000 eV

**Tabla 21: Datos de Intensidad, Voltaje de Frenado, Número de Electrones y Energía del Electrón para color Verde.**

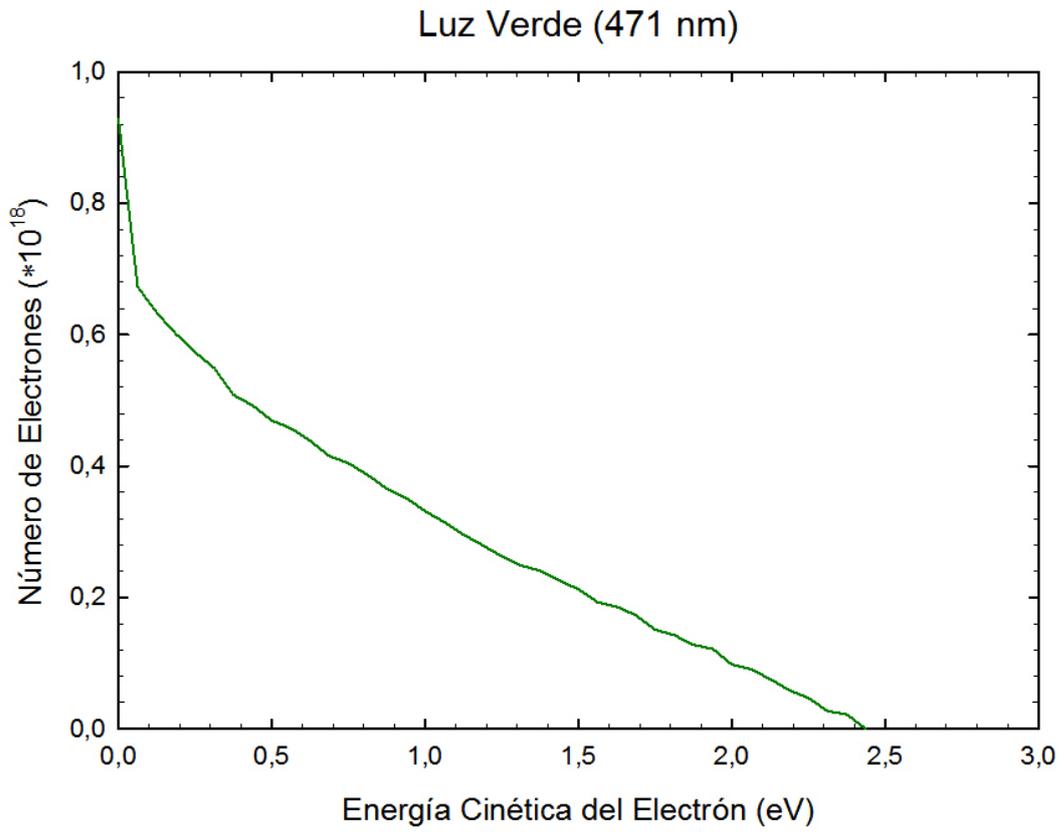


Figura 32: Relación Energía del Electrón-Número de Electrones para color Verde.

<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (V<sub>0</sub>)</i>	<i>Nº electrones (· 10<sup>18</sup>)</i>	<i>Energía electrón</i>
0.00 µA	0.745 V	0.0000	0.7440 eV
0.01 µA	0.630 V	0.0625	0.6291 eV
0.02 µA	0.585 V	0.1250	0.5842 eV
0.03 µA	0.546 V	0.1875	0.5453 eV
0.04 µA	0.521 V	0.2500	0.5203 eV
0.05 µA	0.499 V	0.3125	0.4983 eV
0.06 µA	0.481 V	0.3750	0.4803 eV
0.07 µA	0.465 V	0.4375	0.4644 eV
0.08 µA	0.439 V	0.5000	0.4384 eV
0.09 µA	0.429 V	0.5625	0.4284 eV
0.10 µA	0.408 V	0.6250	0.4074 eV
0.11 µA	0.397 V	0.6875	0.3965 eV
0.12 µA	0.372 V	0.7500	0.3715 eV
0.13 µA	0.357 V	0.8125	0.3565 eV
0.14 µA	0.346 V	0.8750	0.3455 eV
0.15 µA	0.333 V	0.9375	0.3325 eV
0.16 µA	0.307 V	1.0000	0.3066 eV
0.17 µA	0.298 V	1.0625	0.2976 eV
0.18 µA	0.281 V	1.1250	0.2806 eV
0.19 µA	0.271 V	1.1875	0.2706 eV
0.20 µA	0.250 V	1.2500	0.2497 eV
0.21 µA	0.242 V	1.3125	0.2417 eV
0.22 µA	0.225 V	1.3750	0.2247 eV
0.23 µA	0.211 V	1.4375	0.2107 eV
0.24 µA	0.204 V	1.5000	0.2037 eV
0.25 µA	0.182 V	1.5625	0.1818 eV
0.26 µA	0.173 V	1.6250	0.1728 eV
0.27 µA	0.160 V	1.6875	0.1598 eV
0.28 µA	0.141 V	1.7500	0.1408 eV
0.29 µA	0.137 V	1.8125	0.1368 eV
0.30 µA	0.122 V	1.8750	0.1218 eV
0.31 µA	0.103 V	1.9375	0.1029 eV
0.32 µA	0.092 V	2.0000	0.0919 eV
0.33 µA	0.076 V	2.0625	0.0759 eV
0.34 µA	0.067 V	2.1250	0.0669 eV
0.35 µA	0.049 V	2.1875	0.0489 eV
0.36 µA	0.041 V	2.2500	0.0409 eV
0.37 µA	0.032 V	2.3125	0.0320 eV
0.38 µA	0.009 V	2.3750	0.0089 eV
0.39 µA	0.000 V	2.4375	0.0000 eV

**Tabla 22: Datos de Intensidad, Voltaje de Frenado, Número de Electrones y Energía del Electrón para color Amarillo.**

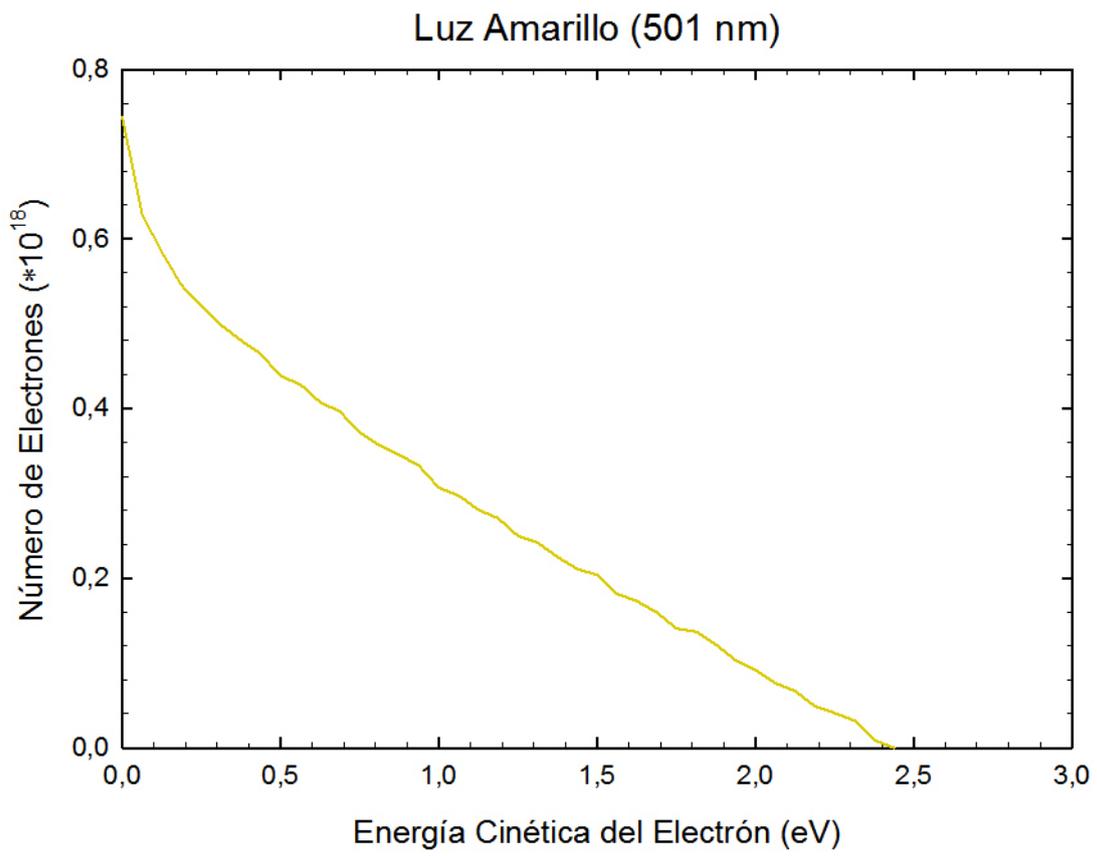


Figura 33: Relación Energía del Electrón-Número de Electrones para color Amarillo.

<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (V<sub>0</sub>)</i>	<i>Nº electrones (· 10<sup>18</sup>)</i>	<i>Energía electrón</i>
0.00 µA	0.626 V	0.0000	0.6251 eV
0.01 µA	0.493 V	0.0625	0.4923 eV
0.02 µA	0.469 V	0.1250	0.4684 eV
0.03 µA	0.431 V	0.1875	0.4304 eV
0.04 µA	0.409 V	0.2500	0.4084 eV
0.05 µA	0.395 V	0.3125	0.3945 eV
0.06 µA	0.371 V	0.3750	0.3705 eV
0.07 µA	0.357 V	0.4375	0.3565 eV
0.08 µA	0.341 V	0.5000	0.3405 eV
0.09 µA	0.324 V	0.5625	0.3236 eV
0.10 µA	0.303 V	0.6250	0.3026 eV
0.11 µA	0.288 V	0.6875	0.2876 eV
0.12 µA	0.278 V	0.7500	0.2776 eV
0.13 µA	0.261 V	0.8125	0.2606 eV
0.14 µA	0.244 V	0.8750	0.2437 eV
0.15 µA	0.225 V	0.9375	0.2247 eV
0.16 µA	0.210 V	1.0000	0.2097 eV
0.17 µA	0.195 V	1.0625	0.1947 eV
0.18 µA	0.186 V	1.1250	0.1857 eV
0.19 µA	0.162 V	1.1875	0.1618 eV
0.20 µA	0.148 V	1.2500	0.1478 eV
0.21 µA	0.136 V	1.3125	0.1358 eV
0.22 µA	0.124 V	1.3750	0.1238 eV
0.23 µA	0.107 V	1.4375	0.1069 eV
0.24 µA	0.090 V	1.5000	0.0899 eV
0.25 µA	0.075 V	1.5625	0.0749 eV
0.26 µA	0.066 V	1.6250	0.0659 eV
0.27 µA	0.050 V	1.6875	0.0499 eV
0.28 µA	0.029 V	1.7500	0.0290 eV
0.29 µA	0.000 V	1.8125	0.0000 eV

**Tabla 23: Datos de Intensidad, Voltaje de Frenado, Número de Electrones y Energía del Electrón para color Naranja.**

### Luz Naranja (522 nm)

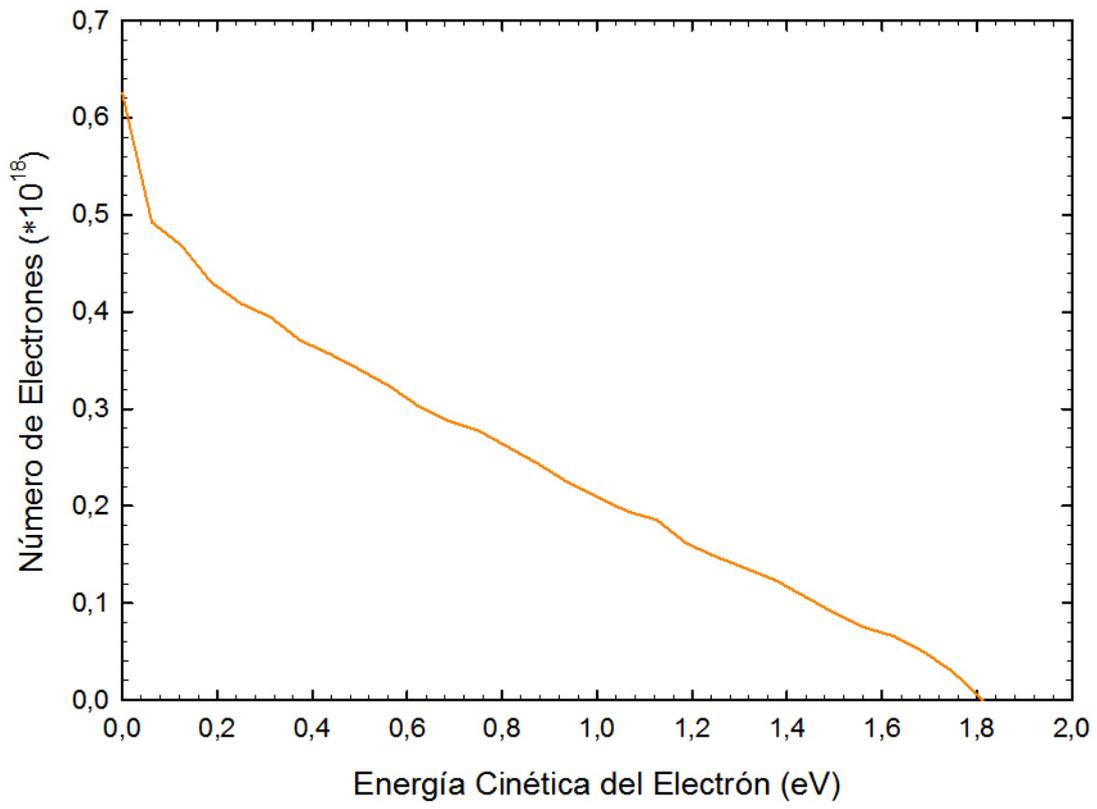


Figura 34: Relación Energía del Electrón-Número de Electrones para color Naranja.

<i>Intensidad (I)</i>	<i>Voltaje de frenado (V<sub>0</sub>)</i>	<i>Nº electrones (· 10<sup>18</sup>)</i>	<i>Energía electrón</i>
0.00 μA	0.415 V	0.0000	0.4144 eV
0.01 μA	0.291 V	0.0625	0.2906 eV
0.02 μA	0.246 V	0.1250	0.2457 eV
0.03 μA	0.216 V	0.1875	0.2157 eV
0.04 μA	0.194 V	0.2500	0.1937 eV
0.05 μA	0.167 V	0.3125	0.1668 eV
0.06 μA	0.143 V	0.3750	0.1428 eV
0.07 μA	0.129 V	0.4375	0.1288 eV
0.08 μA	0.098 V	0.5000	0.0979 eV
0.09 μA	0.075 V	0.5625	0.0749 eV
0.10 μA	0.069 V	0.6250	0.0689 eV
0.11 μA	0.051 V	0.6875	0.0509 eV
0.12 μA	0.022 V	0.7500	0.0220 eV
0.13 μA	0.000 V	0.8125	0.0000 eV

Tabla 24: Datos de Intensidad, Voltaje de Frenado, Número de Electrones y Energía del Electrón para color Rojo.

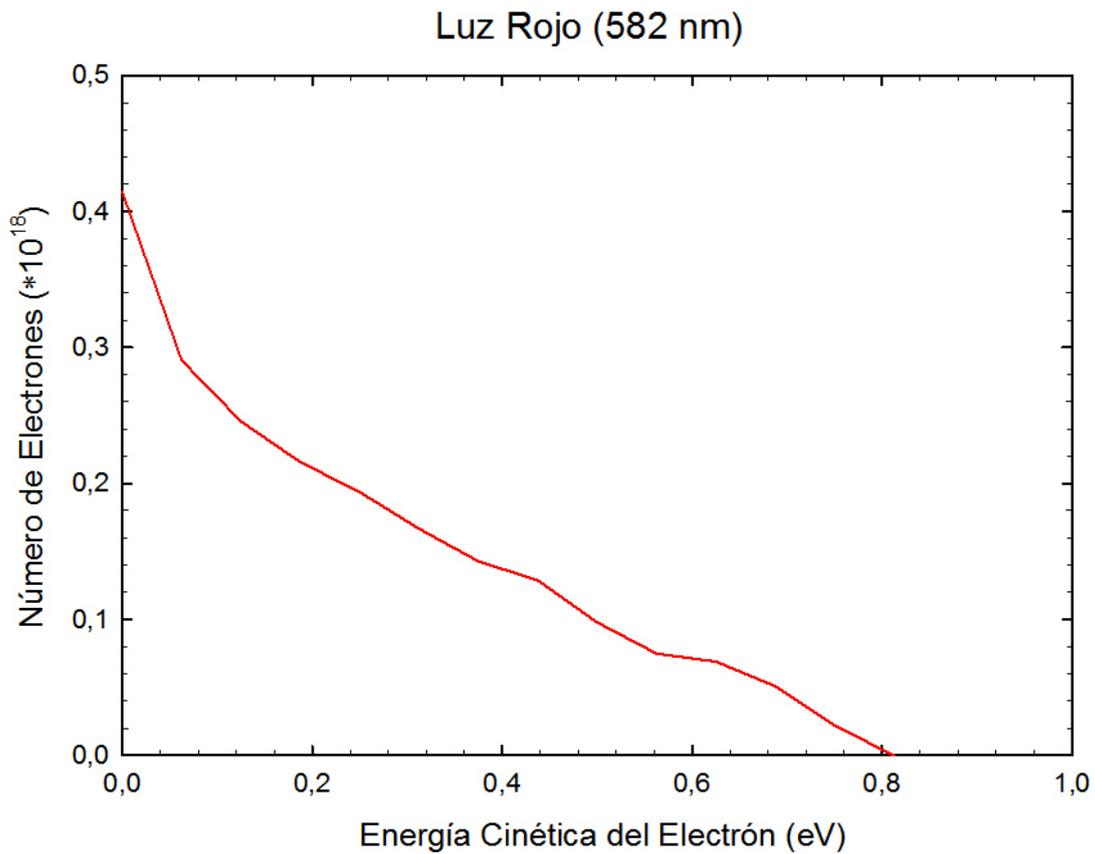


Figura 35: Relación Energía del Electrón-Número de Electrones para color Rojo.

Como se puede observar, obtenemos los resultados que esperábamos: la mayoría de los electrones generados presenta una energía cinética media-baja, mientras que sólo una minoría adquiere los valores más elevados de energía.

Este hecho se debe a lo que hemos explicado anteriormente. No todos los electrones se van a liberar con la misma energía, ya que un alto porcentaje tendrán una energía baja, liberándose antes, y, el resto, en menor proporción, tendrán una energía alta, liberándose posteriormente.

De esta manera, cuando vayamos aumentando el voltaje inverso, se irán frenando primero los electrones que cuenten con una menor energía, de manera que sólo vayan quedando los que tengan una energía más alta. Esto irá sucediendo así hasta que quede el último electrón sin frenar, que será aquel que mayor energía tenga de todos, y que lo frenará el voltaje de frenado ( $V_0$ ), que frenará toda corriente entre el cátodo y ánodo de nuestro fototubo.

A partir de las figuras presentadas en este apartado, podemos deducir, por ejemplo, el número de electrones con energía máxima, con la mitad de la energía máxima o con  $2/3$  de la energía máxima.

Para ello, tan sólo tenemos que acudir a cualquiera de las gráficas de un color determinado y fijarnos en las curvas. Si consideramos, por ejemplo, la curva del color azul, podemos diferenciar los datos mencionados (Figura 36).

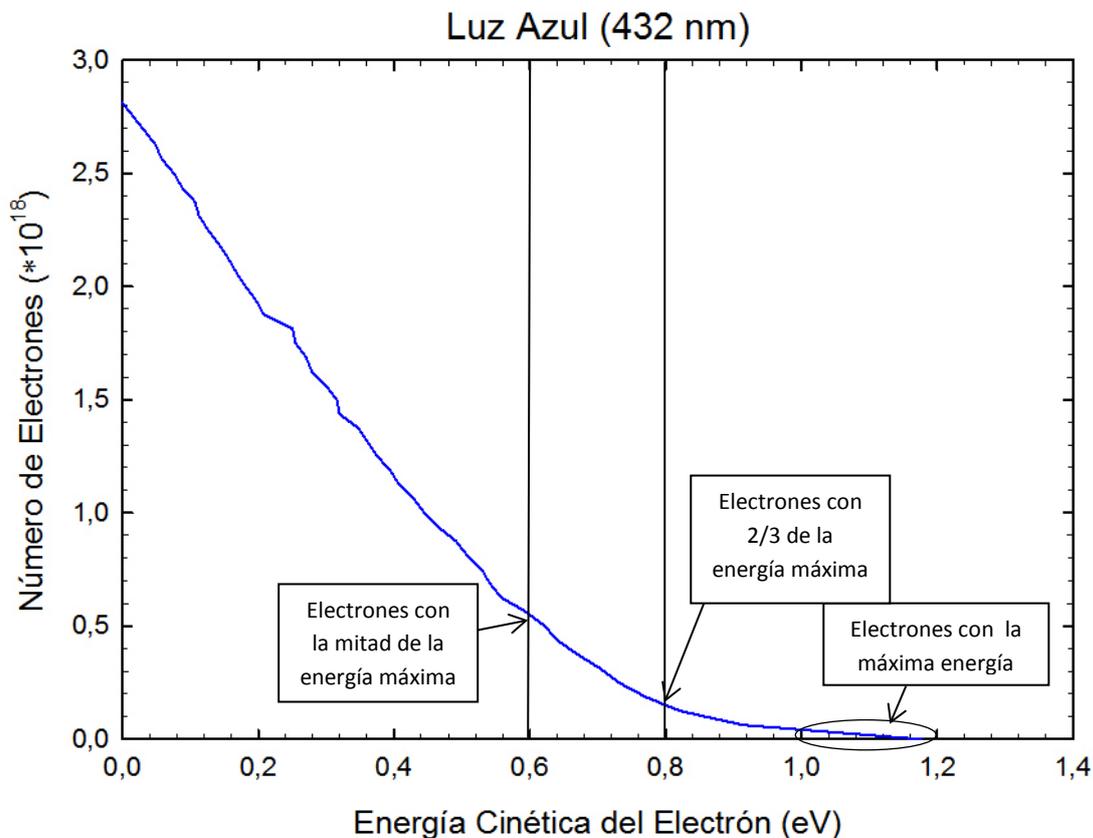


Figura 36: Determinación del número de electrones con la mitad de la energía máxima,  $2/3$  de la energía máxima y la máxima energía, para el caso del color Azul.

Cómo podemos ver, con energía máxima hay un número muy pequeño de electrones, por debajo de  $0.1 \cdot 10^{18}$ , ya que el final de la curva tiene una variación muy pequeña en comparación con el resto.

Pasaría igual con los electrones con  $2/3$  de la energía máxima, de los que habría, aproximadamente,  $0.2 \cdot 10^{18}$ , ya que esta proporción de energía es muy próxima a la máxima y no habría un gran número de electrones con tanta energía.

Por último, el número de electrones con la mitad de energía aumentaría un poco hasta  $0.6 \cdot 10^{18}$ , aproximadamente, pero seguiría siendo un número relativamente bajo.

Como se puede observar, y así comprobar todo lo descrito con anterioridad, el mayor número de electrones tendría una energía baja.

## Capítulo 5

# Conclusiones

### 5.1 Demostración del efecto fotoeléctrico

Hemos hecho incidir una luz procedente de una fuente luminosa en el fototubo de nuestro dispositivo para poder comprobar así la existencia del efecto fotoeléctrico.

Al hacer llegar esta luz al fototubo, los fotones que componen la misma incidirán sobre la superficie metálica del material. Cada fotón transmitirá su energía a un electrón y éste pasará a tener energía suficiente para ser liberado. Parte de esta energía se utilizará para elevar al electrón a la superficie del metal, otra parte permitirá al electrón liberarse de la atracción electrostática que ejerce la superficie del metal sobre él, y la energía restante dotará al electrón de movimiento (energía cinética), lo que le permitirá ir del cátodo al ánodo.

Al realizar este cambio del cátodo al ánodo se crea una pequeña corriente o intensidad debido al flujo de electrones, surgiendo así el efecto fotoeléctrico.

Hemos comprobado que, para todos los diferentes filtros de colores, este fenómeno se ha producido, ya que hemos medido corrientes del orden de  $\mu\text{A}$  comprobando que, efectivamente, hay un flujo de electrones que han sido liberados del cátodo al ánodo. Como cabía esperar, cuanto menor ha sido la longitud de onda (mayor frecuencia) de la luz, la intensidad ha sido mayor, ya que los fotones incidentes son cada vez más energéticos y pueden liberar electrones con mayor facilidad.

Por otra parte, se ha demostrado que el voltaje de frenado necesario disminuye a medida que lo hace la frecuencia (energía) de los fotones.

### 5.2 Cálculo de la Constante de Planck ( $h$ )

La finalidad de este experimento ha sido calcular, mediante un método basado en parámetros medidos, un valor lo más aproximado posible al exacto de la constante de Planck. De esta manera, hemos comprobado que las corrientes obtenidas por nuestro dispositivo (para el experimento de la comprobación de la existencia del efecto fotoeléctrico) son valores correctos que nos proporcionan magnitudes coherentes a la hora de realizar los cálculos con las diferentes ecuaciones necesarias.

Además, hemos obtenido un porcentaje de error muy pequeño, habiendo justificado este error por el manual de uso y funcionamiento del dispositivo. En este manual nos explica las pequeñas variaciones que se pueden producir debido a las contribuciones de luz no deseadas que llegan al ánodo, así como los factores propios del fototubo.

Teniendo en cuenta esto, podemos dar como muy aproximado y, por lo tanto, válido, el valor de la constante de Planck obtenido, comprobando una vez más la existencia del efecto fotoeléctrico.

### **5.3 Cálculo y representación de la energía cinética ( $E_c$ ) de los electrones y su velocidad ( $V$ ) en función de la longitud de onda ( $\lambda$ )**

Este experimento se basa en el cálculo de dos parámetros: la energía cinética y la velocidad de los electrones.

En primer lugar, hemos hallado la energía cinética y, con los valores obtenidos, hemos visto que se cumplen las relaciones descritas con las fórmulas, obteniendo así total coherencia en los cálculos y, una vez más, los valores que eran de esperar. En este sentido, se ha demostrado que, cuanto mayor sea la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la luz (menor la frecuencia), menor será la energía cinética ( $E_c$ ), y, por otra parte, la velocidad de los electrones disminuye con la longitud de onda.

### **5.4 Relación entre cantidad de iluminación e intensidad eléctrica generada**

Con este experimento, hemos podido comprobar que, a medida que aumentamos la apertura, es decir, la cantidad de luz que llega al fototubo, se producirá una mayor liberación de electrones y, por lo tanto, una mayor corriente o intensidad.

Vemos que se produce la curva esperada debida a la pantalla anti-luz sobre el ánodo, que cuando no dejamos pasar ningún tipo de luz, la medida de corriente será nula, y que el máximo lo alcanzaremos cuando quitamos las diferentes aperturas y entra así la máxima cantidad de luz. Todos estos hechos comprobarían que la cantidad de luz que dejamos llegar al fototubo influye en la cantidad de intensidad que se genera, es decir, al aumentar la luz aumentará el número de electrones liberados y la corriente será mayor. Por otra parte, hemos comprobado que los colores con una menor longitud de onda ( $\lambda$ ) como el azul (mayor frecuencia), tendrán intensidades mayores, ya que los fotones serán más energéticos y podrán liberar más cantidad de electrones. Por el contrario, el color rojo será el que menor intensidad genere.

Este experimento también lo desarrollamos con otro tipo de fuente luminosa que la proporcionada con el dispositivo, ya que el carácter de bajo contenido de azul o violeta de nuestro foco, hace que la intensidad del amarillo sea mayor en ocasiones que la del verde y azul, cosa que no tenía sentido. Repitiendo las medidas para una luz 100% blanca (con la misma cantidad de todos los colores) obtenemos los resultados esperados.

## **5.5 El voltaje de frenado no depende de la intensidad de iluminación**

En este experimento hemos demostrado que la cantidad de luz, o la intensidad de la misma, no influyen en la energía del fotón, ya que el voltaje de frenado permanece constante. Así, se ha podido constatar que la energía del fotón dependerá realmente de la longitud de onda que tenga la luz que hacemos incidir sobre el fototubo.

Las variaciones que se han observado en las mediciones del voltaje de frenado (que debe ser constante) son explicadas por los efectos no deseados producidos en el dispositivo, imposibles de evitar en su totalidad.

## **5.6 Distribución de energías de los electrones liberados**

Con las gráficas generadas, hemos comprobado cómo no todos los electrones van a contar con la misma cantidad de energía y, por lo tanto, no necesitarán la misma para liberarse. Un alto porcentaje tendrá una energía baja, liberándose antes y, el resto, tendrán una energía mayor.

Por tanto, en este apartado, también hemos obtenido resultados coherentes con las relaciones descritas por las fórmulas. Al ir aumentando el voltaje inverso, se irán frenando los electrones con menor energía, hasta llegar al voltaje de frenado, que frenará a los electrones con energía máxima y hará nula la corriente.

## **5.7 Dualidad de la luz (onda o partícula)**

A lo largo de la historia, ha habido diversas teorías acerca del carácter de la luz. Después de numerosos estudios y experimentos, como se ha indicado en la parte introductoria de este documento, se llegó a la conclusión de que la luz se comporta tanto como una onda como en forma de un flujo de partículas denominadas fotones.

Con los experimentos que hemos realizado a lo largo de este trabajo, en el que se han comprobado diversas características de la luz, hemos podido constatar esta dualidad en su comportamiento.

Por un lado, tenemos la luz como onda. Esto se puede haber percibido, simplemente, en el hecho de que cada color de luz se expresa con una longitud de onda diferente, desde la más corta que sería la azul, hasta la más larga que sería la roja, es decir, la luz presenta una frecuencia que la caracteriza como realidad ondulatoria.

Por otro lado, tenemos el comportamiento de la luz como partícula. Según hemos ido explicando a lo largo del estudio, la luz estará formada por fotones, que son partículas e interactuarán con otras como los electrones. Para ser más concretos, hemos podido constatar que un fotón se comporta como una partícula cuando transmite energía a un electrón, liberándolo, y dando lugar al efecto fotoeléctrico objeto de este trabajo fin de grado. Por lo tanto, la luz se comportará también como partícula.

De esta manera, con los experimentos llevados a cabo en este trabajo, ha quedado demostrada la dualidad onda-partícula en el comportamiento de la luz.

## Capítulo 6

# Bibliografía

- [1] J. Capmany, F.J. Fraile Peláez y J. Martí. “Fundamentos de Comunicaciones Ópticas”. Ed. Síntesis, Madrid, 1998, ISBN 84-7738-599-8.
- [2] “El efecto fotoeléctrico, o el descubrimiento del fotón y del carácter cuántico del mundo microscópico”. Universidad Técnica Federico Santa María, Abril 2006, Valparaíso, Chile.  
<http://docplayer.es/330649-O-el-descubrimiento-del-foton-y-del-caracter-cuatico-del-mundo-microscopico.html>
- [3] M. A. Rodríguez-Meza y J. L. Cervantes-Cota, “El efecto fotoeléctrico”. Universidad Autónoma del Estado de México, Enero 2006, México.  
<http://www.redalyc.org/pdf/104/10413309.pdf>
- [4] O. López Coronado, “Naturaleza Corpuscular de la Luz”. Noviembre 2006.  
<https://institucional.us.es/foros/read.php?126,115908,115987>
- [5] Manual del equipo de medición de Efecto Fotoeléctrico. Ventus Ciencia Experimental.