

Experimentos de Laboratorio para la correcta Comprensión del Efecto Fotoeléctrico en un Contexto de Enseñanza/Aprendizaje

Alba López-Segovia, Ignacio Rodríguez-Rodríguez, José-Víctor Rodríguez, Domingo Pardo-Quiles, and María Campo-Valera

Abstract— It is established that physics and engineering students struggle to effectively learn the physical foundations underpinning the photoelectric effect when taught solely via a theoretical approach. In response to this, and contrary to the approaches based on computer tutorials, this paper introduces a set of laboratory experiments that analyze the above phenomenon from a practical perspective. The aim hereby is to visually demonstrate and clarify the main concepts of the photoelectric effect using real equipment. Specifically, the relationship between incident lighting (across different wavelengths and intensities) and the generated photocurrent is studied using a specially designed simple device. The experiments furthermore calculate the Planck constant, elucidate the linear relationship between photon energy and frequency, and prove that the stopping voltage is independent of the incident light intensity. Hence, the proposed experiments may foster a deeper understanding of the corpuscular nature of light among students.

Index Terms— Engineering, Photoelectric effect, Quantum physics, Teaching of science.

I. INTRODUCCIÓN

EL aprendizaje basado en la experimentación es esencial para la correcta asimilación y comprensión de cualquier concepto que se estudie, resultando especialmente importante en la enseñanza de materias científicas [1-4]. De esta manera, una metodología consistente en la aplicación de conceptos teóricos en un contexto más práctico y empírico no solo promueve una comprensión más profunda y un mayor aprendizaje, sino que también puede propiciar la pasión por la ciencia y la investigación entre el cuerpo estudiantil. En este sentido, se ha comprobado que no resulta sencillo que los estudiantes de ingeniería aprendan adecuadamente los fundamentos físicos que subyacen tras el denominado efecto fotoeléctrico si únicamente se aborda dicho fenómeno a través de una mera aproximación

teórica. De esta manera, Steinberg et al. demostraron que, una vez concluida la docencia correspondiente, los estudiantes presentaban serias deficiencias en relación a los conceptos básicos que se encuentran detrás del efecto fotoeléctrico [5,6], por lo que los autores desarrollaron un tutorial por ordenador [7], alcanzando un éxito moderado. En la misma línea, De Leone y Oberem, aunque utilizaron el mismo tutorial informático que en [7], obtuvieron resultados similares en relación a la falta de comprensión —por parte de los alumnos— de la naturaleza corpuscular de la luz [8]. Las mismas conclusiones fueron también obtenidas en [9] por Knight cuando se pidió a los estudiantes que rellenaran varios cuestionarios acerca del aprendizaje adquirido respecto al efecto fotoeléctrico. De esta manera, con el fin de superar los problemas mencionados que surgen al enseñar dicho fenómeno físico, McKagan et al. presentaron en [10] una estrategia de aprendizaje basada en investigación al respecto que incluía simulaciones interactivas por ordenador y clases magistrales, así como problemas en forma de deberes. Los resultados mostraron que, tras la aplicación de dicha estrategia, la mayoría de los estudiantes eran capaces de predecir los resultados de experimentos relacionados con el efecto fotoeléctrico. Sin embargo, no tuvieron tanto éxito cuando intentaron establecer conexiones entre las observaciones y el aprendizaje subyacente. Trabajos más recientes también han intentado mejorar el aprendizaje de los estudiantes acerca del efecto fotoeléctrico, con distinto éxito, ya sea mediante simulaciones por ordenador [11,12], realidad virtual [13], laboratorios virtuales [14,15], juegos [16] o metodologías de aula invertida [17].

En cualquier caso, todos los enfoques mencionados anteriormente están basados bien en estrategias informáticas o de aprendizaje combinado y, en este sentido, se han reportado algunas limitaciones que han surgido a la hora de ser aplicados. Por tanto, en relación con todo lo anterior, en este trabajo, con el fin de proponer una nueva perspectiva a la hora de mejorar la comprensión del efecto fotoeléctrico por parte de los estudiantes, se presenta un conjunto de experimentos de laboratorio que pretenden analizar dicho fenómeno desde un punto de vista práctico, demostrando y clarificando así —de forma visual y con equipamiento real— los principales conceptos que subyacen tras el efecto fotoeléctrico. Así, utilizando un dispositivo diseñado específicamente para tal

A. López-Segovia, J.-V. Rodríguez, D. Pardo-Quiles, y M. Campo-Valera, Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, Antiguo Cuartel de Antigones, Plaza del Hospital, 1, 30202, Cartagena, Murcia, Spain. (tel: 34-968-326548; fax: 34-968-325973; e-mails: albalsg24@gmail.com, jvictor.rodriguez@upct.es, domingo.pardo@upct.es, maria.campo@upct.es).

I. Rodríguez-Rodríguez, Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, BioSIP Group, Universidad de Málaga, Av. Cervantes, 2, 29071, Málaga, Spain. (email: ignacio.rodriguez@ic.uma.es)

DOI (Digital Object Identifier) Pendiente

propósito, se investigará inicialmente la correlación entre la luz incidente y la corriente eléctrica producida (considerando varias longitudes de onda, así como intensidades). Adicionalmente, se estimará el valor de la constante de Planck, la relación entre la energía fotónica y la frecuencia (que será de comportamiento lineal), y se verificará la independencia del voltaje de frenado respecto a la intensidad lumínica incidente. En definitiva, a través de los experimentos propuestos, se espera que el alumno profundice en el conocimiento de la naturaleza corpuscular de la luz.

II. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO – CONTEXTO

El efecto fotoeléctrico se caracteriza como el fenómeno mediante el cual la incidencia de luz (compuesta por fotones) sobre un material conductor o semiconductor da lugar a la generación de una corriente eléctrica (producida por electrones). Durante este proceso, los fotones, como constituyentes de la luz, impactan contra los electrones presentes en los átomos de la superficie del material. Este impacto proporciona a los electrones la energía necesaria para superar la atracción electrostática del material conductor o semiconductor, lo que facilita su liberación y contribuye a la formación de un flujo de intensidad eléctrica. Dicho efecto se puede apreciar en los fotodetectores empleados en comunicaciones ópticas, donde la luz transmitida a través de las fibras ópticas es transformada en una señal eléctrica [18]. Por otro lado, el efecto fotoeléctrico se utiliza en las fotocélulas, que convierten también la luz en corriente eléctrica. Estos dispositivos se utilizan en diversas aplicaciones de detección de luz, como puertas automáticas, sistemas de seguridad y farolas [19]. Las células solares también se basan en el efecto fotoeléctrico, ya que convierten la luz solar en energía eléctrica. Estas células son un componente crucial de los denominados paneles solares, que se utilizan cada vez más para la generación de energías renovables [20]. Por su parte, los tubos fotomultiplicadores (PMT) son dispositivos sensibles a la detección de luz que utilizan el efecto fotoeléctrico para amplificar señales de luz débiles. Estos dispositivos se emplean en diversas aplicaciones, como experimentos de física de partículas, imágenes médicas y astronomía [21]. Por último, los dispositivos de carga acoplada (CCD) se utilizan ampliamente en la imagen digital y se basan en el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en señales eléctricas. Se utilizan en cámaras digitales, telescopios y diversos instrumentos científicos [22].

A. Teoría del Efecto Fotoeléctrico

La Fig. 1 proporciona una representación visual del mencionado efecto fotoeléctrico que tiene lugar en un montaje con polarización en directa. Este sistema incluye un tubo al vacío compuesto por un ánodo y un cátodo. Cuando un rayo de luz se proyecta sobre el cátodo, los electrones son liberados. Una vez que se suministra un voltaje positivo, tal y como se ilustra en la figura, se establece entre cátodo y ánodo un campo eléctrico, lo cual acelera las partículas electrónicas en dirección al ánodo, dando lugar a la formación de una intensidad en el sistema.

Es importante señalar que la liberación de electrones no se producirá si la frecuencia de la señal lumínica que incide es

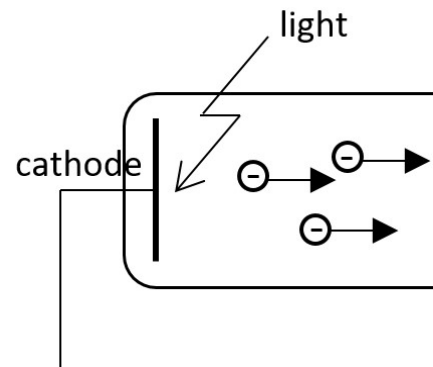


Fig. 1. Esquema del circuito con tubo de vacío y luz incidente en el cátodo.

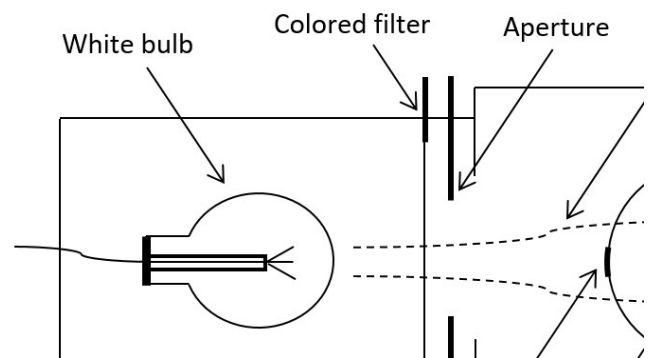


Fig. 2. Esquema del dispositivo diseñado para los experimentos.

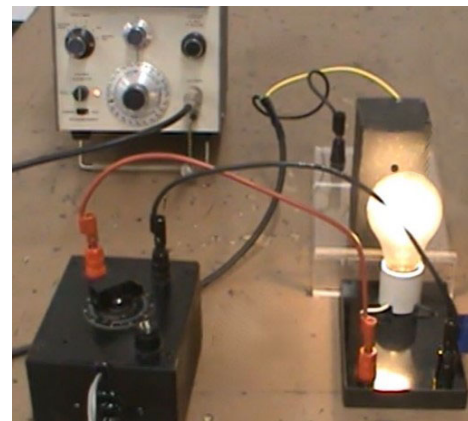


Fig. 3. Fotografía ilustrativa del montaje experimental.

inferior de una determinada magnitud crítica (f_0), más allá de la cantidad de luz incidente. Sin embargo, si la frecuencia sobrepasa este valor crítico, se dará lugar a una liberación de electrones de manera instantánea. Adicionalmente, al introducir un voltaje inverso, se observará que la tensión requerida para interrumpir la corriente (conocida como voltaje de frenado y representada por el parámetro V_0) permanecerá invariable respecto a la intensidad lumínica, dado que estará exclusivamente relacionada con su frecuencia.

Con el propósito de esclarecer la importancia de la frecuencia de la luz en el contexto del fenómeno estudiado, se retomó un planteamiento previamente planteado por Max

Planck, el cual fue recuperado por Einstein. Según esta idea, se postula que la radiación y la materia no transmiten energía de manera continua, sino que se encuentran en forma de entidades discretas llamadas cuantos, también conocidos como fotones. La magnitud de estos cuantos se encuentra directamente relacionada con la frecuencia de la onda correspondiente [23]:

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

siendo E_f la energía de la onda (es decir, de los corpúsculos que conforman la señal lumínica), h la constante de Planck y f la frecuencia de la señal electromagnética. Así, un rayo de luz con una frecuencia específica representa una sucesión de unidades discretas de luz, también conocidas como fotones, cuya frecuencia está intrínsecamente relacionada con su energía. La intensidad lumínica estará determinada por la proporción de fotones presentes en dicho haz. En el momento en el que esta señal lumínica impacta sobre un material metálico o semiconductor, la transferencia de energía se lleva a cabo mediante la interacción de los fotones con los electrones. Asumiendo que la energía del fotón (E_f) sea lo suficientemente alta, la partícula electrón acogerá una fracción de dicha energía y la empleará como una fuente de energía potencial (E_i) para desprenderse del material (la cual deberá ser igual a la función de trabajo W , definida como la energía que, como mínimo, tiene que darse para que el electrón se libere). El remanente de energía se manifestará como energía cinética (E_c), la cual determinará el movimiento del electrón [23]:

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

III. DISPOSITIVO DISEÑADO PARA LOS EXPERIMENTOS

En este trabajo, se ha considerado un dispositivo desarrollado *ad hoc* para la medida del efecto fotoeléctrico (cuyo esquema puede verse en la Fig. 2), que posibilita la transformación de fotones en electrones.

Como puede observarse en la Fig. 2, la luz es emitida, en primer lugar, por una bombilla blanca de 25-30 W y, posteriormente, atraviesa tanto un filtro de color (azul, verde, amarillo, naranja o rojo, con el fin de seleccionar diferentes frecuencias/longitudes de onda de la luz) como una determinada apertura (de 7 mm, 10 mm, 14 mm o 20 mm de diámetro, para poder elegir diversas intensidades de luz que incidán sobre el fototubo). La distancia de la bombilla al filtro de color es de 4.5 cm y al ánodo es de 7 cm.

El fototubo es la parte fundamental del dispositivo. Consiste en un tubo de vidrio, que se encuentra al vacío, y en cuyo interior hay dos electrodos: uno en forma de semicilindro metálico de 1.5 cm de radio (el cátodo, hecho de óxido de plata recubierto de cesio) y otro en forma de varilla metálica rectilínea (el ánodo, compuesto de oro), situado aproximadamente en el foco de la superficie curva del cátodo. En la Fig. 3, se puede observar una fotografía ilustrativa del montaje experimental. Cabe señalar que el fototubo se

encuentra dentro de la caja negra, en la que se ha practicado la correspondiente apertura.

La emisión de electrones se desencadena cuando los fotones de luz interactúan con el metal que conforma el cátodo,

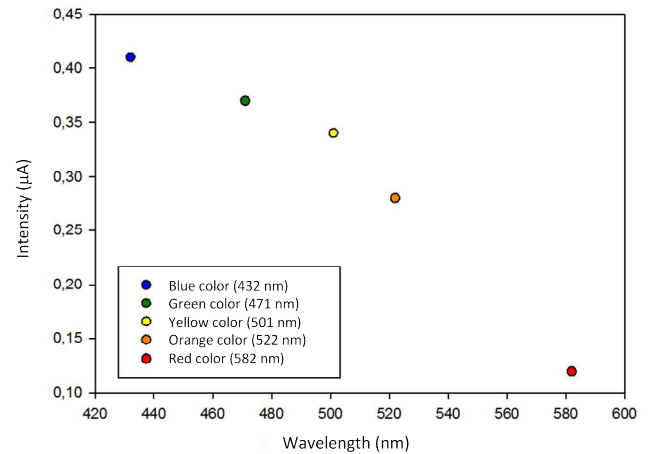


Fig. 4. Intensidad de corriente producida para cada longitud de onda de la señal luminosa incidente.

transfiriendo su energía a los electrones en ella presentes. Esta transmisión de energía impulsa a los electrones, provocando su ascenso hacia la superficie del material catódico. Superando su tendencia natural a permanecer en la superficie, estos electrones atraviesan el vacío en dirección al electrodo del ánodo. Con la luz impactando sobre el cátodo de manera continua, esta secuencia de eventos ocurre innumerables veces por segundo, generando una mínima corriente eléctrica que circula de forma constante entre cátodo y ánodo.

Hay que tener en cuenta que, en principio, la luz incidente sobre el fototubo también podría hacerlo sobre la superficie metálica del ánodo, liberando así algunos electrones adicionales desde la misma, y provocando un efecto fotoeléctrico indeseado que podría afectar ligeramente a los resultados alcanzados en los diferentes experimentos que se realicen. Adicionalmente, determinadas reflexiones originadas en la bombilla de vidrio podrían incidir en el electrodo del ánodo, desencadenando la emisión no deseada de electrones. Este fenómeno podría perturbar el flujo normal de electrones desde el cátodo hacia el ánodo y, por ende, puede originar ciertas imprecisiones que afectarían primordialmente a la medición precisa del voltaje de frenado requerido para cesar el tránsito de electrones partiendo del cátodo en dirección al ánodo. En aras de reducir dicha inexactitud en las mediciones, se dispuso un pequeño escudo en forma de tapa en el bulbo de vidrio del fototubo para resguardar el electrodo del ánodo de la luz directa (Fig. 2). No obstante, este error nunca se eliminará del todo, dado que resulta complicado evitar los rayos reflejados en el interior del tubo.

A lo largo de la realización de los experimentos, la fuente de luz experimentará un incremento de temperatura, por lo que es crucial no mantenerla activa durante extensos períodos sin la debida supervisión para prevenir posibles escenarios de sobrecalentamiento. Esta elevación de la temperatura podría

tener un impacto en los resultados finales. Además, al llevar a cabo los experimentos, es imprescindible que únicamente la luz que previamente ha atravesado los filtros alcance el fototubo, y que la fuente esté adecuadamente instalada de manera que sólo la luz que ella genera pueda ingresar al tubo.

IV. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

A. Comprobación del Efecto Fotoeléctrico

1) Teoría subyacente al experimento

En este experimento preliminar, la meta es confirmar la presencia del efecto fotoeléctrico tal como se describió anteriormente. Para alcanzar este propósito, el dispositivo de medición debe ser empleado de tal manera que la luz proveniente de la fuente ilumine el fototubo, creando así una corriente eléctrica o intensidad (I) resultante del tránsito de electrones libres partiendo del cátodo metálico hacia el ánodo. Posteriormente, al determinar la corriente eléctrica, es factible deducir el valor del voltaje de frenado V_0 requerido para interrumpir el traslado de partículas electrónicas desde el cátodo hasta el ánodo.

Durante la realización de este experimento, todos los valores se midieron siete veces, con el fin de obtener una media y minimizar los efectos no deseados causados por los reflejos de luz que llegan directamente al ánodo.

2) Medidas y Resultados

Este experimento se fundamentará en las bases teóricas presentadas en las secciones precedentes para evidenciar el efecto fotoeléctrico considerando diferentes filtros de color colocados después de la bombilla. En total, se utilizarán cinco filtros cromáticos: el rojo, con una longitud de onda de 582 nm, el naranja de 522 nm, el amarillo con 501 nm, el verde con 471 nm y el azul de 432 nm. Utilizando estos valores de longitud de onda (λ), y aplicando la ecuación correspondiente, se puede calcular la frecuencia (f) correspondiente a cada filtro, teniendo en cuenta que la constante de la velocidad de la luz en el vacío (c) es $c=3 \cdot 10^8$ m/s [23]:

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

A través de la utilización de cada uno de los filtros de color, se puede cuantificar tanto la intensidad producida debido al tránsito de electrones liberados por la señal lumínica incidente como el voltaje de frenado requerido con el fin de detener dicho flujo. En la Fig. 4, podemos observar la corriente eléctrica producida en relación con la longitud de onda de la señal lumínica incidente. Como se aprecia, una longitud de onda más corta (mayor frecuencia) produce una mayor intensidad, dado que los fotones que inciden poseen más energía y son capaces de producir la liberación electrónica con más fácilmente.

En la Fig. 5, se presenta el voltaje de frenado correlacionado con la frecuencia lumínica. Como evidencia la representación, y de manera predecible, el voltaje de frenado requerido se reduce conforme disminuye la frecuencia (es

decir, la energía) de las partículas de luz, dando lugar a la línea de regresión derivada de los valores observados.

Además, podemos extraer dos magnitudes de interés: la primera es la función de trabajo (W), que se encuentra cuando $f=0$, y se sitúa en 1.8182 eV. En segundo lugar, tenemos la

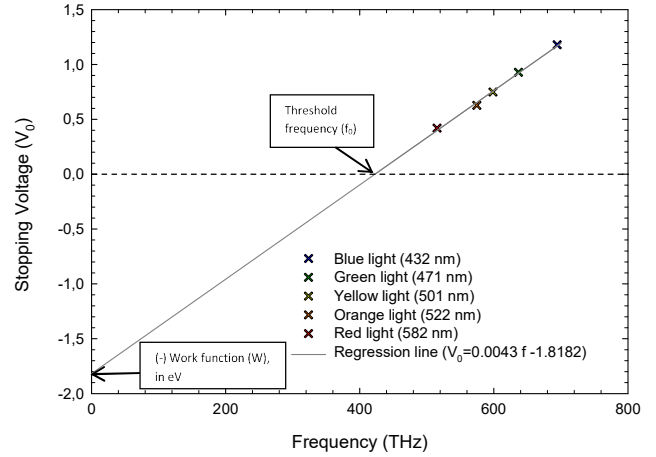


Fig. 5. Voltaje de frenado para cada frecuencia de la señal luminosa incidente.

denominada frecuencia umbral (f_0). Dicha magnitud se puede deducir de forma precisa mediante la ecuación lineal obtenida $V_0=0.0043 \cdot f-1.8182$ (como se ilustra en la Fig. 5), suponiendo que $V_0=0$:

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

B. Obtención de la Constante de Planck (h)

Considerando como ($q_e \cdot V_0$) la energía requerida para parar los electrones libres e impedir su llegada al ánodo, donde q_e se corresponde con la carga de un electrón ($q_e=1.6 \cdot 10^{-19}$ C), y teniendo en cuenta (2), podemos establecer una equivalencia con la energía cinética de los electrones, obteniendo la siguiente ecuación:

$$q_e \cdot V_0 = h \cdot f - W \quad (5)$$

Consecuentemente, con el fin de obtener la constante de Planck, consideraremos (5):

$$h = \frac{W + V_0 \cdot q_e}{f} \quad (6)$$

Hemos determinado previamente la función de trabajo (W) con un valor asignado de 1.8182 eV. Con respecto a las magnitudes del voltaje de frenado (V_0) y la frecuencia (f), nos enfocaremos en el punto en el que se ubica la frecuencia umbral (f_0), esto es, cuando el voltaje de frenado se aproxima a cero, con un valor de frecuencia umbral que se sitúa en los 422.84 THz:

$$h = \frac{1.8182 + 0.1.6 \cdot 10^{-19}}{422.84 \cdot 10^{12}} = 4.300 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (7)$$

En función del rendimiento específico y eficacia del tubo fotoeléctrico, se podría prever un margen de error de hasta un 10% en la determinación de la constante de Planck (h), o incluso superior, aunque la incidencia de tal eventualidad es más baja. Dado que la constante de Planck presenta una magnitud teórica de $4.4 \cdot 10^{-15}$ eV-s, el error resultante se situaría en el 3.84%. Este valor se encuentra, tal como se ha indicado, dentro de las estimaciones de error tolerables.

C. Corriente Eléctrica Producida en Función de la Intensidad de Luz Incidente

1) Teoría subyacente al experimento

Este apartado busca examinar qué cambio cabe esperar en la señal eléctrica producida en el fototubo al modificar el grado de luminosidad a través de orificios de 7 mm, 10 mm, 14 mm y 20 mm de diámetro. Además, se aplicarán distintos filtros cromáticos para analizar el impacto de la modificación de la luminosidad en cada caso. Posteriormente, se conformará una gráfica que correlacione la corriente registrada en el tubo con el área del orificio lumínico empleado para la medida.

Bajo diferentes premisas teóricas, es conocido que, al disminuir la cantidad total de luz, la intensidad eléctrica del cátodo disminuirá, puesto que habrá una reducción en la cantidad de electrones liberados por las partículas de luz que impactan sobre el cátodo. Por consiguiente, el propósito es corroborar esta suposición teórica realizando mediciones y elaborando el gráfico previamente mencionado.

2) Medidas y Resultados

La idea es llevar a cabo la medición de la corriente existente en el tubo considerando las diversas aperturas y los filtros cromáticos. La Fig. 6 presenta en un gráfico todos los valores registrados para evaluar si los resultados alcanzados son consistentes con la fundamentación teórica.

Como se aprecia, con el incremento del área del orificio, se percibe un aumento de la corriente producida en el tubo. Este fenómeno responde a la afirmación previamente descrita: si la apertura es mayor, la proporción de luz que alcanza el fototubo será también superior, lo que provocará que un mayor número de partículas de luz incidan sobre el cátodo, generando un mayor número de electrones libres y, por consiguiente, una corriente eléctrica más elevada.

El valor nulo al que convergen las curvas en el origen del eje de abscisas se corresponde con la situación en la que no existe apertura alguna (el fototubo está completamente tapado, o lo que es lo mismo, el área de la apertura equivale a 0 mm^2) y la intensidad eléctrica en esta situación sería inexistente, dado que no se admite luz. Así mismo, se observa cómo los colores de una longitud de onda inferior, como es el caso del azul (mayor frecuencia), poseerán corrientes más elevadas, lo

cual está en concordancia con el desarrollo teórico indicado en los apartados anteriores, puesto que las partículas de luz tendrán más energía y podrán convertir un mayor número de electrones en partículas libres. En contraposición, el color rojo es el que genera una menor intensidad.

No obstante, al examinar el gráfico, se percibe una particularidad que, teóricamente, no parece lógica: la curva

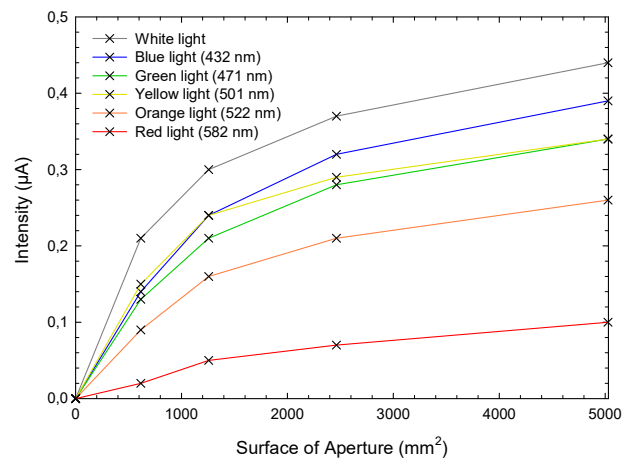


Fig. 6. Corriente eléctrica para cada superficie de la apertura.

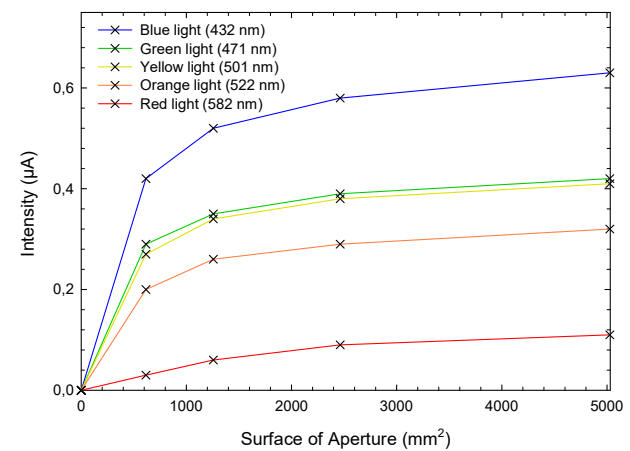


Fig. 7. Corriente eléctrica para cada superficie de la apertura, cuando se considera una fuente lumínica de un blanco perfecto.

correspondiente al color amarillo (501 nm) supera a la del color verde (471 nm) y, en ciertos segmentos, incluso supera a la del color azul (432 nm), a pesar de que la primera tiene una longitud de onda superior, lo que resulta contradictorio con la teoría. Una explicación plausible es que la fuente de luz del dispositivo construido no posee una alta concentración en azul o violeta, pero sí que la alberga en amarillo. Este hecho sugiere que la fuente lumínica con la que estamos llevando a cabo las mediciones no es perfectamente blanca, lo cual podría alterar los resultados obtenidos, distorsionándolos de alguna manera, especialmente en relación con el color amarillo.

Para verificar esta suposición, se sustituyó la bombilla del aparato por una fuente lumínica de un blanco perfecto,

garantizando que ninguna otra clase de señal luminosa alcanzara el tubo, y se repitieron las mediciones. Los resultados se presentan en la Fig. 7, y ahora se puede observar cómo las curvas se alinean de acuerdo con lo esperado a partir de la teoría, confirmando que la bombilla anterior generaba el efecto indeseado apreciado en la Fig. 6.

D. Independencia del Voltaje de Frenado con la Intensidad de la Luz

1) Teoría subyacente al experimento

Como se ha apuntado en instancias anteriores, es posible computar la energía (en particular, cinética) de los electrones utilizando un voltaje de frenado de signo opuesto a la polaridad del fototubo. Esto permite precisar la magnitud energética necesaria para la paralización total de los electrones, conduciendo al cese del tránsito de electrones entre los electrodos, específicamente entre el cátodo y el ánodo. Con la intensidad anulada, el voltaje de frenado registrado constituye un baremo de los electrones con mayor energía. Esto implica que los referidos electrones han sido estimulados por los fotones que poseen la mayor frecuencia, o lo que es equivalente, la menor longitud de onda de la señal luminosa que incide en el tubo.

La utilización de distintos filtros de color propiciará que las frecuencias máximas se asocien con sus correspondientes longitudes de onda. Esto conllevará a la necesidad de ajustar el voltaje de frenado para interrumpir la intensidad eléctrica surgida, como se ha evidenciado en apartados precedentes. Según se conoce, la energía que el fotón cede al electrón está condicionada por la longitud de onda de la señal luminosa que impacta. Adicionalmente, el uso de orificios de distinto tamaño tiene el objetivo de verificar, para un color particular, que las variaciones en la intensidad de luz no debieran alterar el voltaje de frenado requerido para cesar el tránsito de electrones producido.

De lo anterior se infiere que la energía intrínseca de un fotón lumínico es función de su longitud de onda y no de la intensidad de luz que impacta sobre el tubo. En consecuencia, se espera que el voltaje de frenado permanezca inalterable, puesto que la energía de las partículas de luz se mantiene constante, a pesar de que la intensidad de la luz incidente y, por ende, la intensidad eléctrica generada se vean incrementadas.

Se tomarán en consideración las distintas aperturas del dispositivo y, de manera simultánea, se emplearán los diversos filtros cromáticos con el fin de evaluar su influencia. Para verificarlo, se creará una representación gráfica que refleje el valor de las aperturas en relación con la intensidad eléctrica originada y el voltaje de frenado para cada filtro cromático. Así, se espera un aumento en la intensidad eléctrica, como se ha constatado previamente, pero se prevé que el voltaje de frenado mantenga un comportamiento aproximadamente constante.

2) Medidas y Resultados

Con el fin de obtener los datos requeridos para este

experimento, se seguirán los mismos procedimientos que en el anterior, con la diferencia de que, además de la corriente, se tomará medida del voltaje de frenado.

En la Fig. 8, se presentan los datos recabados, junto con las conclusiones correspondientes.

Como puede apreciarse, el voltaje de frenado permanece esencialmente constante al variar la cantidad de señal luminosa,

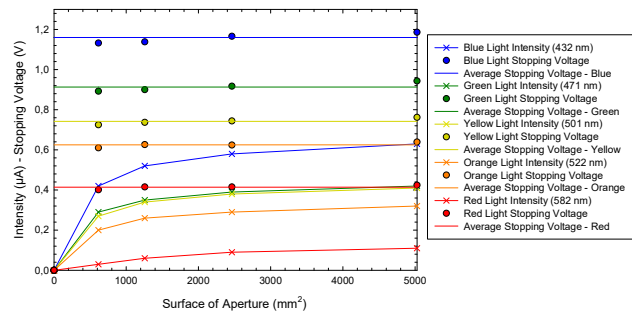


Fig. 8. Intensidad - Voltaje de Frenado para cada superficie de la apertura.

para todos los filtros cromáticos, aunque se aprecian mínimas fluctuaciones en este voltaje de frenado para cada filtro. Considerando el azul, habría una discrepancia entre la magnitud máxima y mínima de 0.054 V, de 0.051 V en el caso del verde, 0.037 V con el amarillo, 0.029 V para el naranja y 0.023 V en el rojo.

A pesar de que estas magnitudes debieran ser nulas, se registran ciertas fluctuaciones provocadas por los efectos indeseados que ya han sido mencionados en apartados previos (causados por reflexiones de luz que alcanzan directamente al ánodo), por lo que las mediciones se efectuaron varias veces y se calculó una media. Al obtener este valor medio, se reduce el error que surge en los valores del voltaje de frenado, aunque no puede ser eliminado por completo y, por esta razón, se dan estas inevitables pequeñas fluctuaciones.

Por consiguiente, a pesar de las fluctuaciones indicadas con anterioridad, se obtiene un voltaje de frenado bastante parecido considerando todos los posibles orificios y los distintos filtros cromáticos, lo que demuestra que la intensidad de luz no está relacionada con la energía de las partículas de luz. Se ha obtenido un voltaje de frenado medio para el azul de 1.16 V, 0.913 V para el verde, 0.742 V para el amarillo, 0.625 V para el naranja y 0.414 V para el rojo. Adicionalmente, se verifica nuevamente que el voltaje medio de frenado requerido se reduce conforme desciende la frecuencia de las partículas de luz. Además, se observa que la intensidad eléctrica sigue un comportamiento similar al del experimento anterior: la intensidad eléctrica se incrementa a medida que aumenta la cantidad de luz introducida en el fototubo.

Teniendo en cuenta lo previamente expuesto, es relevante indicar que todas las premisas que deberían manifestarse de acuerdo a la teoría propuesta efectivamente se observan. Esto confirma el hecho de que la energía de las partículas de luz no está influenciada por la cantidad de señal luminosa que incide sobre el tubo, pero sí está vinculada a la longitud de onda

(frecuencia) de dicha señal.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha presentado una secuencia de experimentos de laboratorio, ejecutados mediante un dispositivo sencillo diseñado específicamente para este propósito, con el objetivo de enriquecer la comprensión de los principios fundamentales que generan el efecto fotoeléctrico, todo ello enmarcado en un ámbito educativo de física e ingeniería. De esta manera, se ha corroborado experimentalmente que la corriente generada se incrementa con la disminución de la longitud de onda (o aumento de la frecuencia) de la luz que incide en la superficie metálica del cátodo, debido a que los fotones con mayor energía facilitan la liberación de electrones. Se ha observado también que el voltaje requerido para frenar la corriente disminuye con la reducción de la frecuencia (o energía) de las partículas de la luz, y los datos registrados generan una representación gráfica lineal. Se ha calculado el valor de la constante de Planck con una desviación inferior al 4%, y se ha validado que el incremento en el área de las aperturas lumínicas conlleva a una mayor señal eléctrica generada por el fototubo. Por último, se ha evidenciado que el voltaje de frenado no está vinculado a la cantidad de la luz incidente. En resumen, todas estas observaciones buscan profundizar la comprensión del estudiante respecto a la característica corpuscular de la luz.

REFERENCIAS

- [1] L. D. Feisel y A. J. Rosa. "The role of the laboratory in undergraduate engineering education". *J Eng Educ*, 2005, vol. 94, pp. 121–130.
- [2] A. Pilot y A. M. W. Bulte. "Why do you "need to know"? Context-based education". *International Journal of Science Education*, 2006, vol. 28, issue 9, pp. 953-956.
- [3] A. Pilot y A. M. W. Bulte. "The use of "contexts" as a challenge for the chemistry curriculum: Its successes and the need for further development and understanding". *International Journal of Science Education*, 2006, vol. 28, issue 9, pp. 1087-1112.
- [4] R. Calvo, L. Markauskaite y K. Trigwell. "Factors affecting students' experiences and satisfaction about teaching quality in engineering". *Australian J Eng Educ*, 2010, vol. 16, pp. 139–148.
- [5] R. N. Steinberg, G. E. Oberem, y L. C. McDermott. "Development of a computer-based tutorial on the photoelectric effect". *Am. J. Phys.*, 1996, vol. 64, pp. 1370–1379.
- [6] R. N. Steinberg y G. E. Oberem. "Research-based instructional software in modern physics". *J. Comp. Math. Sci. Teach.*, 2000, vol. 19, pp. 115–136.
- [7] G. E. Oberem y R. N. Steinberg, "Photoelectric Tutor" (Physics Academic Software, American Institute of Physics, College Park, MD, 1999).
- [8] C. J. De Leone y G. E. Oberem. "Towards understanding student conceptions of the photoelectric effect", in 2003 *Physics Education Research Conference Proceedings*.
- [9] R. Knight. "Five Easy Lessons: Strategies for Successful Physics Teaching". Addison-Wesley: San Francisco, 2004.
- [10] S. Mckagan, W. Handley, K. Perkins, y C. Wieman. "A Research-Based Curriculum for Teaching the Photoelectric Effect". *Am. J. Phys.*, 2009, vol. 77, pp 87-94.

- [11] Ö Fatih y Ö. Esra-Bilal. "Teaching Photoelectric Effect with Simulation Supported Inquiry Based Activity". *Inonu University Journal of the Faculty of Education (INUJFE)*, 2018, vol. 19, issue 3, pp. 57-73.
- [12] B. Kunnath, y J. Kriek. "Exploring effective pedagogies using computer simulations to improve Grade 12 learners' understanding of the photoelectric effect", *African Journal of Research in Mathematics, Science and Technology Education*, 2018, vol. 22, issue 3, pp. 329-339.
- [13] W. Tarnag, C.-Y. Lee, C.-M. Lin y W.-H. Chen. "Applications of virtual reality in learning the photoelectric effect of liquid crystal display". *Computer Applications in Engineering Education*, 2018, vol. 26, issue 6, pp. 1956-1967.
- [14] S. Sutarno, A. Setiawan, I. Kaniawati y A. Suhandi. "The development of higher order thinking virtual laboratory on photoelectric effect", *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1157, issue 3, 032034.
- [15] Supurwoko, Cari, Sarwanto, Sukarmin, R. Budiharti y T. S. Dewi. "Virtual Lab Experiment: Physics Educational Technology (PhET) Photo Electric Effect for Senior High School". *Int. J. Sci. Appl. Sci.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 2, no. 1.
- [16] T. Namgyel, y K. Buaraphan. "The development of simulation and game in 5E learning cycle to teach photoelectric effect for grade 12 students". *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 2017, vol. 18, issue 2, Article 1, p.1.
- [17] A. Pattiserlihun, y S. J. J. Setiadi "Blended-flipped classroom learning for physics students with the topic of the photoelectric effect". *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA*, 2020, vol. 6, n. 1, pp. 71–78.
- [18] H. Melchior, M. B. Fisher, y F. R. Arams. "Photodetectors for optical communication systems". *Proceedings of the IEEE*, 1970, vol. 58, issue 10, pp. 1466-1486.
- [19] R. S. Sedha. "A textbook of applied electronics". S. Chand Publishing, 2008.
- [20] J. Perlin. "From space to earth: the story of solar electricity". Earthscan, 1999.
- [21] G. F. Knoll. "Radiation detection and measurement". John Wiley & Sons, 2010.
- [22] J. R. Janesick, T. Elliott, S. Collins, M. M. Blouke, y Freeman, J. "Scientific charge-coupled devices". *Optical Engineering*, 1987, vol. 26, issue 8, pp. 692-714.
- [23] R. A. Serway y J. W. Jewett. "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics", 2019, 10th ed., Cengage.



Alba López-Segovia was born in Lorca, Murcia, Spain, in 1994. He received the Telecommunications Systems Engineering degree from the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Spain, in 2017, and the M.Sc. in Telecommunication Engineering from the UPCT, Spain, in 2019.

She is currently a technology consultant in Deloitte. Her research interests include the modeling of radio wave propagation as well as optics.



José-Victor Rodríguez was born in Murcia, Spain, in 1975. He received the Telecommunications Engineering degree from the Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Spain, in 2001 —after doing his graduate thesis at the Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden, in collaboration with Ericsson Mobile Communications AB—, and the Ph.D. in Communications Engineering from the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT),

Spain, in 2006. In 2002, he joined the Department of Information Technologies and Communications, at the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Spain, where he is currently a Full Professor. His research

interests include the modeling of radio-wave propagation in the mobile environment, with an emphasis on multiple-building diffraction.



Ignacio Rodríguez-Rodríguez was born in Murcia, Spain, in 1980. He received the Technical Industrial Engineering degree from the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Spain, in 2001 and the Superior Industrial Engineering degree from the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Spain, in 2004. In 2015, he joined the Department of Information and Communications Engineering, at the Universidad de Murcia (UMU), Spain, where

he received the PhD in Computer Science. He currently works on a postdoctoral contract at the Telecommunications School at the University of Malaga, Spain. His fields of interest include the application of machine learning to biomedical signals, having works in other fields such as radio wave diffraction.



Domingo Pardo-Quiles was born in Albox (Almería), Spain, in 1974. He received the Telecommunications Engineering degree from the Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Spain, in 1998, and the Ph.D. in Communications Engineering from the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Spain, in 2021 (UPCT). From 1999 to 2000, he has been an Ericsson engineer involved in the roll out of cell networks in

Spain. From 2000 until now, he has belonged to Navantía Cartagena Shipyard where he is responsible of Sonar Systems. He is currently lecturer at the Information Technologies and Communications Department (TIC) of the UPCT. His research activities have focused on acoustic propagation models, underwater sensors and radiowave propagation.



María Campo-Valera was born in Santa Marta, Colombia, in 1984. She received the BSc Degree in Sound Engineering from the San Buenaventura University, Bogotá, Colombia, in 2009. In 2016, she received the MSc Degree in Acoustic Engineering from the Universitat Politècnica de València (UPV), Spain. In 2020, she received the PhD Degree from the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Spain, awarded with Summa Cum Laude. In January 2021, she was a postdoctoral researcher with the Group of Electromagnetism Applied to Telecommunications (GEAT) at

UPCT, working on the development of educational initiatives for the manufacture of low-cost leaky-wave antennas. In 2021, she was also a visiting researcher at the Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla (ENAP), Cartagena de Indias, Colombia. In January 2022, she joined the University of Málaga, Spain, as a postdoctoral researcher with the Communications Engineering Department. She was awarded a competitive 2-year grant, named Margarita Salas (fully funded by the European Commission) to do research on underwater acoustic and antennas. Her current research interests include signal processing, sensor design, nonlinear acoustic and underwater acoustic communications. Dr. Campo-Valera is an active reviewer for various top journals.