

FÍSICA ELECTRÓNICA

TP #2

EFFECTO FOTOELÉCTRICO

Docentes:

MSc. Ing. Edgardo Porral

Ing. Gerardo Bataglia

Ing. Iván Reyes

Ing. Alfredo Rivas

Contenidos del Trabajo Práctico

TP #2 – Efecto fotoeléctrico

1. Objetivos de la experiencia	2
2. Marco teórico	2
3. Montaje experimental.....	5
4. Mediciones y elaboración de datos	14
5. Anexos	14
6. Bibliografía	14

1. Objetivos de la experiencia

- a) Comprobar la existencia del fenómeno.
- b) Verificar la validez de la ecuación de Einstein.
- c) Mediante la elaboración de los datos obtenidos de las mediciones, determinar el valor de la constante de Planck.



Más adelante encontrará símbolos como éste. Intente responder antes de continuar su lectura. Este procedimiento lo ayudará en su comprensión del ensayo.

2. Marco teórico

Breve reseña histórica del fenómeno

Hacia fines del siglo pasado algunos hechos experimentales, habían permitido afirmar la existencia de cierta interacción entre la luz y la materia. Por ejemplo, en 1887 Hertz descubrió que, en idénticas condiciones, una chispa eléctrica podía saltar desde un electrodo cargado a otro a través de una distancia mayor, cuando se iluminaban los electrodos con una luz ultravioleta que cuando esto no se hacía. Hallwachs, en 1888, hizo notar que una placa de zinc aislada y descargada expuesta a luz ultravioleta, se cargaba positivamente.

Hallwachs, sugirió entonces que la luz incidente producía la emisión de partículas cargadas negativamente de la placa de zinc, y que dichas partículas no podían escaparse y revelar su efecto cuando la placa tenía una fuerte carga positiva.

Posteriormente Thomson, comprobó que las partículas tenían carga negativa y su relación carga/masa coincidía con la de los rayos catódicos. A su vez Millikan midió la carga, que resultó ser igual a la del electrón.

La palabra fotoelectricidad, proviene de dos palabras griegas, *phos*, luz y *elektron*, ámbar, material usado en las primeras experiencias eléctricas conocidas, y fue elegida como término apropiado para designar el fenómeno descripto. Del mismo modo resulta natural llamar fotoelectrones a los electrones liberados en las experiencias fotoeléctricas.

Teoría de Einstein

La explicación de los resultados experimentales del fenómeno no pudo ser resuelta mediante la teoría ondulatoria de la luz, que considera a ésta como una onda electromagnética que se propaga en forma continua con frentes de ondas, de la misma forma que sirvió para explicar los fenómenos de interferencia y difracción de la luz.

Por ejemplo, experimentando con niveles muy bajos de intensidad luminosa podemos verificar que se encuentran fotoelectrones con energías cinéticas que no podrían haber sido adquiridas durante el tiempo que dura la experiencia, necesitándose tiempos mucho mayores para que las ondas puedan llegar a entregar dichas energías. Por otro lado, para una dada superficie emisora de fotoelectrones con un área determinada aparecen electrones con

energías que debieron ser obtenidas de áreas mucho mayores, debido a la baja intensidad luminosa incidente, lo que equivale a un \vec{S} pequeño (recordemos que la energía transportada por una onda electromagnética por unidad de área y de tiempo está dada por el vector de Poynting medio, \vec{S}).

Einstein propuso entonces, modificar la explicación del efecto fotoeléctrico, basándose en los trabajos de Planck sobre la cuantificación de la energía.

Sintetizando la teoría que propuso, podemos enunciar:

- Un haz de luz, al interactuar con la materia, debemos considerarlo compuesto por “corpúsculos” no materiales que transportan una definida cantidad de energía unitaria o “cuanto” de energía. A este paquete de energía lo denominamos “fotón”.
- La energía del fotón depende solamente y en forma lineal, de la frecuencia de la luz, lo cual se expresa mediante la siguiente relación:

$$E_f = h \cdot f \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

E_f : la energía del fotón.

f : la frecuencia de la luz.

$h = 6,6256 \times 10^{-34}$ J.s (una constante de proporcionalidad cuyo valor resultó ser coincidente con la constante de Planck).

- El proceso de interacción es del tipo “todo o nada”, es decir, cuando el fotón impacta con la superficie del material puede ocurrir sólo una de las dos situaciones siguientes:
 - El fotón entrega toda su energía a un sólo electrón y desaparece.
 - O no le entrega nada de su energía y se “difunde” en el material (sin importar otras consecuencias).

Resumiendo: un fotón puede interactuar con un solo electrón o con ninguno.

Considerando ahora el caso en que el fotón llega a la superficie del material, y alcanza a interactuar con un electrón cediéndole toda su energía (hf), ¿cómo utiliza el electrón esa cantidad de energía?

Análisis de bandas de energía (detalle)

Con la siguiente imagen, vamos a intentar explicar la dinámica del electrón en una fotocélula (un material compuesto por 2 metales separados por vacío):

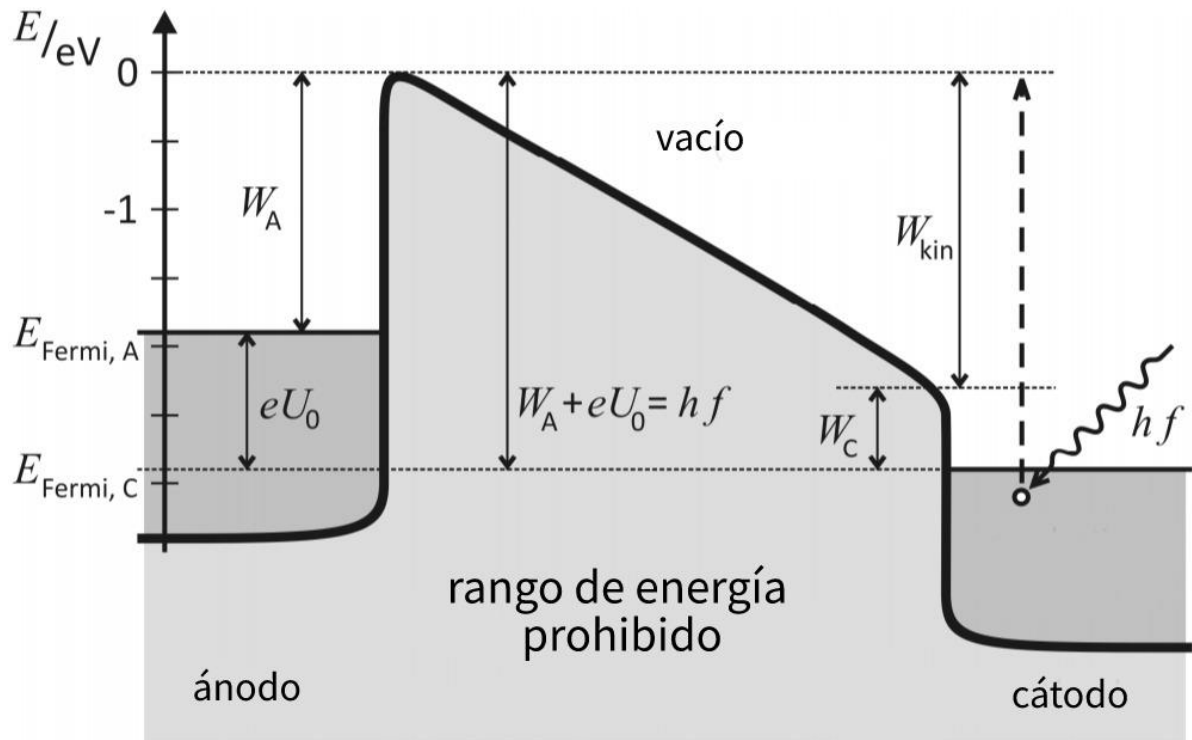


Imagen 1 - Bandas de energía

Miramos el cátodo:

- La energía que acarrea el fotón (hf) debe poder extraer un electrón del material y además dotarlo de suficiente energía cinética para vencer la barrera de potencial. De otra manera, el electrón vuelve al material y no produce el efecto.
- Si llamamos W_c al trabajo de extracción en el cátodo y W_{kin} a la energía cinética mínima necesaria para vencer la barrera de potencial, el enunciado anterior se puede escribir:

$$hf = W_c + W_{kin} \quad \text{Ec. 2}$$

Miramos al ánodo:

- La barrera de potencial está determinada por el trabajo para incorporar un electrón al ánodo (W_a) más la energía generada por un campo eléctrico externo U (al que podemos llamar W , haciendo U por la carga del electrón q). Vamos a explicar más adelante cómo generamos este potencial (potencial de frenado), por ahora sencillamente pensemos en una tensión externa aplicada que podemos variar.
El electrón que quiera incorporarse al ánodo debe contar con toda esta energía.
- En el punto límite donde la corriente se hace cero, $U = U_0$ (llamado potencial de corte y que también puede escribirse como $W = W_0$, si lo expresamos en forma de energía o trabajo) y $f = f_0$ (frecuencia umbral).

De estos 2 enunciados, podemos expresar:

$$hf_0 = W_a + W_0$$

Si igualamos la **Ec. 2** con esta última ecuación:

$$W_{kin} = (W_a - W_c) + W_0 = q(U_a - U_c) + qU_0$$

Si llamamos U_{ac} al potencial de contacto entre ánodo y cátodo:

$$W_{kin} = q(U_{ac} + U_0) \quad \text{Ec. 3}$$

Esta es la mínima energía cinética del electrón necesaria para pasar del cátodo al ánodo. Y también:

$$U_0 = \frac{h}{q} f_0 - U_a \quad \text{Ec. 4a}$$

Y que se puede generalizar como:

$$U = \frac{h}{q} f - U_a \quad \text{Ec. 4b}$$

Que es la ecuación de una recta que vincula a la frecuencia (f), el potencial de extracción en el ánodo (U_a) y el potencial de frenado (U) y que usaremos para calcular la constante de Planck (h). Los potenciales de extracción son propios del material y suelen representarse con la letra phi (ϕ).

3. Montaje experimental

Descripción del montaje

La **Imagen 2**, muestra el montaje que será utilizado en el desarrollo del trabajo para alcanzar los objetivos planteados.

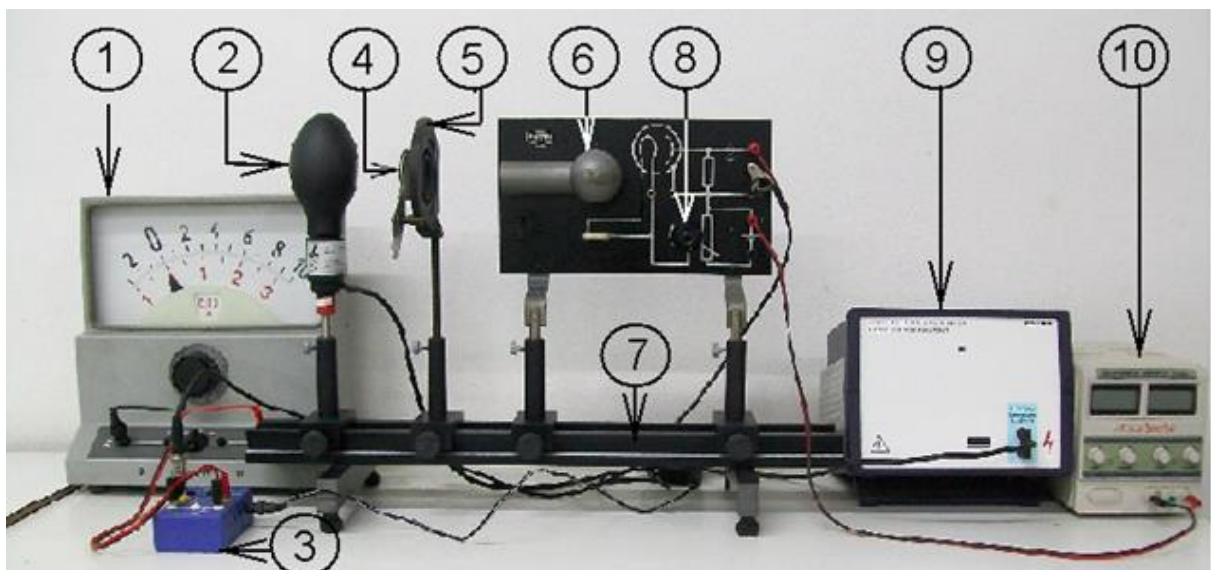


Imagen 2 - Disposición de los elementos para el ensayo

Cabe aquí acotar que el equipamiento final que se utilice, podrá tener alguna mínima variante física, que no altere el fenómeno bajo estudio.

1. Voltímetro: mide el potencial de frenado (U) aplicado sobre la fotocélula. Preparado para medir 3 V en C.C.
2. Fuente de luz: lámpara de vapor de Hg que genera luz blanca con determinadas longitudes de onda.
3. Amplificador de trans-resistencia: este amplificador tiene una resistencia interna de $1\text{ M}\Omega$ y amplifica la tensión de entrada producida por la corriente de la fotocélula.
4. Obturador de apertura variable: se utiliza para variar la cantidad de luz incidente sobre la fotocélula.
5. Soporte para filtros: este elemento permite colocar los distintos filtros de colores, con el objetivo de obtener una fuente de luz monocromática.
6. Célula fotoeléctrica: bulbo de vacío que contiene en el cátodo un depósito de material fotosensible (potasio) y un ánodo-anillo colector de platino.
7. Banco óptico: permite el montaje y alimentación de los componentes.
8. Reóstato: se utiliza para variar el potencial de frenado.
9. Fuente de tensión: se utiliza para la alimentación de la lámpara de Hg.
10. Fuente de C.C.: se utiliza para producir el potencial de frenado.

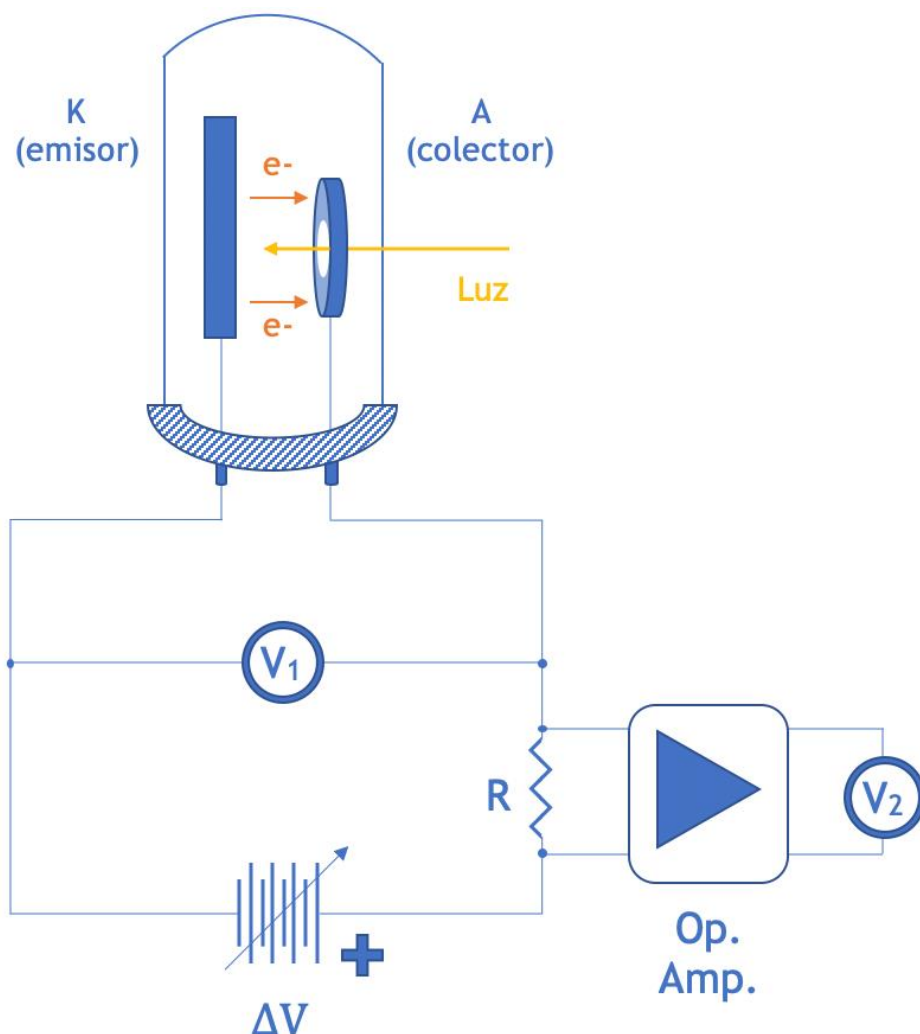


Figura 1 - Esquema eléctrico del montaje completo

Determinación de las variables

Trataremos de establecer una serie de resultados experimentales que permitirán comprobar la existencia del fenómeno, estableciendo también las bases para la formulación de la teoría que lo sustente.

Para ello es menester primero, determinar las variables que intervendrán y sus relaciones. Haremos uso del montaje descrito en la **Imagen 2** el cual podemos esquematizar en forma simplificada según la **Figura 2**.

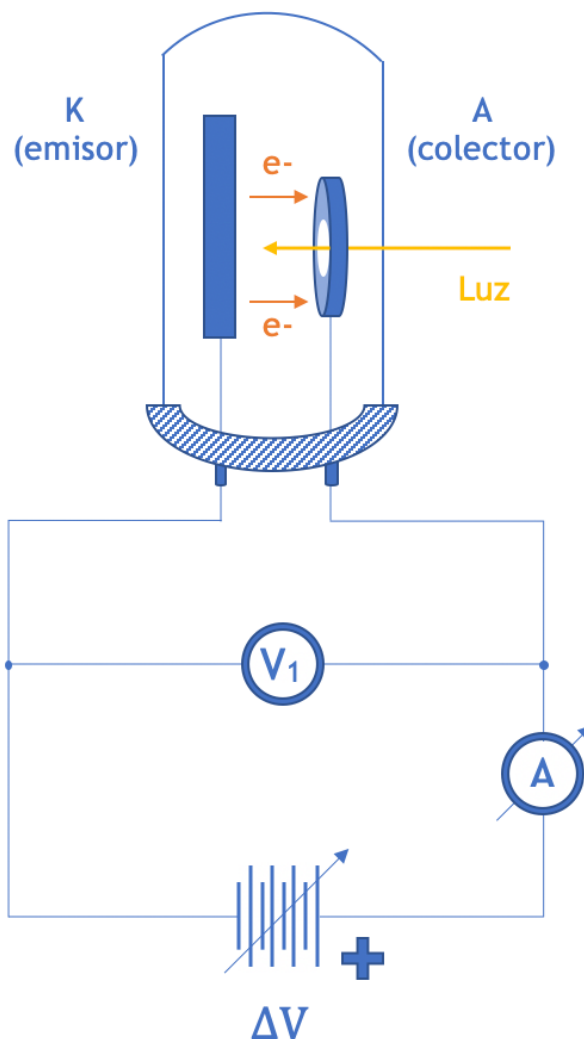


Figura 2 - Esquema eléctrico simplificado

Podemos considerar el dispositivo dividido en dos partes fundamentales. Por un lado, la fuente de luz, que como se dijo es una lámpara de Hg que emite luz blanca, es decir un fondo o espectro continuo, y tres “picos” predominantes de alta intensidad en frecuencias correspondientes al amarillo, verde y violeta.

Por otra parte, tenemos la superficie emisora o material fotosensible, es decir material capaz de emitir fotoelectrones por la acción de la luz visible.

Este material lo encontramos como recubrimiento de un sector dentro de un bulbo al vacío que además contiene un anillo colector enfrente a la superficie emisora. Este conjunto se conoce con el nombre de fotocélula.

K - Cátodo foto-emisor (potasio).

$$\text{Potencial de extracción: } \phi_K = 2,29 \text{ eV} = 3,67 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

A - Ánodo colector (platino).

$$\text{Potencial de extracción: } \phi_{PT} = 5,93 \text{ eV} = 9,5 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

De la fuente de luz nos interesa manejar dos parámetros especialmente:

- La cantidad de luz o intensidad (I), que incide sobre la fotocélula.
- El color asociado a su frecuencia (Fr) o longitud de onda (λ). Esto último nos indica que para el análisis inicial se acepta el carácter ondulatorio de la luz.

Con respecto al material foto-emisor nos interesa particularmente:

- La cantidad de fotoelectrones desprendidos por unidad de tiempo y de área, es decir la corriente fotoeléctrica (i), registrada en el amperímetro de la **Figura 2**.
- La energía cinética máxima (Ec_{MAX}) con que esos fotoelectrones abandonan la superficie emisora para dirigirse al anillo colector.

Es particularmente importante la corriente fotoeléctrica registrada por el amperímetro porque es la manifestación precisa de la existencia del fenómeno.

Es importante tener en cuenta también otro parámetro, que es el que representa el trabajo que debe realizar el fotoelectrón para liberarse del material antes de efectuar su “salto” al colector. Como ya mencionamos antes, nos referimos al trabajo de extracción.

Resumiendo, tenemos el siguiente cuadro de variables para los cuales verificaremos una correspondencia entre las variables escritas en la misma fila:

FUENTE DE LUZ	FOTOELECTRONES
Intensidad (I)	Corriente fotoeléctrica (i)
Frecuencia (color) (Fr)	Energía cinética máxima (Ec_{MAX})

Tabla 1 - Cuadro de variables

Finalmente, las experiencias que describiremos más adelante permitirán establecer las relaciones entre ambos grupos de variables.



Antes de continuar leyendo, intente responder las siguientes preguntas:

- ¿En cuántas partes se encuentra dividido el equipamiento?
- ¿Qué conexión física existe entre estas partes?
- ¿Cuántos parámetros nos interesan del material fotosensible?
- ¿Cuántos parámetros analizaremos de la fuente de luz?

Determinación de la intensidad de la luz (I)

En particular, de esta variable no nos interesa su valor cuantitativo, por lo tanto, sólo efectuaremos una variación cualitativa mediante el obturador (ítem #4) que permitirá pasar más o menos cantidad de luz hacia la fotocélula.

Determinación de la frecuencia (f)

Con nuestro setup, no es posible efectuar una variación continua de la frecuencia de la fuente de luz. Pero sí podemos obtener valores discretos interponiendo al haz proveniente de la fuente, los filtros adecuados.

El valor λ de cada filtro está especificado por el fabricante, desde donde podremos obtener indirectamente los valores correspondientes de f y Δf que utilizaremos.

Se cuenta con tres filtros que corresponden a:

COLOR	LONG. DE ONDA (λ)
Amarillo	$5780 \pm 50 \text{ \AA}$
Verde	$5440 \pm 50 \text{ \AA}$
Violeta	$4360 \pm 50 \text{ \AA}$

Tabla 2 - Correspondencia color/long. de onda

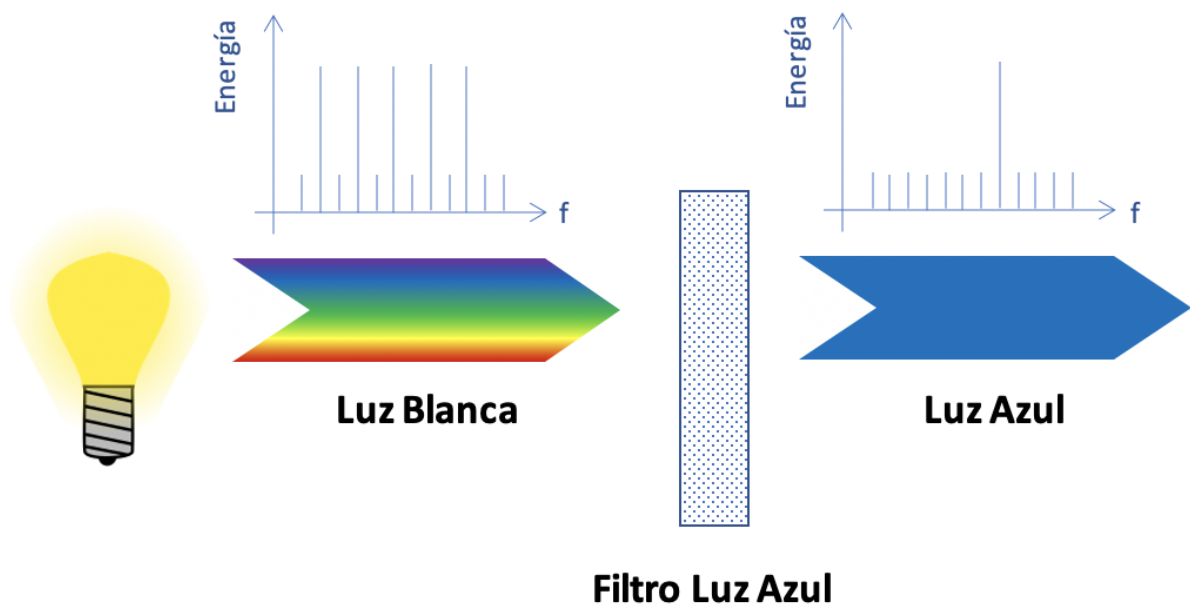


Imagen 3 – Esquema de un filtro de luz (en este caso, de luz azul)

Determinación de la corriente fotoeléctrica (i)

Como se ve en el esquema elemental de la **Figura 2**, la corriente i circula por el circuito exterior de la fotocélula atravesando un amperímetro. Dado que los valores de la corriente fotoeléctrica son extremadamente bajos no existe en el laboratorio un instrumento que pueda medir esos valores directamente. Por lo tanto, se utilizará un método indirecto, como el que se muestra a continuación:

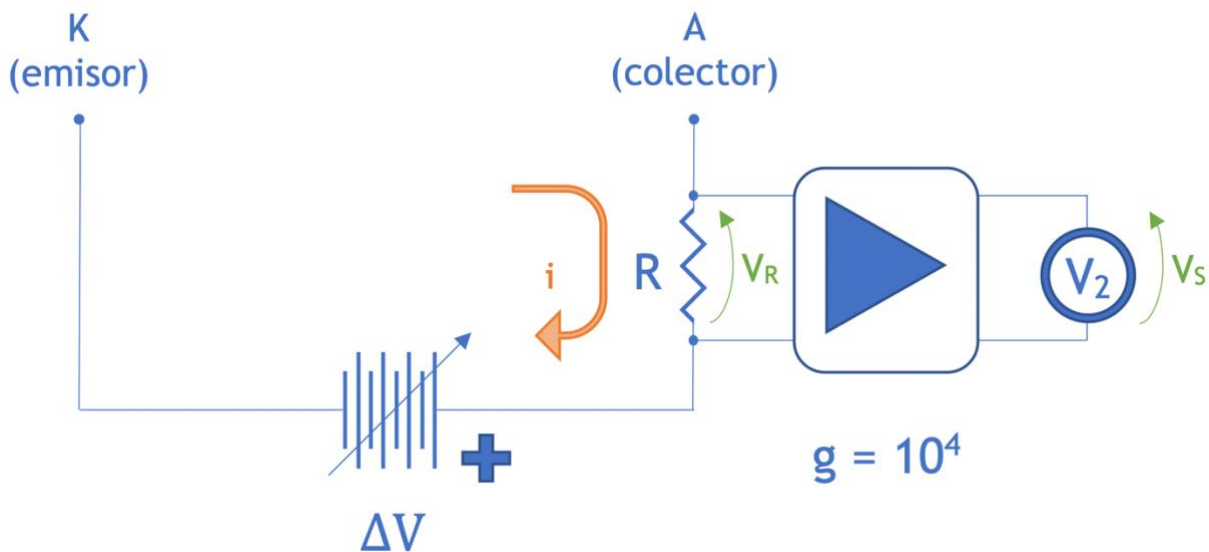


Figura 3 - Método indirecto de medición de la corriente i

La corriente i cuyo valor se desea conocer, circula por la resistencia R de valor $1\text{ M}\Omega$, produciendo una caída de potencial $V_R = i \cdot R$. Esta tensión V_R , aún muy pequeña, se aplica a la entrada de un amplificador lineal de alta ganancia $g = 10^4$. Esto significa que a la salida del amplificador obtendremos una tensión V_s que será 10^4 veces mayor que V_R , o sea que:

$$V_s = g \cdot V_R$$

Esta tensión V_s puede ser medida directamente por un voltímetro convencional (V_2).

Entonces, como:

$$V_R = i \cdot R$$

Se tiene:

$$V_s = g \cdot i \cdot R$$

De la cual, reordenando:

$$i = \frac{V_s}{g \cdot R}$$

Y como $g = 10^4$ y $R = 10^6$:

$$i = V_s \cdot 10^{-10} \text{ (A)}$$

Como se ve, el valor de la corriente i en todo momento puede ser determinado por el valor leído en el voltímetro de salida (V_2), afectado por el coeficiente 10^{-10} .

Determinación de la energía cinética máxima (E_c)

También en este caso, como es obvio, la determinación deberá ser por el método indirecto.

Una forma apropiada para conocer la energía del electrón en movimiento es intentar frenarlo mediante un campo eléctrico de frenado, es decir en sentido opuesto al movimiento de la carga. En el momento que se logre detener al fotoelectrón, el trabajo del campo, o la energía potencial, será igual a la energía cinética. que traía la carga:

$$E_p = E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

El campo eléctrico de frenado podemos obtenerlo como muestra la **Figura 2**, aplicando un potencial U .


Así resultará:

$$E_p = e \cdot U$$

Este potencial de frenado se ajusta, desde cero a un máximo, mediante el reóstato R_f (ítem #8), hasta lograr detener a los fotoelectrones de máxima energía. Esto quedará evidenciado por la interrupción de la corriente, o sea, la caída en la indicación del voltímetro V_2 .

El valor del potencial de frenado (U) estará constantemente registrado por el voltímetro V_1 . Además, el valor de U para el cual se produce el corte de la corriente lo llamaremos “potencial de corte” (U_0). Por lo tanto, en ese momento resulta:

$$E_p = e \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

	Antes de continuar leyendo, intente responder las siguientes preguntas:
	¿Cómo ajustamos la intensidad de luz?
	¿Cómo seleccionamos una frecuencia u otra?
	¿De qué depende la energía del electrón arrancado del cátodo?
	¿Cómo determinamos su energía?

Resultados experimentales

Primero, realizaremos una experiencia imaginaria, ya que supondremos poseer una fuente de luz de tal naturaleza que nos permita variar su frecuencia, o color, en forma continua desde un valor muy bajo (más allá del infrarrojo lejano). No existen fuentes de esta naturaleza, por eso hablamos de una “experiencia imaginaria”.

Ajustamos previamente el potencial de frenado en 0 V. Hacemos incidir el haz de luz de muy baja frecuencia y observamos que la corriente es cero, lo cual indica que no hay efecto fotoeléctrico. Comenzamos a aumentar lentamente la frecuencia de la luz notando que la corriente continua sigue siendo nula. Así siguiendo, veríamos que para un determinado valor

de f_r aparece bruscamente una indicación de corriente en el instrumento, lo que indica la manifestación del fenómeno.

Efectuamos seguidamente, una modificación en nuestra experiencia reemplazando el material fotosensible. Llevamos la frecuencia de la luz a un mínimo y repetimos la operación, nuevamente observaremos que la corriente fotoeléctrica aparecerá en el circuito a partir de un determinado valor de frecuencia. Encontraremos entonces, que esta frecuencia límite es diferente a la determinada por el otro material.

Así cambiaremos repetidamente de material observando que se repiten los resultados, pero en cada caso con un valor de frecuencia límite diferente.

Podemos así establecer un **primer resultado experimental**:

- **Existe un determinado valor de frecuencia mínima, que llamaremos frecuencia umbral f_0 , a partir del cual se manifiesta el fenómeno fotoeléctrico.**
- **Este valor de frecuencia umbral f_0 es característico de cada material.**

Veamos una segunda experiencia: para ello establecemos una frecuencia de luz constante mediante un filtro. Observamos un determinado valor de corriente i indicando la existencia del fenómeno.

Ahora, observando el voltímetro V_2 variamos la intensidad I de la luz incidente mediante el obturador de apertura variable (ítem #4). Podemos comprobar que la corriente i varía proporcionalmente en forma directa con la cantidad de luz incidente.

Tomemos el **segundo resultado experimental**:

- **La cantidad de fotoelectrones desprendidos, o la corriente fotoeléctrica, es función de la intensidad de la luz $i = f(I)$.**

Analizaremos ahora el comportamiento de la energía cinética de los fotoelectrones.

Para ello utilizaremos el dispositivo de frenado descripto anteriormente.

Mantengamos primeramente fija la frecuencia de la luz mediante un filtro, por ejemplo, uno de color amarillo. Establezcamos entonces, una intensidad de luz suficientemente grande. Ahora, mientras observamos el voltímetro de salida V_2 , comenzamos a aumentar el potencial de frenado desde cero a un máximo, mediante el reóstato R_f . Notamos que a medida que el potencial U aumenta, registrado por V_1 , la lectura en V_2 (o sea i) disminuye hasta alcanzar un valor mínimo, que supondremos en principio igual a cero. En este momento detenemos el reóstato y registramos el valor en V_1 , que como vimos, es el valor de potencial de corte U_0 que permite determinar la $E_{c_{MAX}}$ a través de $E_{c_{MAX}} = e \cdot U_0$.

Repetimos la experiencia, pero previamente disminuirémos considerablemente la cantidad de luz incidente mediante el obturador. Retornaremos el reóstato R_f a cero y comenzaremos a aumentarlo nuevamente observando la indicación en V_2 , hasta que la corriente caiga a cero. En este punto leemos el voltímetro V_1 y anotamos el valor del potencial del corte. Podemos notar que éste coincide con el registrado anteriormente.

Por lo tanto, concluimos con el **tercer resultado experimental**:

- La energía cinética de los fotoelectrones no depende de la intensidad de la luz $E_c \neq f(I)$.

Continuando con esta experiencia y manteniendo ahora constante la intensidad de luz, cambiaremos el filtro (cambiaremos la frecuencia de la luz incidente). Repetimos la operación anterior con el potencial de frenado para determinar nuevamente el potencial de corte U_0 . Podemos observar que este nuevo valor de U_0 resulta mayor que en el caso anterior. Si repetimos la experiencia con el filtro para luz violeta, por ejemplo, tendremos otro valor de U_0 superior a los anteriores.

Esto nos permite establecer el **cuarto resultado experimental**:

- La energía cinética de los fotoelectrones es función de la frecuencia de la luz incidente $E_c = f(Fr)$.

Por último, manteniendo una frecuencia fija cualquiera, abrimos totalmente el obturador para asegurar gran cantidad (intensidad) de luz incidente.

Observamos una elevada corriente fotoeléctrica en el instrumento V_2 . Interrumpimos el haz de luz con la mano, e “instantáneamente”, notamos la brusca caída de la corriente. Si ahora, retiramos rápidamente la mano, la corriente se restablece inmediatamente. Reducimos ahora sustancialmente la intensidad de luz reduciendo la abertura del obturador. La corriente se notará muy baja. Repetimos ahora la operación anterior, interrumpimos el haz de luz y la pequeña corriente cae a cero. Retiramos la obstrucción del haz y la corriente se restablece instantáneamente.

Esto nos permite establecer el **quinto resultado experimental**:

- El tiempo de retardo entre la llegada de la luz y la emisión del fotoelectrón es casi instantáneo y no depende de la cantidad de luz incidente ni del área emisora expuesta. Este tiempo es aproximadamente 10^{-9} segundos (1 nanosegundo).

Resumiendo, tenemos los siguientes resultados experimentales:

1°	Si la frecuencia incidente es menor a f_0 entonces no hay fenómeno fotoeléctrico	
2°	$i = f(I)$	La intensidad de corriente depende de la intensidad de luz.
3°	$E_c \neq f(I)$	La energía cinética no depende de la intensidad de luz.
4°	$E_c = f(Fr)$	La energía cinética depende de la frecuencia incidente.
5°	$T_{(retardo)} \neq f(I)$	La demora en aparecer el fenómeno, no depende de la intensidad de luz.

Tabla 3 - Resumen de los resultados experimentales

4. Mediciones y elaboración de datos

El trabajo práctico cuenta con una batería de ejercicios destinados a entender y dar sustento físico a la experiencia. Se pretende que el alumno efectúe mediciones en el equipamiento que la Universidad posee a tal fin y arribe a las conclusiones correspondientes.

Para ello, se dispondrá de una “Jupyter Notebook” con indicaciones que acompañarán la tarea de recolección de datos. La misma, debe completarse en las celdas destinadas a tal fin, manteniendo la estructura y las consignas intactas (para simplicidad de la corrección).

También, será necesario ejecutar una simulación de la Universidad de Boulder Colorado. Esta simulación está programada en Java y posee una versión para navegadores web y otra en modo “applet java” para descargar. Cualquiera de las 2 versiones son válidas y sirven para desarrollar la tarea. Es un complemento pedagógico para acompañar el experimento real.

5. Anexos

Repase la teoría explicada, ingresando en este vínculo:

<http://www.educaplus.org/game/efecto-fotoelectrico>

Tabla de valores de potenciales de extracción:

http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/w_efe.pdf

6. Bibliografía

Bibliografía física (consultar en Biblioteca o a la Cátedra)

Leybold, DETERMINING PLANCK’S CONSTANT, P6143, Leybold Didactic GMBH

Leybold, DETERMINING PLANCK’S CONSTANT: COUNTER VOLTAGE METHOD, P6144, Leybold Didactic GMBH

Melissinos, EXPERIMENTS IN MODERN PHYSICS, University of Rochester, 4ed 1968

Physics Department, PHOTOELECTRIC EFFECT EXPERIMENT, New York University

Phywe, PLANCK’S ‘QUANTUM OF ACTION’ FROM PHOTOELECTRIC EFFECT, P2510402D, Phywe Systeme GMBH

Phywe, PLANCK’S ‘QUANTUM OF ACTION’ FROM PHOTOELECTRIC EFFECT, P2510402E, Phywe Systeme GMBH

Serway, FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA, 7ed vol-2, Capítulo 40.2

Bibliografía web

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/_cuantica/experiencias/fotoelectrico/fotoelectrico.html

<http://www.educaplus.org/game/efecto-fotoelectrico>

http://www.universeinstein.com.ar/images/ruiz_trejo_E_termo_luz.pdf

http://www.universeinstein.com.ar/images/1905_17_132-148.pdf

<http://www.universeinstein.com.ar/cientificos.htm>

<https://phet.colorado.edu/es/simulation/photoelectric>

http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/w_efe.pdf