



Una formación de calidad
en ingeniería para el futuro

Centro de Convenciones Cartagena de Indias
15 al 18 de Septiembre de 2015

ELABORACIÓN DE UN PROTOTIPO DE LABORATORIO DE OPTOELECTRÓNICA PARA LA RECREACIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO EN EL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA I.U. CESMAG EN SAN JUAN DE PASTO

**Mario Andrés Cáceres Nocera, Daniel Sebastián Benavides Bravo,
Karla Patricia Reyes Sánchez**

**Institución Universitaria CESMAG
San Juan de Pasto, Colombia**

Resumen

El efecto fotoeléctrico es uno de los fenómenos aplicados en los dispositivos tecnológicos con los que actualmente se cuenta. Entender su funcionamiento es clave por ser la base científica del funcionamiento de dispositivos optoelectrónicos. En este trabajo se presenta el proyecto realizado en la asignatura de optoelectrónica de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Institución Universitaria CESMAG, que tuvo por objetivo llevar a cabo una recreación del efecto fotoeléctrico con el fin de afianzar los conceptos teóricos y permitir a los estudiantes de la clase comprender de una manera práctica este importante fenómeno de la física moderna. El prototipo diseñado permite registrar el valor de la corriente generada cuando luz de diferente longitud de onda incide sobre una celda fotovoltaica. Con el fin de generar diferentes longitudes de onda o colores se probaron varios tipos de filtros, encontrando que lo más adecuado es el uso de láminas de acrílico de diferentes colores. El montaje permite cambiar la fuente de luz y su intensidad por medio de un dispositivo electrónico. Con este montaje se logró verificar lo que la teoría propone con un prototipo de bajo costo que servirá como recurso experimental a los futuros grupos que deberán cursar dicha asignatura.

Palabras clave: efecto fotoeléctrico; celda fotovoltaica; optoelectrónica

Abstract

The photoelectric effect is one of the most applied phenomena used in newer technological devices. Understand its operation is key, because it is the scientific basis for the optoelectronic devices operation. To have a better understanding of this phenomena, the Optoelectronics Class as part of the Electronic Engineering program of the CESMAG University, aimed to conduct a reenactment of the photoelectric effect in order to consolidate the theoretical concepts and allow students to understand this important phenomenon of modern physics. The prototype allows the recording of the current value generated when light of different wavelengths incident on a photovoltaic cell. In order to generate different wavelengths or colors, various types of filters were tested, finding that acrylic sheets of different colors work best. The assembly allows you to change the light source and its intensity by means of an electronic device. With this prototype, it was possible to verify the theory. And verify that a low cost resource can help future experimental groups to understand and learn about this subject.

Keywords: *photoelectric effect; photovoltaic cell; optoelectronics*

1. Introducción

Este trabajo parte de la necesidad de recrear el efecto fotoeléctrico estudiado de manera teórica en la asignatura de optoelectrónica, debido a que la Universidad no cuenta con equipos que puedan reproducir este efecto, se trabajó en el desarrollo de una herramienta de laboratorio que permita recrearlo.

1.1 El Efecto Fotoeléctrico

Este efecto fue descubierto por Heinrich Hertz, en 1887, al observar que ciertos metales, bajo la acción de la luz, emiten cargas negativas. Más adelante se pudo comprobar que las partículas emitidas eran electrones y que la emisión se debía principalmente a la radiación ultravioleta. Las observaciones que resultaban del experimento iban en contraposición de la teoría clásica de la radiación electromagnética, la no dependencia de la energía cinética adquirida por los fotoelectrones con la intensidad de la fuente de radiación, la dependencia de la energía cinética con la frecuencia y la emisión casi "instantánea" de los fotoelectrones, apuntaban a la necesidad de explicar el fenómeno con nuevos argumentos que llevaron a la creación de una nueva física conocida como física moderna, Morrison (2010).

En 1905, el mismo año que formulaba la teoría de la relatividad especial, Albert Einstein mostró que la porción del espectro de alta frecuencia de la radiación de un cuerpo negro podría entenderse simplemente en términos de una cuantización directa de la energía de la radiación. Einstein propuso, basado en la explicación de Planck para el espectro de radiación de cuerpo negro, que toda la radiación electromagnética consiste de discretos paquetes de energía, cada uno con una energía $h\nu$, siendo h la constante de Planck y ν la frecuencia de la radiación. Einstein llamó a estos paquetes cuantos de luz o fotones, Ohanian (1995). Einstein reconoció que el concepto de fotón

era la clave para la explicación correcta al efecto fotoeléctrico y formuló la siguiente ecuación matemática:

$$K_{max} = h\nu - \phi \quad (1)$$

Donde K_{max} es la energía cinética máxima alcanzada por los fotoelectrones y ϕ se denomina función trabajo e indica la cantidad de energía necesaria para remover un electrón del electrodo, este valor es propio de cada material. Como se muestra en la ecuación (1), a medida que la frecuencia aumenta lo que implica que la longitud de onda λ disminuya ($\nu = c/\lambda$), la energía cinética de los fotoelectrones aumenta y por lo tanto se registrará una corriente más alta en el instrumento de medida.

En pocas palabras en el efecto fotoeléctrico tiene lugar una conversión de la energía luminosa en eléctrica. Este efecto tiene muchas aplicaciones prácticas en dispositivos electrónicos ideados para la detección de luz, tales como los tubos fotomultiplicadores, dispositivos acopladores de carga, cámaras de televisión, entre otros. Ohanian (1995).

1.2 El Efecto Fotovoltaico

Para producir electricidad utilizando energía solar, es necesario contar con un panel solar compuesto por una o más celdas solares. Cuando la radiación solar incide sobre una celda solar, el material de la misma absorbe algunos de los fotones incidentes. Cada fotón como ya se mencionó contiene una cantidad de energía dada por $E = h\nu$. Cuando un fotón es absorbido, se da inicio a un proceso de liberación de un electrón en el material de la celda solar. Dado que ambos lados de una celda solar están eléctricamente conectados, una corriente fluirá en el momento en que el fotón es absorbido.

La radiación solar incluye longitudes de onda de todo el espectro electromagnético, pero la parte responsable del efecto fotoeléctrico incluye el ultra violeta y el visible.

Se denomina radiación ultravioleta o radiación UV a la radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 15 nanómetros hasta los 400 nanómetros, Morrison (2010). Su nombre proviene de su rango el cual empieza desde longitudes de onda más cortas de lo que los humanos identificamos como el color violeta.

El espectro visible de luz es el espectro de radiación electromagnética que es captada por el ojo humano. Comprende desde una longitud de onda de los 400 nanómetros hasta los 700 nanómetros, Morrison (2010). También este rango se conoce como el espectro óptico de la luz.

En la Tabla 1 se muestran los rangos de longitudes de onda correspondientes a cada color del espectro visible.

Rango de longitudes de onda (nm)	Color
400 - 450	Violeta
450 - 500	Azul
500 - 570	Verde
570 - 590	Amarillo
590 - 620	Anaranjado
620 - 700	Rojo

Tabla 1. Rango de longitudes de onda para el espectro de luz visible

El objetivo de éste proyecto es analizar el efecto fotoeléctrico tomando como referencia la simulación que se encuentra en la página de la Universidad de Colorado, Kale (2013), utilizando como principal componente una celda solar. En teoría a menor longitud de onda mayor desprendimiento de electrones, y a mayor longitud de onda menor desprendimiento, Kale (2013). El dispositivo debe permitir registrar los datos de corriente generada cuando los electrones son expulsados desde la celda solar, para lograr un análisis cualitativo y cuantitativo la idea es poder cambiar la longitud de onda de la radiación que incide sobre la celda, a partir de la utilización de filtros y diferentes fuentes de luz.

2. Procedimiento Experimental

A continuación se describen los materiales y el procedimiento empleado para diseñar el prototipo que permitió comprobar de manera práctica el efecto fotoeléctrico en el aula de clase. Los materiales que se emplearon fueron:

2.1 Bombillo de luz ultravioleta

Para disponer de luz ultravioleta se consiguió un bombillo comercial de luz este tipo. Una imagen del mismo se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Bombillo Ultravioleta o de luz negra.

2.2 Filtros

Los filtros empleados en el experimento se utilizan para permitir que solo atraviese hacia el panel solar ciertas propiedades de la luz en particular una longitud de onda específica, dependiendo del color del filtro éste dejará pasar la radiación correspondiente a dicho color, por ejemplo si el filtro es rojo la longitud de onda resultante es de 660 nm aproximadamente, si el filtro es azul, pasaría la luz con longitud de onda de 475 nm aproximadamente. Idealmente un filtro de determinado color absorbe la radiación de los demás colores y dejar pasar solo la radiación

correspondiente a su color. La Figura 2 ilustra el funcionamiento básico de un filtro ideal. (Teleformación).

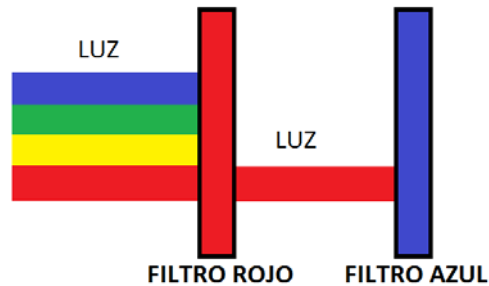


Figura 2. Funcionamiento de un filtro.

2.2.1 Filtros de acrílico

El acrílico es un material que se deriva del plástico que tiene diferentes aplicaciones y usos. Dentro de sus ventajas podemos mencionar que resiste estar expuesto por periodos de tiempo muy largos a rayos ultravioleta sin que esto dañe su superficie. Dentro de las características técnicas del acrílico podemos encontrar las siguientes: Propiedades ópticas: La luz transmitida a través de las láminas de acrílico conserva aproximadamente el 92% de su intensidad inicial (en el rango de luz visible), por lo que se puede apreciar transparencia. Propiedades eléctricas: Las láminas de acrílico son un material dieléctrico.

Fue posible conseguir láminas de acrílico de diferentes colores. La Figura 3 muestra las láminas utilizadas en la construcción del prototipo.



Figura 3. Láminas de acrílico de diferentes colores

2.2.2 Filtros de vidrio

Otra alternativa que se probó fue la utilización de vidrio de diferentes colores, sin embargo como se explicará más detalladamente, éstos no arrojaron buenos resultados.

2.3 Panel Solar Policristalino

Las células solares de silicio multicristalino se fabrican a partir de pequeños granos de silicio cristalino que proceden de diferentes fuentes, generalmente de elementos de silicio sobrantes de la elaboración de micro electrónica. Erazo, et al. (2015). Otra forma de fabricación es de bloques de silicio se extraen en primer lugar unos bloques rectangulares, a partir de los cuales se cortan las láminas de silicio que posteriormente

se procesan para la fabricación de las células solares de silicio multicristalino. El panel solar utilizado se consigue en almacenes de distribución de productos electrónicos, sus dimensiones son de 8 x 8 cm y una foto del mismo se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Panel solar utilizado

3. Implementación del Montaje y Adquisición de Datos

Los elementos del prototipo se describen a continuación: en primer lugar se construyó una caja en madera con tapa (1), ésta se elaboró de tal forma que impida en lo posible la incidencia de la luz exterior al interior de la misma. En la parte interna frontal se localiza el panel solar (2), en el lado opuesto, a corta distancia, se ubica un plafón (3) al cual se adaptan las diferentes fuentes de radiación (bombillo UV, bombilla incandescente, bombillo a base de LED), además se implementó un sistema electrónico para variar la intensidad de la fuente lumínica (dimmer) (4).

Entre el panel y el bombillo se diseñó el sistema de adaptación de los filtros (5) que puede ser fácilmente manipulado, es decir, que permite el cambio de filtro sin ningún inconveniente, con el fin de lograr variar la longitud de onda que finalmente llegaría al panel solar. La Figura 5 muestra la parte exterior e interior del prototipo.

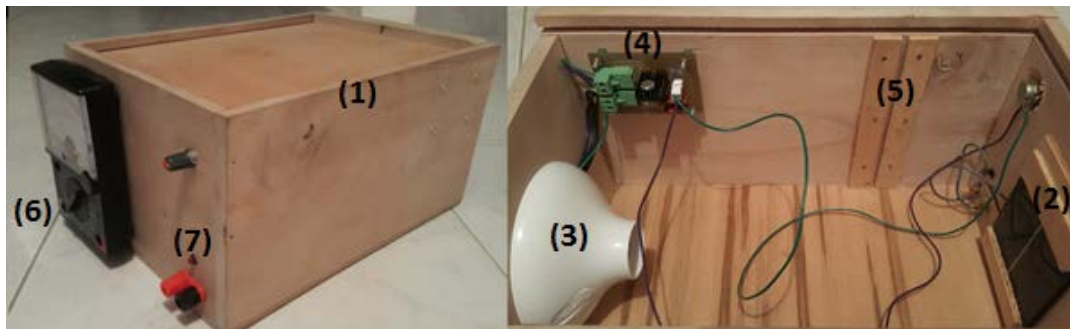


Figura 5. Imagen del prototipo, los números corresponden a las partes descritas anteriormente.

Respecto a la adquisición de los datos se requiere relacionar la corriente obtenida por la celda fotovoltaica al cambio de los filtros (longitud de onda), la corriente se midió por medio de un multímetro (6) (amperímetro) y un LED indicador (7) a modo de carga, y para determinar la longitud de onda, se establecieron promedios en el rango de longitudes de cada color tomados de Tabla 1.

La primera fuente utilizada fue el bombillo de luz ultravioleta. Se utilizaron dos tipos de filtros, primero se trabajó con láminas de vidrio de distintos colores y luego con el acrílico que se ha descrito anteriormente. La Tabla 2 muestra los resultados de longitud de onda vs corriente utilizando luz UV y filtros de vidrio:

BOMBILLO UV		
FILTRO	λ APROXIMADA (nm)	CORRIENTE +- 0,1 μ A
SIN FILTRO	-	260.0
AZUL	475	140.0
VERDE	535	178.0
AMARILLO	580	0.0
ROJO	660	162.0

Tabla 2. Fuente de luz: Bombillo UV – Material del filtro: Vidrio varios colores

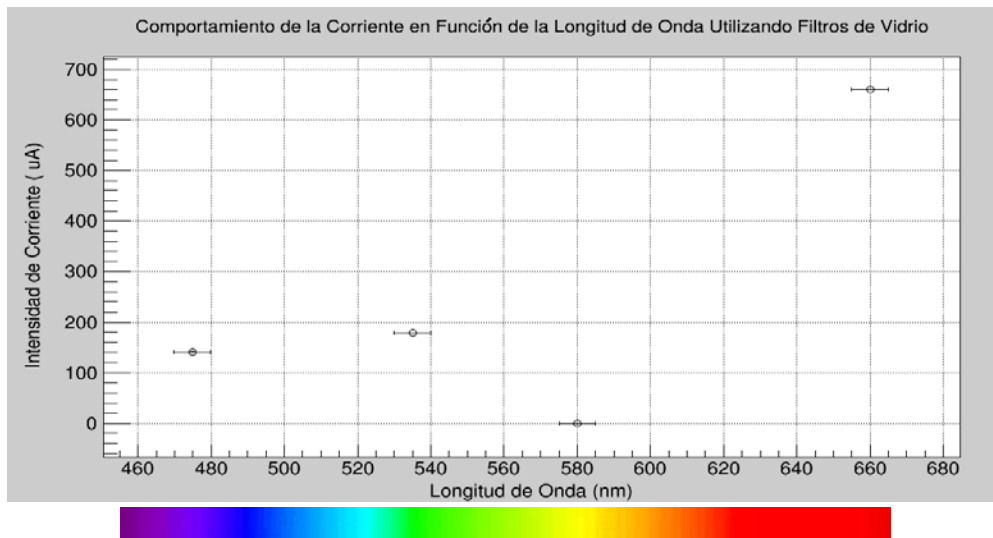


Figura 6. Gráfica creada en el software "Root" de la corriente en función de la longitud de onda utilizando filtros de vidrio y como fuente, luz ultravioleta. No se nota ninguna correlación entre estas variables al utilizar estos filtros.

Se observa un valor diferente de cero cuando no se coloca ningún filtro entre el panel y la fuente, lo cual garantiza que el sistema de adquisición de datos de corriente funcionó de manera adecuada. Al colocar el filtro de vidrio de color azul, se notó una disminución de la intensidad de corriente, al sustituir el filtro azul por el verde, la corriente aumentó. Extrañamente el vidrio de color amarillo absorbió la radiación electromagnética que ocasiona el efecto fotoeléctrico y el valor de la corriente cayó a cero a pesar que la intensidad fuera la máxima posible. El filtro rojo permitió registrar una corriente ubicada en el medio de la obtenida con el filtro azul y verde. Con estos resultados se descartó este filtro ya que los resultados no concuerdan con la teoría del efecto fotoeléctrico.

El comportamiento antes descrito de la corriente al variar la longitud de onda no es lo que se esperaba para el efecto fotoeléctrico, es decir, que a medida que la longitud de onda disminuya la corriente aumente, este comportamiento lo ilustra la Figura 6 en la cual se puede apreciar una amplia dispersión de los puntos. Lo anterior llevó a buscar el

reemplazo de los filtros de vidrio por los de acrílico. En la Tabla 3 se presentan los datos obtenidos utilizando los filtros de acrílico:

BOMBILLO UV		
FILTRO	λ APROXIMADA (nm)	CORRIENTE +- 0,1 μ A
SIN FILTRO	-	260.0
AZUL	475	137.0
VERDE	535	35.0
AMARILLO	580	20.0
ROJO	660	18.1

Tabla 3. Fuente de luz: Bombillo UV – Material del filtro: Acrílico varios colores

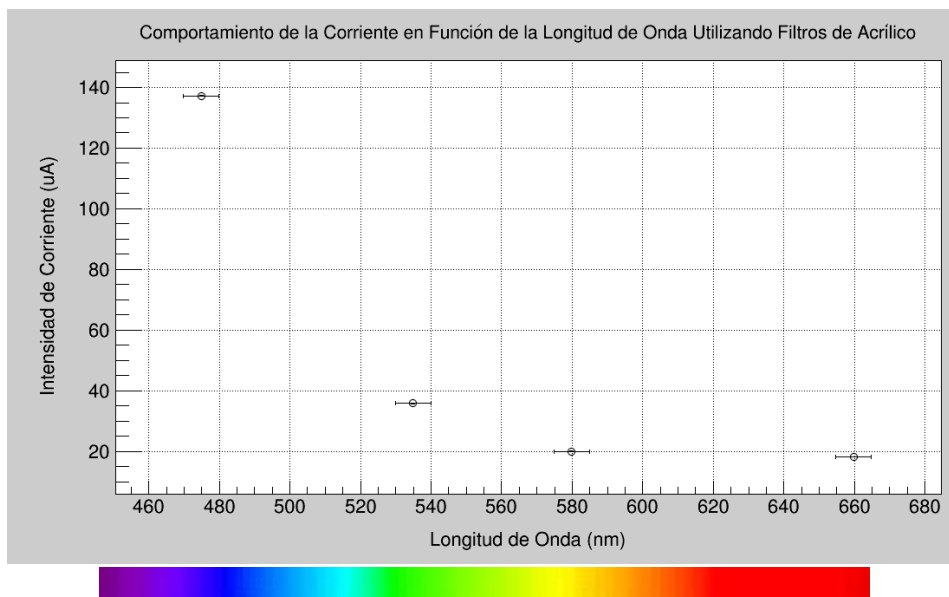


Figura 7. Gráfica creada en el software "Root" de la corriente en función de la longitud de onda utilizando filtros de acrílico y como fuente, luz ultravioleta. Se observa que a medida que la longitud de onda crece, la corriente disminuye.

La Figura 7 determina un comportamiento acorde con el efecto fotoeléctrico, a medida que la longitud de onda aumenta (frecuencia disminuye), la corriente disminuye, ello se deriva también de la tendencia inversa de los anteriores datos.

De acuerdo a este comportamiento se decidió trabajar con los acrílicos para las otras fuentes lumínicas.

La Tabla 4 muestra los valores de las mismas variables al utilizar como fuente de la radiación un bombillo incandescente.

BOMBILLO INCANDESCENTE		
FILTRO	λ APROXIMADA (nm)	CORRIENTE +- 0,01 μ A
SIN FILTRO	-	9.20
AZUL	475	9.75

VERDE	535	9.73
AMARILLO	580	9.45
ROJO	660	9.08

Tabla 4. Fuente de luz: Bombillo Incandescente - Material del filtro: Acrílico varios colores

También aquí se evidencia la validez del efecto fotoeléctrico. En la Figura 8 se graficaron los datos y al igual que en el caso anterior se ilustra una relación inversa entre las variables.

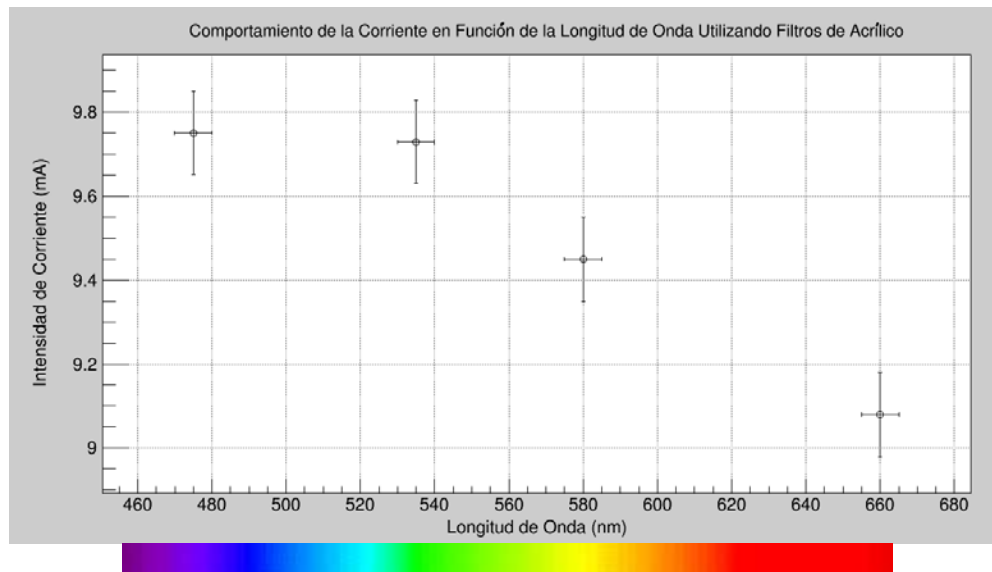


Figura 8. Gráfica creada en el software "Root" de la corriente en función de la longitud de onda utilizando filtros de acrílico y como fuente el bombillo incandescente. Se observa que a medida que la longitud de onda crece, la corriente disminuye.

En cuanto al valor de la corriente sin filtro, se puede analizar bajo el argumento que el bombillo incandescente por sí sólo tiene una gran componente en el infrarrojo y por ello el valor de la corriente es menor con respecto a cuándo se utilizaron los filtros. Por último se utilizó como fuente luz blanca a base de LED y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

LUZ BLANCA		
FILTRO	λ APROXIMADA (nm)	CORRIENTE +- 0,01 mA
SIN FILTRO	-	1.34
AZUL	475	0.43
VERDE	535	0.35
AMARILLO	580	1.10
ROJO	660	0.38

Tabla 5. Fuente de luz: Bombillo LED - Material del filtro: Acrílico varios colores

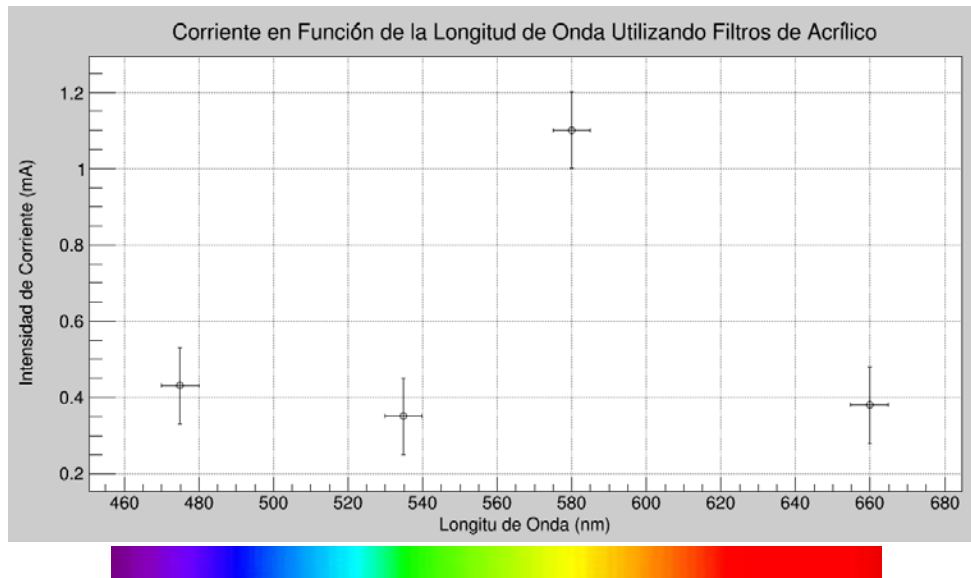


Figura 9. Gráfica creada en el software "Root" de la corriente en función de la longitud de onda utilizando filtros de acrílico y como fuente, luz blanca. Se observa que a medida que la longitud de onda crece, la corriente disminuye.

Encontramos que no existe un comportamiento regular en todos los datos referente a la teoría, en particular se nota un aumento considerable de la corriente con el filtro amarillo que por poco alcanza el valor de la misma sin la utilización de filtro. Entre el color azul y verde si se nota una disminución y con el rojo, disminuye claramente con respecto al amarillo pero no es menor que con el filtro verde.

4. Conclusiones

- Con la ayuda del prototipo diseñado fue posible recrear el efecto fotoeléctrico en el aula de clase de la Institución Universitaria CESMAG y así comprender mejor la teoría que involucra a este importante fenómeno físico. Además se evidenció que es factible elaborar este tipo de herramientas didácticas a partir del conocimiento de la Ingeniería Electrónica, añadiendo una componente de innovación al espacio académico de Optoelectrónica.
- Este proyecto se desarrolló haciendo uso del proceso descrito en ABP (Aprendizaje Basado en Problemas), siendo éste un caso exitoso en el cual se dio solución a un requerimiento de laboratorio ya que este efecto en la asignatura solo se estudia de manera virtual (simulación) y teórica.
- Se pudo observar que para cada fuente de luz que atraviesa el filtro, la corriente que pasa por el LED es diferente. Reconociendo que a mayor longitud de onda la corriente es menor.
- Utilizando el bombillo de luz UV con filtros acrílicos se registraron los datos más adecuados, debido a que al utilizar el color azul se obtuvo la mayor corriente y utilizando el filtro rojo se obtuvo la menor corriente, tal como lo describe el efecto fotoeléctrico y se observó en la simulación.
- Mediante el prototipo diseñado fue posible comprobar las principales características del efecto fotoeléctrico, en particular, la emisión casi instantánea

de los fotoelectrones, la dependencia de la energía cinética de los fotoelectrones con la frecuencia de la radiación y la no dependencia de este parámetro con la intensidad de la fuente.

- Se realizaron pruebas utilizando filtros de diferentes materiales tales como el vidrio y el acrílico, observando que las medidas obtenidas en el acrílico fueron las más acertadas en cuanto a que el material es el que arroja los mejores datos en comparación con lo predicho por la teoría del efecto fotoeléctrico. Los filtros más óptimos para realizar este tipo de experimentos son de muy alto costo, por lo cual resultó muy interesante lograr resultados con los materiales empleados en este montaje.

5. Referencias

- Erazo, Francisco y Erazo, Olger. (2015). Comparación entre la energía eléctrica producida por diferentes tipos de tecnologías de celdas solares fotovoltaicas para las condiciones meteorológicas de la ciudad de Pasto, Institución Universitaria Centro de Estudios Superiores María Goretti (CESMAG), Pasto, Colombia, pp. 73.
- Kale, Emin. (2013). Universidad de Colorado. Efecto Fotoeléctrico. Consultado el 9 de octubre de 2014 en <https://phet.colorado.edu/es/simulation/photoelectric>
- Morrison, Jonh. (2010). Modern Physics: for Scientists and Engineers. Academic Press, China, pp. 1 - 12.
- Ohanian, Hans. (1995). Modern Physics. Prentice-Hall, New Jersey, pp. 140 - 151.
- Teleformación para la Formación Permanente del Profesorado de la CARM, Filtros, CPR Región de Murcia. Consultado el 9 de octubre de 2014 en <https://phet.colorado.edu/es/simulation/photoelectric>

Sobre los autores

- **Daniel Sebastián Benavides Bravo:** Estudiante de Ingeniería Electrónica. Institución Universitaria Centro de Estudios Superiores María Goretti (CESMAG), séptimo semestre. dsbenavidesb@hotmail.com
- **Mario Andrés Cáceres Nocera:** Estudiante de Ingeniería Electrónica. Institución Universitaria Centro de Estudios Superiores María Goretti (CESMAG), séptimo semestre. tecnología.electronica@hotmail.com
- **Karla Patricia Reyes Sánchez:** Física, Máster en Fotónica Universidad Politécnica de Catalunya. Profesora IU CESMAG. kpreyes@iucsmag.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2015 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)