



EL EXPERIMENTO DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO PARA LA COMPRENSIÓN DEL CONCEPTO DE CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA DE LA RADIACIÓN

Pphotoelectric effect experiment for understanding the concept of quantization of
Radiation energy

Yeimy Gerardine Berrios Saavedra¹ Mayra Alejandra Ramos Bonilla²

Cómo citar este artículo: Berrios, Y. G., Ramos, M. A. (2016). El experimento del efecto fotoeléctrico para la comprensión del concepto de cuantización de la energía de la radiación. *Góndola, Enseñ. Aprend. Cienc.*, 11(2), 175-192. doi: 10.14483/udistrital.jour.gdla.2016.v11n2.a2.

Recibido: 7 de enero 2016 / Aceptado: 9 de agosto de 2016

Resumen

El presente estudio se inscribe en el marco de las investigaciones sobre la enseñanza de la física. La pregunta que lo orientó fue: ¿de qué manera una propuesta de aula, basada en el experimento del efecto fotoeléctrico, ayuda a los aspirantes a profesores de física, de la Universidad Pedagógica Nacional, a ampliar sus comprensiones sobre el concepto de cuantización de la energía de la radiación? La construcción del marco teórico se desarrolló, por una parte, con las ideas científicas sobre la cuantización de la energía y, por otra, con las propuestas pedagógicas de la enseñanza para la comprensión. Esta propuesta pedagógica estuvo guiada por la mirada investigativa de la metodología del estudio basado en diseño, tomando como principal elemento el uso de herramientas de aprendizaje tales como las tareas de predecir, experimentar y explicar (PEE). Se encontró que dichas tareas fortalecieron las comprensiones iniciales de los estudiantes sobre dicho concepto, en tanto que ellos enriquecieron y transformaron de manera progresiva sus modelos e ideas científicas, fomentando aspectos del trabajo científico en el desarrollo de la curiosidad, la imaginación y la motivación.

Palabras clave: cuantización, energía, enseñanza, comprensión, física.

1. Licenciada en física, Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia. Correo: dfi_yberrios490@pedagogica.edu.co.
2. Licenciada en física, Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia. Correo: dfi_mramos539@pedagogica.edu.co.

Abstract

This study is part of a research on physics teaching. The question that guided us was: how does a classroom proposal, based on the photoelectric effect experiment, help aspiring physics teachers at the National Pedagogical University to broaden their understanding of the concept of quantization of Radiation energy? The construction of the theoretical framework was developed, on the one hand, with scientific ideas about the quantization of energy and, on the other, with the pedagogical proposals of teaching for understanding. This pedagogical proposal was guided by the research perspective about study methodology based on design, taking as its main element the use of learning tools such as the tasks of Predicting, Experimenting and Explaining (PEE). It was found that these tasks strengthened students' initial understandings of this concept, while they enriched and progressively transformed their models and scientific ideas, fostering aspects of scientific work in the development of curiosity, imagination, and motivation.

Keywords: Quantization, energy, teaching, understanding, physical.

Introducción

Debido a la relevancia y prominencia del concepto de energía en los currículos de ciencias se ha desarrollado una línea de estudio referida a su enseñanza y aprendizaje (Solves, J. y Tarín, F., 1998). Algunos de los resultados de estos estudios sugieren que, en términos generales, los estudiantes de la escuela secundaria presentan dificultades para la comprensión del concepto de energía consensuado por las comunidades científicas, particularmente, en las ideas de transformación, transferencia, degradación y conservación de la energía (Hierrezuelo, J. y Molina, E., 1990; Pacca, J. y Henrique, K., 2004; Solves, J. y Tarín, F., 2004), porque las concepciones que tienen los estudiantes sobre la energía, con las que llegan al aula de clase, son propias del pensar del sentido común. De allí que habitualmente: a) asocien la energía a sus fuentes: la energía está en el sol, en el carbón y en la electricidad; b) atribuyan la energía a los sistemas en movimiento o con vida: los cuerpos que se mueven tienen energía; c) consideren la energía como sinónimo de combustible:

la energía es lo que mueve un carro; y d) asignen a la energía un carácter material: la energía como sustancia que se puede almacenar o consumir (Solves, J. y Tarín, F., 2004 y 1998; Pacca, J. y Henrique, K., 2004). La intención no es realizar una crítica a estas ideas relacionadas con el sentido común, más bien, lo que se busca es que los estudiantes puedan enriquecer y fortalecer sus ideas.

Del mismo modo, Cordero y Mordegliá (2007) plantean que los estudiantes universitarios —de carreras no Físicas— también tienen dificultades para comprender el concepto de energía. Prueba de ello es que al finalizar los cursos de física muchos tienen problemas para: a) diferenciar los conceptos de fuerza y energía; b) hacer uso de relaciones de causalidad, ejemplo: la fuerza como la causante lineal del cambio de energía; c) identificar la no conservación de la energía en sistemas mecánicos; d) distinguir entre tipos de energía; y e) alejarse de la concepción material —sustancialista— de la energía.

A pesar de que estos problemas se identificaron en la comprensión del concepto de energía, es probable que, si se estudian las dificultades en

la comprensión del concepto de energía de la radiación, aparezcan dificultades similares a las ya mencionadas. Este supuesto es fundamental debido a que en la literatura no se encuentran estudios relacionados con las dificultades que tienen los estudiantes para comprender dicho concepto. Cabe resaltar que en los trabajos de Hierrezuelo, y Molina (1990); Pacca y Henrique (2004); Solves y Tarín (2004); Cordero y Mordeglia (2007) se ha dejado de lado el concepto de energía de la radiación.

Adicionalmente, el concepto de energía se suele introducir, casi que exclusivamente, durante el estudio de los fenómenos mecánicos y térmicos (Solves y Tarín, 2004). De allí que, normalmente, no se aborde la idea de la energía del campo electromagnético, el concepto de energía en reposo —propio de la teoría especial de la relatividad— y el carácter cuantizado de la energía de la radiación y de los sistemas atómicos —característico de la física moderna— (Solves y Tarín, 2004).

Este concepto tiene un lugar protagónico en el desarrollo de los conocimientos científicos, pues hacia comienzo del siglo XX permitió explicar una serie de nuevos fenómenos tales como el efecto fotoeléctrico y la radiación de cuerpo negro. Para explicar, por ejemplo, el espectro de radiación de un cuerpo negro, Planck se vio abocado a introducir la idea de que la radiación emitida por este tipo de cuerpos no era continua, como lo sugería la teoría clásica, sino que correspondía más bien a un carácter discreto.

Además, el concepto de cuantización de la energía es un concepto estructurador en la física moderna, porque le permite al estudiante establecer relaciones con otros conceptos no menos importantes tales como: el concepto de discretización de la materia, cuantos de acción, fotón, radiación, luz, dualidad onda partícula, energía de la radiación, fotocorriente, fotoelectrón, entre otros.

En concordancia, debido a la relevancia científica del concepto de cuantización de la energía, las dificultades señaladas y las escasas investigaciones que se han realizado alrededor de su enseñanza-aprendizaje, se hace necesario diseñar propuestas

didácticas, tanto para la escuela secundaria como la universidad, capaces de ayudar a los estudiantes a desarrollar amplias y profundas comprensiones sobre dicho concepto.

Específicamente, fue de gran interés estudiarlo en un contexto universitario, ya que su comprensión exige conocimientos acerca de física de ondas y física cuántica. Por consiguiente, se desarrolló la didáctica para un grupo particular de estudiantes del curso de física moderna del Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional.

Marco teórico

Teniendo en cuenta que la metodología de investigación que orienta este trabajo es el estudio basado en diseño, el cual propone la necesidad de establecer modelos teóricos que, junto con la definición de una meta pedagógica, permiten mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje de los contextos educativos, (Rinaudo y Donolo, 2010) en lo que sigue se desarrolla una breve descripción de dichos fundamentos que cohesionan esta investigación.

¿Qué se entiende por comprender y por comprensión?

Esta investigación se sustenta en el marco conceptual de enseñanza para la comprensión. Siguiendo a Perkins, citado en Martínez (2007, p.27), se considera que “comprender es la habilidad de pensar y actuar con flexibilidad a partir de lo que uno sabe”, además comprender un tema implica explicar, justificar, extrapolar, vincular y aplicar. De otro lado, de acuerdo con Stone citado en Martínez (2007, p.27), “la comprensión es la capacidad de usar el propio conocimiento de maneras novedosas”.

Ahora bien, se reconoce que dentro de este marco existen cuatro elementos fundamentales que orientan el quehacer docente, estos son: a) los temas generativos, b) las metas de comprensión, c) los desempeños de comprensión y d) la evaluación diagnóstica.

Los temas generativos son aquellos contenidos centrales para una o varias disciplinas. Estos son

conceptos que ofrecen profundidad y desarrollo conceptual (Perkins y Blytche, 2005). En concordancia, el tema generativo de la presente investigación es precisamente el concepto de la cuantización de la energía de la radiación pues es un concepto potente y unificador propio de la física moderna.

Se debe decir también que las metas de comprensión hacen referencia a lo que el docente quiere que el estudiante comprenda, en este caso la meta apuntó a la comprensión del concepto ya mencionado.

Por otro lado, los desempeños de comprensión ayudan a construir y demostrar la comprensión de los estudiantes cuando ellos reconfiguran, expanden, extrapolan y aplican lo que ya saben.

Finalmente, la evaluación diagnóstica hace referencia a evaluaciones continuas de metas de comprensión. Estas configuran la planificación, al igual que estiman el progreso de los estudiantes, además de permitir la retroalimentación de sus comprensiones para así encontrar el sentido de lo aprendido (Martínez, 2007).

Reseña histórica del concepto de cuantización de la energía de la radiación

La construcción de la teoría sobre la cuantización de la energía de la radiación inicia con los estudios del fenómeno del efecto fotoeléctrico. Este fue descubierto por el físico alemán Heinrich Hertz en el año 1887, en sus experimentos para estudiar la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio, para los cuales utilizó dos esferas metálicas cargadas eléctricamente —una positiva y otra negativa— situándolas a una distancia considerable y observando su descarga mediante una chispa. Por accidente, sobre una de estas esferas incidió luz ultravioleta, permitiéndole a Hertz descubrir que se facilitaba la descarga. Aunque a este hecho no le dio gran importancia lo denominó el fotoefecto, sin saber que posteriormente, resultaría ser un descubrimiento muy importante para el desarrollo de la física moderna.

Más tarde, hacia el año 1897 el físico británico Joseph Thomson estudió el flujo de carga de una

placa metálica en un tubo de rayos catódicos, logrando determinar la existencia de partículas de carga negativa. Este trabajo fue uno de los principales aportes para que más adelante los físicos Hallwachs y Philip Von Lenard pudieran retomar el descubrimiento de Hertz.

En efecto, gracias a los aportes de Thompson, el físico alemán Hallwachs estudió el fenómeno descubierto por Hertz y encontró que el electrón adquiere energía en el proceso de interacción con la luz, la cual es la causante de que este se libere del material al cual está ligado.

Para precisar esto, el físico alemán Von Lenard reelaboró el diseño experimental de Hertz empleando un tubo de rayos catódicos, con dos electrodos, uno de carga negativa —cátodo— sobre el cual se hacía incidir la luz ultravioleta y el otro de carga positiva —ánodo—, el cual recolectaba los electrones que provenían del cátodo.

Lenard encontró que en este fenómeno había un flujo de carga negativa, haciendo posible medir una corriente, que la luz puede arrancar electrones de una superficie metálica y que estos se pueden propagar en el vacío (Eisberg, 1973). De lo anterior, concluyó que la energía del electrón estaba relacionada con la frecuencia de la luz, denominando a este fenómeno efecto fotoeléctrico.

Para dar una explicación satisfactoria a dicho fenómeno, que no contradijera las teorías clásicas de la luz expuestas por el físico James Maxwell en las que la luz, al ser parte del espectro electromagnético, tiene un carácter ondulatorio se planteó un modelo que expresara la interacción de las ondas electromagnéticas luminosas con la carga de los electrones, considerando que la energía cinética con la que estos se liberan está asociada a la amplitud de sus vibraciones como consecuencia de la interacción del campo eléctrico oscilante sobre estos. Para ello, el electrón debe absorber gran cantidad de energía, y de acuerdo con la teoría clásica para que este proceso se dé, el electrón necesita un tiempo grande, el cual no se aprecia experimentalmente. Este hecho dificultó la comprensión del fenómeno por mucho tiempo (Eisberg, 1973).

Paralelamente, existió una tesis muy debatida en el siglo XIX en la que predominaba la idea corpuscular de la luz. Se consideraba que esta era materia desprendida por cuerpos luminosos —teoría de emisión— admitida por Newton en 1704 y controvertida por Huygens al afirmar que la luz se comporta como una onda que se propaga en el espacio y se evidencia en los fenómenos de reflexión, refracción, interferencia y difracción.

A la par de estas discusiones sobre la naturaleza de la luz, que tenían un éxito alternado, se desarrollaba otro experimento crucial conocido como radiación de cuerpo negro, el cual, junto con el experimento del efecto fotoeléctrico, sin sospecha alguna, serían cruciales para dirimir entre las dos tesis expuestas acerca del comportamiento de la luz.

En este sentido, para entender el nuevo fenómeno de radiación de cuerpo negro, la física teórica debía describir el comportamiento de dicha radiación en función de su temperatura, para lo cual se apoyó en los estudios de la termodinámica, pero a una escala atómica (De Broglie, 1952). A partir de estos estudios los físicos británicos Rayleigh y Jeans buscaban explicar la densidad de energía de radiación, encontrando que esta era infinita para altas frecuencias de radiación; un resultado incoherente (De Broglie, 1952). A esto se le conoció como la catástrofe ultravioleta.

Más tarde, hacia el año 1900, el físico alemán Max Planck establece el equilibrio térmico en una cavidad negra, en la que su material absorbe y emite radiación, existiendo cambios de energía entre la radiación y la materia que se compensan dando una posible solución al problema de la catástrofe ultravioleta. Además, supone que es necesario introducir un elemento adicional a la teoría, de tal manera que se pueda restringir el papel de los osciladores a altas frecuencias, planteando que la materia no puede emitir energía radiante más que por cantidades finitas proporcionales a la frecuencia.

Gracias al desarrollo de los experimentos del efecto fotoeléctrico y cuerpo negro, en un momento de la historia en que la gran controversia entre las teorías relacionadas con los fenómenos de la luz

estaba en su máximo debate, Planck logra explicar la radiación de la luz emitida por cuerpos a altas temperaturas al suponer que esta debía tener mayor energía para alcanzar frecuencias más altas de radiación e introdujo para ello su famosa ecuación:

$$E = h\nu \quad \text{ecuación 1}$$

Donde E representa la energía de la radiación, h la constante de Planck cuyo valor es $6,625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ y ν la frecuencia de la radiación.

Lo que expresa esta ecuación es que la radiación se emite o absorbe en paquetes de energía, idea que fue confirmada por el experimento del efecto fotoeléctrico. Esto es, la energía de radiación depende del producto de su frecuencia por la constante de Planck.

Finalmente, Einstein retoma la idea de Planck de los paquetes de energía de la radiación y logra explicar el fenómeno del efecto fotoeléctrico, demostrando que la energía de la radiación se distribuye por paquetes llamados cuantos, los cuales tienen un valor que depende de su frecuencia. A esto se le conoce como la cuantización de la energía de la radiación.

Junto a estos experimentos surgieron otros que apoyaron la nueva idea de la cuantización de la energía de la radiación, a saber: el trabajo de Millikan, el estudio de los espectros atómicos, entre otros. Estos experimentos en su conjunto dieron paso a la creación de los sistemas teóricos de la física moderna, que se fundan en la idea de que la energía de la luz no es continua, sino que está cuantizada, es decir, es discreta a escala microscópica.

Propuesta de aula

Para el desarrollo de esta propuesta de aula se tiene en cuenta una fase que propone la metodología basada en diseño. Esta hace referencia al reconocimiento del contexto y de la población en la que se lleva a cabo la investigación. Dicho reconocimiento fue realizado antes del proceso de intervención en el aula.

En esta investigación participaron 18 estudiantes divididos en pequeños grupos siguiendo los lineamientos del curso de física moderna. En relación a la disposición metodológica del ambiente académico de este curso se sabe que el docente titular lo ha dirigido por más de cuatro años. Él acostumbra a organizar a sus estudiantes en grupos de trabajo, a fin de que cada uno realice varios de los experimentos cruciales que agenciaron la transición entre la física clásica y la física moderna, tales como: radiación de cuerpo negro, gota de Millikan, espectros atómicos, relación carga-masa, difracción de electrones, Frank Hertz y efecto fotoeléctrico.

Tradicionalmente, los estudiantes “rotan” para la realización de los experimentos, dado que se cuenta solo con un montaje experimental para cada una de las prácticas. Esta rotación semanal no implica ninguna secuencia estricta.

Es importante aclarar que aunque el profesor considera que es fundamental que sus estudiantes exploren el fenómeno del efecto fotoeléctrico, la realización de dicho experimento resulta inaccesible, porque el Departamento de Física no cuenta con el material de laboratorio requerido.

Es por esto que se considera necesaria la construcción de un dispositivo experimental que permita a los estudiantes explorar el experimento del efecto fotoeléctrico, ya que lo que las personas aprenden al experimentar está mediado por el instrumento que utilizan, es decir, que la teoría no está separada del instrumento (Ferreirós y Ordoñez, 2002).

Adicional a esto, y siguiendo los lineamientos de la metodología de investigación, se plantea la utilización de herramientas de aprendizaje, considerándose otra razón fundamental para construir el equipo experimental. Más adelante será descrito el funcionamiento del dispositivo experimental construido.

Ahora bien, para ayudar a los estudiantes a ampliar sus comprensiones sobre el concepto ya mencionado, se toma como inspiración la propuesta de Gunstone *et al.* (1988), citados en Hofstein, y Kind, (2012) de organizar las actividades de enseñanza y aprendizaje a través de las tareas de

predecir-observar-explicar (POE). Claro está, estas tareas fueron reelaboradas y redefinidas como: predecir-experimentar-explicar (PEE), considerando que sería más enriquecedor para los estudiantes desarrollar una experimentación y no simplemente una observación, pues la experimentación implica que ellos interactúen con el fenómeno en cuestión para construir comprensiones, debido a la gran carga teórica que involucra la elaboración de conceptos y a su vez implica reflexionar sobre las experiencias a la luz de sus conocimientos conceptuales (Hofstein y Kind, 2012).

Además, según Martí (2012), es necesario que los estudiantes actúen sobre los objetos y los manipulen, que exploren la realidad, se hagan preguntas, elaboren predicciones, comparen los resultados de sus acciones, busquen explicaciones a eventos. Lo cual se convierte en una actividad manipulativa y al mismo tiempo intelectual porque según Piaget (1985), citado en Martí (2012, p17) actuar sobre los objetos sin una predicción previa no tiene ningún valor educativo.

En lo que sigue se describen cada una de las tres tareas PEE con las cuales se pretende dar cumplimiento a una de las fases de la metodología basada en diseño, la cual está relacionada con la mejora de los procesos de enseñanza y aprendizaje.

Tarea de predecir

En esta primera tarea se pidió a los estudiantes anticipar un resultado, por escrito, razonando sobre lo que creían que ocurría en diversas situaciones, relacionadas con el fenómeno del efecto fotoeléctrico a partir de preguntas desencadenantes. Esto porque, siguiendo a Martí (2012), las predicciones o ideas de los estudiantes ocupan un lugar central y guían la acción en la búsqueda de lo desconocido.

Uno de los objetivos de plantear preguntas desencadenantes fue poner a los estudiantes ante la necesidad de elaborar una respuesta que implicara movilizar y transformar sus comprensiones como lo propone Roca (2005). Otro objetivo de plantear estas preguntas fue favorecer la discusión y la

participación dentro de los grupos de trabajo, para así estimular la motivación a aprender. Un último objetivo fue identificar las comprensiones iniciales de los estudiantes, dado que responder preguntas implica utilizar las comprensiones previas para dar respuesta a situaciones novedosas; es decir, implica pensar y actuar con flexibilidad.

Naturalmente, dichas preguntas fueron enmarcadas en un contexto y planteadas desde un horizonte de comprensión de las ciencias a partir de situaciones problema, es decir, no se hicieron en el vacío para inducir tareas. Para ello, el experimento del efecto fotoeléctrico fue el foco de atención porque se suponía que este permitiría a los estudiantes entender el fenómeno de la interacción radiación-materia, y en consecuencia comprender que la energía de esa radiación es discreta, ya que permite entender que esta energía solamente puede tomar ciertos valores y que tales valores son proporcionales a la frecuencia de la radiación incidente. A continuación, se presenta la tarea del predecir.

Situación problema: en 1887, el físico Alemán Heinrich Hertz en sus experimentos para estudiar las ondas electromagnéticas observa la descarga de dos esferas metálicas cargadas eléctricamente, mediante una chispa, las cuales se encuentran en oscuridad. Por accidente, sobre una de estas esferas incide luz de color violeta.

¿Crees que la luz que incidió sobre las esferas afectó la descarga? ¿De qué forma entiendes esa descarga, es decir, qué creerías que son esas chispas? ¿Cómo es su comportamiento, como el de una onda o como el de una partícula? ¿Qué piensas que hubiera sucedido si la luz incidente fuese de otro color, como, por ejemplo: roja, amarilla, verde, azul? ¿Consideras que la tonalidad de la luz — tenue o intensa— influyó en la descarga de las esferas? ¿Por qué sí o por qué no?

Modelo de luz: el problema de entender qué es la luz ha persistido desde la antigüedad. Los griegos pensaban que la luz eran partículas emitidas por los cuerpos, las cuales incidían en el ojo humano permitiendo ver. Posteriormente existieron dos perspectivas

que generaron controversia alrededor de la naturaleza de la luz; por una parte, Newton establecía que la luz tenía un comportamiento corpuscular y que se propagaba en línea recta de acuerdo con la teoría clásica y por otra, Thomas Young, a partir del experimento “de la doble rendija”, postuló que la luz se comportaba como una onda y no como una partícula. Este último modelo prevaleció sobre el modelo corpuscular, ya que permitía explicar los fenómenos de refracción, reflexión, difracción e interferencia de la luz. Actualmente, las comunidades científicas, consideran que la luz tiene un comportamiento dual, es decir, que se comporta como partícula, en algunos fenómenos, o como onda, en otros.

¿Cuál de estas formas de entender la luz —onda, partícula o dualidad— crees que te permite dar cuenta de las predicciones que propusiste en la parte 1? Razona acerca del por qué esta forma de entender la luz te permite explicar tus hipótesis.

Modelo de materia: el hombre, desde la antigüedad, se embarcó en la búsqueda por comprender la estructura de la materia. Uno de los primeros modelos para entender la materia fue el de J.J. Thomson, quién planteó que la estructura de esta era similar a un “pudin de pasas”, en el cual electrones de carga negativa eran partículas puntuales incrustadas en una esfera positiva. Posteriormente, Rutherford modificó ese modelo atómico, introduciendo la idea de un núcleo atómico alrededor del cual giraban los electrones. Estableció, además la idea de vacío entre el núcleo y los electrones. Ya por el siglo XX, Niels Bohr en 1913 planteó un modelo atómico que daba solución a algunos fenómenos, entre ellos, los espectros atómicos. Este modelo propone que el átomo presenta diferentes niveles de energía, en los cuales se encuentran los electrones con carga negativa y que en el centro del átomo se encuentra el núcleo cuya carga es positiva.

¿Cuál consideras que es el modelo atómico —Thompson, Rutherford, Bohr— más apropiado para justificar tu predicción? ¿Por qué? Argumenta. Si ninguno de los modelos mencionados se ajusta a tus predicciones, entonces: ¿cómo creerías que debiera ser ese modelo para satisfacer tus planteamientos?

Descríbelo y elabora una representación gráfica.

Como ya definiste tu modelo de luz y de materia en la primera parte ahora imagina y describe cómo es el proceso de interacción de la luz que incide sobre la materia que compone las esferas metálicas, en concordancia con tus predicciones. Haz una representación gráfica que ejemplifique tal proceso.

Formuladas estas preguntas, a fin de que los estudiantes predijeran, a la búsqueda de respuestas siguió una secuencia intencional de experimentación, recolección de datos, análisis y obtención de conclusiones. De esta manera, la experimentación puso a prueba la predicción inicial y condujo a su aceptación o rechazo.

Tarea de experimentar

El sentido que se dio a la realización de la tarea de experimentación estuvo orientado hacia la comprensión de los estudiantes del concepto de cuantización de energía, a través del estudio del fenómeno de efecto fotoeléctrico. Ello bajo la consideración de que el experimento juega un rol fundamental en la construcción de los conceptos científicos, ya que como lo afirman Koponen y Mäntylä (2006) en la enseñanza de la física la experimentalidad es un componente integral que aporta a la formación del conocimiento y a la conceptualización, dado que

“cualquier método de aprendizaje que exija a los estudiantes que sean activos en lugar de pasivos concuerda con la idea de que ellos aprenden mejor a través de la experiencia directa” (Hodson, 1994).

Ciertamente, durante la exploración del fenómeno del efecto fotoeléctrico, los estudiantes debían manipular materiales concretos, reflexionar sobre conceptos y realizar la toma de datos que para ellos eran significativos, dándoles sentido. Para esto, contaron con la asesoría de las profesoras investigadoras, con preguntas desencadenantes y con un dispositivo experimental intencionalmente diseñado, el cual les permitió construir tal fenómeno.

Con el fin de diseñar tal dispositivo experimental, se recurrió al trabajo realizado por el profesor Garver (2006). El montaje experimental construido cuenta con un tubo de vacío, el cual es el corazón del dispositivo. Este está conformado por un ánodo y un cátodo —del cual se liberan electrones—. A una distancia de 6 cm se encuentra la fuente de luz, leds que permiten variar la frecuencia de esta —azul 473 nm, verde 531 nm, amarillo 561 nm, rojo 603 nm y violeta 416 nm—. De igual manera, se puede variar la intensidad de la luz incidente —al variar resistencias en serie en el circuito de la figura 1b—. Además, el montaje cuenta con dos voltímetros y un potenciómetro que permite variar el paso de fotocorriente por el circuito de la figura 1c.

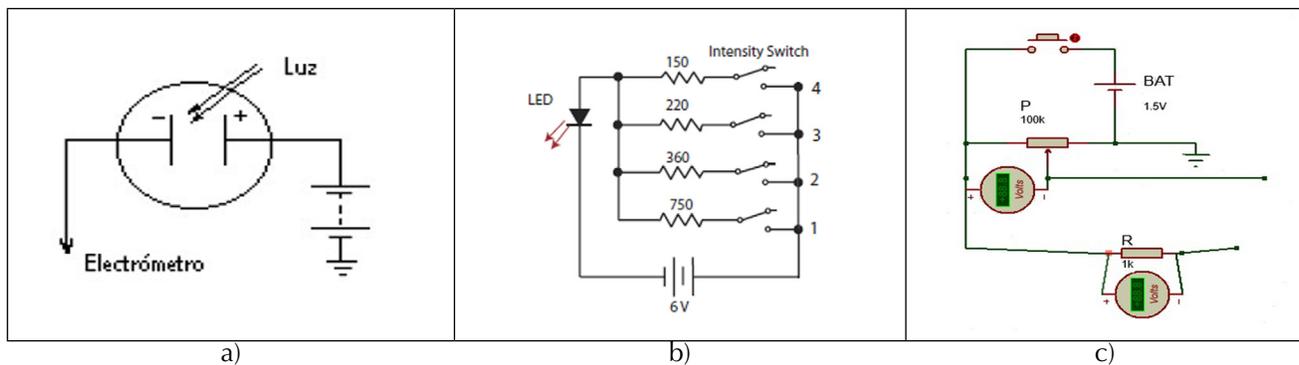


Figura 1. a) diseño experimental. b) circuito luz Led c) circuito fotoeléctrico. a) arreglo experimental para obtener el efecto fotoeléctrico.

Este diseño consta de una fuente de voltaje, dos electrodos; el ánodo, cuya función es coleccionar los electrones que se liberan de la placa opuesta y el cátodo.

Fuente: tomada de PIRIS, M.

De la misma manera que en la tarea de predecir, se realizaron algunas preguntas que condujeran a los estudiantes a establecer relaciones entre conceptos que no eran evidentes para ellos, que implicaran la necesidad de hacer un control de variables. Dándoles además su espacio y su tiempo para que ellos formularan sus propias preguntas y contrapreguntas.

En concordancia con lo anterior, la primera actividad que se propuso estuvo relacionada con la elaboración de una representación gráfica del posible dispositivo experimental que les permitiera construir el fenómeno de la interacción materia-radiación, a fin de que pensarán en las dificultades que podría tener el diseño experimental empleado por Hertz, en las variables involucradas y cómo estas se podrían medir. Este diseño experimental les permitiría valorar las predicciones hechas en la tarea 1. Las preguntas que se formularon antes de que los estudiantes realizaran el experimento del efecto fotoeléctrico, fueron:

¿Qué variables —magnitudes— crees que están involucradas en el fenómeno de la interacción materia radiación? ¿Por qué esas variables y no otras? ¿Cuáles serían los parámetros fijos? ¿Cómo se podrían medir dichas variables? ¿Es una medida directa o indirecta, es decir, se puede medir o debe calcular? Describe el proceso y los instrumentos de medida. ¿Qué variable te permite saber si las partículas de la materia se han “desprendido”? ¿Por qué esa variable y no otra? ¿Cómo podrías medirla? ¿Cuál es la carga de esas partículas?

Ya en el proceso de experimentación se presentó a los estudiantes el dispositivo experimental construido, explicándoles su funcionamiento. Paralelo a ello las preguntas fueron:

¿Cuando varías el color del led qué estás variando? ¿Por qué? Razona. ¿Crees que es importante variar la frecuencia de la radiación? ¿Para qué? ¿Cómo harías para variar la frecuencia de la radiación incidente? Explica por qué se podría variar de esa

manera. ¿Cuando varías la resistencia del circuito qué estás variando? ¿Por qué? Razona. ¿Crees que es importante variar la intensidad? ¿Para qué? ¿Cómo harías para variar la intensidad de la radiación incidente? ¿Qué crees que pasaría si el fototubo tuviese aire —partículas de gas—, es decir, si no hubiese vacío? ¿Facilitaría o no la “emisión” de partículas? ¿Por qué? Describe el proceso de interacción de las partículas de gas con los electrones “desprendidos”, ¿Cuál variable deberías fijar y cuál no para saber de qué depende la energía de las partículas que se “desprenden”? ¿Por qué? ¿Qué variables deberías relacionar? ¿Por qué?

Durante la realización del experimento, los estudiantes utilizaron dos multímetros en escala 200 mV. Con uno de ellos medían la diferencia de potencial entre los electrodos o voltaje de frenado, el cual les permitía determinar, posteriormente, la energía cinética con la que se liberan los electrones y con el otro medían el voltaje necesario para hallar la fotocorriente mediante la ley de Ohm. La fotocorriente es la que permite evidenciar la emisión de electrones del cátodo.

Para orientar estas mediciones se plantearon algunas preguntas de cierre:

¿Cómo podrías hacer para conocer el valor de la energía de las partículas que se han desprendido? ¿Esa energía se puede medir con el dispositivo experimental o se debe calcular? ¿Cómo se podría medir con los instrumentos que se tienen o cómo se podría calcular? Si has recogido valores de voltaje, ¿cómo podrías hacer para saber el valor de esa energía? ¿Cuál de los dos voltajes que mediste (el voltaje de frenado o el voltaje-fotocorriente) te permite conocer el valor de la energía de las partículas que se han desprendido? ¿Por qué un valor de voltaje te permite saber la energía de las partículas? ¿El voltaje que mediste depende de la frecuencia o de la intensidad de la radiación incidente? Si la energía cinética de las partículas cargadas depende del voltaje, entonces ¿esa energía dependerá de la frecuencia o de la intensidad de la radiación?

Por último, se pidió a los estudiantes realizar las respectivas tablas y gráficas de datos con el fin de que ellos relacionaran las variables que creían que eran significativas para saber de qué depende la energía de las partículas que se “desprenden” de la materia. Adicional a ello, se les pidió calcular los valores de la energía de esas partículas, no sin antes darles tanto los valores de las frecuencias de la luz emitida por el led como el valor de las resistencias para que ellos estimaran el valor de las intensidades, ya que a mayor resistencia menor intensidad de la luz.

En síntesis, los estudiantes realizaron tres gráficas con los valores obtenidos: a) voltaje de frenado en función de la frecuencia de la luz, b) fotocorriente en función de la intensidad y c) voltaje de frenado en función de intensidad. Para el caso de las gráficas b) y c), los valores de la intensidad estaban previamente definidos en una relación 1, 2, 3, 4, que hace referencia al cambio de la intensidad de la luz de un valor menor a uno mayor, es decir, existe una variación lineal en dichos valores.

Tarea de explicar

Por último, en la tarea de explicar se esperaba que, desarrolladas las actividades anteriores, los estudiantes aplicaran los nuevos conceptos a situaciones novedosas. Para ello, las preguntas realizadas tuvieron como objetivo que ellos tomaran conciencia de lo que habían comprendido y buscaran causas y/o consecuencias de algunos eventos teniendo a la base el concepto de cuantización de la energía.

Ciertamente tales preguntas se realizaron en relación a la metodología de trabajo, los resultados del experimento y el análisis de los datos ya que, como afirma Roca (2005), esto permite que los estudiantes conozcan datos y procesos relacionados con el tema de estudio y vayan construyendo una imagen de ciencia resultado de su experimentación. Por ello, realizamos preguntas específicamente en relación al concepto de cuantización de la energía:

Teniendo presentes tus predicciones y la experimentación, responde:

¿Cómo explicas que la fotocorriente aumenta al aumentar la intensidad de la radiación incidente? ¿Cómo podrías explicar que al aumentar la frecuencia de la radiación incidente, aumenta la energía de las partículas que se desprenden? ¿Los electrones liberados tienen energía? ¿De dónde la adquirieron? ¿Quién se la transmitió? En el proceso de interacción electrón-fotón ¿se presenta alguna colisión entre ellos? ¿Por qué? ¿Qué tipo de colisión —elástica o inelástica—? Describe el proceso de colisión entre ellos.

De la experiencia que realizaste, ¿podrías afirmar que los fotones son paquetes de energía? ¿Por qué? ¿Cómo concibes su comportamiento —corpúscular, ondulatorio o dual—? ¿La energía de la luz incidente es por paquetes o se distribuye uniformemente en el espacio?, ¿Qué comprendes por cuantización de la energía? Argumenta. ¿Consideras que la “investigación” que has hecho —predecir, experimentar y explicar— se parece a la de los científicos?

Imagina lo que sucedió en el proceso de interacción radiación-materia. Haz una descripción detallada que recoja tus explicaciones sobre cómo podría ser tal proceso, en relación a todos los conceptos ya trabajados. Realiza tu explicación en forma de narración, de relato, contando cómo ha pasado cada cosa.

Cabe resaltar que, al momento de construir las explicaciones, los estudiantes tuvieron en cuenta las predicciones realizadas en la tarea uno y los datos arrojados del experimento en la tarea dos.

Análisis: resultados y discusión

A continuación, se presentan las tablas de los resultados de cada tarea PEE y su correspondiente análisis.

Tarea: Predecir

Tabla 1. Respuestas de los estudiantes en la tarea de predecir.

Pregunta investigable	Predicción escrita	Predicción oral
¿Crees que la luz que incidió sobre las esferas afectó la descarga? Justifica. Establece las diferencias que te permitan comparar la descarga -chispa producida- de las esferas: i) sin luz violeta incidente ii) con luz violeta incidente.	Sí, porque cuando la descarga se da con luz incidente la chispa toma su color. Además, la esfera sobre la que incide la luz, se calienta. La luz está relacionada con fotones y la descarga con electrones... el fotón perturba al electrón	La luz influye en el tamaño de la chispa porque cuando la luz incide sobre la esfera cargada positivamente, la chispa es mayor que cuando la luz incide sobre la esfera cargada negativamente.
¿De qué forma entiendes esa descarga?, ¿qué creerías son esas chispas? ¿Cómo es su comportamiento, como el de una onda o una partícula?	La descarga perturba al aire calentándolo produciendo un cierto color en este y las chispas se comportan como ondas, porque son luz.	La chispa carga de color al aire, dependiendo de la cantidad de chispas así será el color del aire. El conjunto de chispas es una perturbación del espacio.
c) ¿Qué piensas que hubiera sucedido si la luz incidente fuese de otro color, como, por ejemplo: roja, amarilla, verde, azul?	Variaría la velocidad de la descarga: es más rápida cuando incide luz roja, seguida de la amarilla, verde y finalmente azul.	La descarga de la luz azul sería la más lenta por el efecto térmico, es decir, porque es la luz cuya temperatura es menor.
d) ¿Consideras que la tonalidad de la luz - tenue o intensa- influyó en la descarga de las esferas? ¿Por qué si o por qué no?	Entre más intensa es la luz, más caliente es, cambiando la velocidad de la descarga, y la chispa sería más luminosa.	Esto lo sabemos de uno de los experimentos que ya realizamos: radiación de cuerpo negro.
h) ¿Cuál de estas formas de entender la luz -onda, partícula o dualidad- crees que te permite dar cuenta de las predicciones que propusiste en la parte 1?	La luz tiene un comportamiento dual -como partícula o como onda- ya que la luz tiene características de ondas -intensidad- pero tiene partículas llamadas fotones.	La luz antes de incidir sobre las esferas se comporta como onda y una vez choca con la esfera se convierte en partícula porque la energía que la luz lleva se disipa.
i) ¿Cuál consideras que es el modelo atómico -Thompson, Rutherford, Bohr- más apropiado para justificar tu predicción?, ¿Por qué?, Argumenta.	El modelo atómico más adecuado a las predicciones es el de Bohr porque el electrón puede saltar de un nivel a otro produciendo una chispa de un color determinado.	En la situación planteada se dan intercambios de energía, para lo cual, esa energía debe estar en paquetes.
k) Como ya definiste tu modelo de luz y de materia, en la primera parte, ahora imagina y describe cómo es el proceso de interacción de la luz que incide sobre la estructura de la materia que compone las esferas.	En este proceso, se pueden presentar dos situaciones: i) que las partículas -fotón y electrón- no colisionen al haber vacío entre el núcleo y los electrones y ii) que las partículas sí colisionen, generando un intercambio de energía.	Es posible hacer cambiar de nivel a un electrón excitándolo.

Estos resultados fueron analizados y valorados a través de cuatro categorías, las cuales están relacionadas con: i) las ideas que están a la base; en relación a: la luz, la materia y su proceso de interacción; ii) las fuentes que se usan como: la intuición, los modelos teóricos, la evidencia empírica elaborada y las experiencias cotidianas; iii) la forma como los estudiantes se comunican; de manera coherente-incoherente; y iv) el pensamiento analógico.

En cuanto a la primera categoría, relacionada con las ideas, se encontró que los estudiantes mencionan importantes ideas científicas acerca de la luz y la materia para predecir. Por ejemplo, en relación a la naturaleza de la luz, afirman: “la luz tiene un comportamiento dual —como partícula o como onda— ya que la luz tiene características de ondas —intensidad— pero tiene partículas llamadas fotones”. Esto muestra que ellos conciben que exista un comportamiento de la luz como partícula y como onda, pero no lo asocian a un fenómeno en particular.

Adicional a ello, en cuanto al modelo atómico dicen: “el modelo atómico más adecuado a las predicciones es el de Bohr porque el electrón puede saltar de un nivel a otro produciendo una chispa de un color determinado, en este, con el salto de nivel se puede explicar porque vemos un color fijo y no la gama de colores de todo el espectro”.

Es posible comprender que los estudiantes conciben importantes ideas sobre la naturaleza de la luz y sobre el modelo atómico bajo el cual realizan sus predicciones, encontrando que conocen que la luz tiene un comportamiento dual y que el átomo presenta niveles de energía en los cuales se puede mover el electrón. Además, sostienen la idea de que cuando la luz incide sobre el átomo puede excitar al electrón haciéndolo cambiar de nivel: “Es posible hacer cambiar de nivel a un electrón excitándolo”.

Dentro de la segunda categoría fue posible notar que los estudiantes hacen uso de diferentes fuentes para realizar sus predicciones; una de ellas es la intuición que, a nuestro juicio, tiene que ver con la creatividad y la imaginación en la que el estudiante se apoya para realizar sus predicciones. Prueba de ello es que los estudiantes mencionan “porque cuando las esferas

se descargan, la chispa producida toma el color de la luz incidente”. Además “la esfera sobre la que incide la luz, se calienta y dependiendo de la frecuencia de la luz será el tiempo que tarde la descarga, es decir, a mayor frecuencia tarda mucho más la descarga”.

Como consecuencia de lo anterior, se encontró que los estudiantes inventan modelos basados en su imaginación para comprender que es lo que puede suceder en la situación propuesta. En términos generales, ellos consideran que la luz es la causante de las características de la chispa generada.

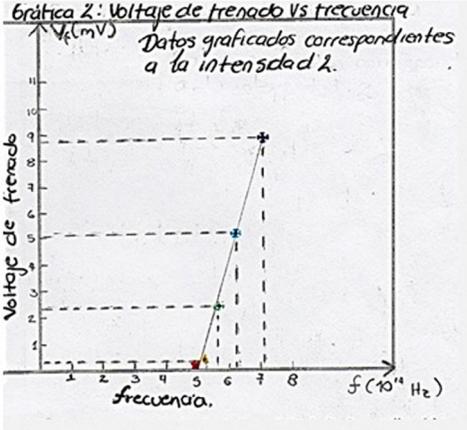
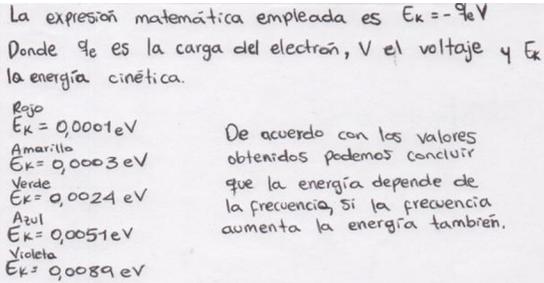
Otra de las fuentes que los estudiantes emplean para hacer sus predicciones es la de los modelos teóricos. Verbigracia “La descarga [de las esferas] de la luz azul sería la más lenta por el efecto térmico, es decir, porque es la luz cuya temperatura es menor”. De acá vemos que los estudiantes asocian diferentes frecuencias de la luz a diferentes temperaturas, haciendo uso de la teoría de la radiación de cuerpo negro, en la que a cada color se le asocia una temperatura dada. Sin embargo, lo hacen de forma errada, ya que la luz azul es aquella que posee la mayor temperatura dentro del espectro visible.

Otra fuente ampliamente empleada por los estudiantes es la evidencia empírica elaborada; ellos no solo usan modelos teóricos para predecir, sino que además hacen uso de lo que ya han venido comprendiendo en los experimentos que han realizado anteriormente en su curso de física moderna. He aquí un ejemplo: “entre más intensa es la luz, más caliente es, esto lo sabemos de uno de los experimentos que ya realizamos: radiación de cuerpo negro”.

En lo referente a la cuarta categoría, se encontró que algunas veces los estudiantes presentan incoherencia entre lo que dicen en una predicción y lo que dicen en otra. He aquí un ejemplo: los estudiantes comentan, por un lado, que la temperatura de la luz incidente depende del color de la luz —su frecuencia—, y por otro lado, exponen que la temperatura de la luz depende de la intensidad de la luz. Lo anterior muestra que ellos presentan una contradicción, en términos de las ideas científicas, ya que la temperatura no puede depender tanto de la intensidad y de la frecuencia de la luz, a la vez, porque son dos magnitudes diferentes.

Tarea: Experimentar

Tabla 2. Respuestas de los estudiantes en la tarea de experimentar.

Pregunta investigable	Respuesta escrita	Respuesta oral
¿Qué variables —magnitudes— crees que están involucradas en el fenómeno de la interacción materia-radiación?, ¿Cómo se podrían medir dichas variables?	La longitud de onda de la luz y la carga porque sí se varía la luz variaría el efecto. El aparato de medida sería un voltímetro para medir la carga y observando el color de la luz se podría saber su frecuencia.	Otras variables involucradas podrían ser las dimensiones del “chisporroteo”, el medio —su humedad, temperatura y presión— el color de la chispa y su frecuencia.
¿Cuándo varías el color del led, qué estás variando? ¿Crees que es importante variar la frecuencia de la luz? ¿Cuál creerías que es el sentido de variarla?	Al variar el color del led, se está variando la longitud de onda de la luz incidente, ya que cada color de la luz tiene una longitud de onda diferente.	Sería importante porque diferentes frecuencias de la luz incidente interactúan de manera diferente con la materia.
¿Crees que es importante variar la intensidad de la luz? ¿Cuál creerías que es el sentido de variarla?	Variar la intensidad de la luz está relacionado con el número de electrones que se “arrancan” de la materia.	A mayor intensidad, se “arrancan” más electrones.
¿Cómo podrías hacer para conocer la energía de las partículas que se han desprendido? ¿Esa energía se puede medir con el dispositivo experimental o se debe calcular?	Se debe mantener constante la diferencia de potencial y la intensidad de la luz, y se debe variar el color del led, o sea, la frecuencia de la luz incidente.	Si se conoce el voltaje se puede conocer la energía porque estas dos variables están asociadas, es decir, si se mide el voltaje, se está midiendo implícitamente la energía. La energía depende de la frecuencia.
Realiza las respectivas gráficas de los datos que recogiste que te permitan comprender de qué depende la energía de las partículas que se desprenden.	 <p>Figura 2. Los estudiantes elaboran una gráfica de Voltaje de frenado (relacionado con la energía necesaria para detener los electrones liberados del cátodo) vs. Frecuencia (color de luz led — roja, verde, azul y violeta—) manteniendo una variable fija correspondiente a la intensidad de luz número dos. En esta gráfica ellos obtienen una función lineal.</p>	
Con los datos que has recogido y apoyándote en las comprensiones que has alcanzado, calcula los valores de la energía de las partículas que se han “desprendido”.	 <p>Figura 3. Cálculos de la Energía Cinética.</p>	

De la misma manera que en la tarea 1, para el análisis de la tarea 2, se establecieron dos categorías de análisis para las respuestas de los estudiantes, relacionadas con: i) el sentido que ellos le dan a los datos al analizarlos e interpretarlos, y ii) la comunicación de una manera clara y coherente de los datos en relación a los hechos obtenidos.

Dentro de la categoría uno vale señalar que los estudiantes identifican las variables que consideran más importantes en el proceso interacción radiación-materia y sus respectivos instrumentos de medida. Por ejemplo, establecen que las magnitudes que están involucradas en el proceso de interacción son: "La longitud de onda de la luz y la carga porque sí se varía la luz variaría el efecto. El aparato de medida sería un voltímetro, para medir la carga, y observando el color de la luz se podría saber su frecuencia". Es posible notar que si bien identifican las variables involucradas no identifican de manera correcta el instrumento de medida de la carga eléctrica porque dicen que esta se podría medir con un voltímetro, pero en realidad el aparato correcto para medir dicha carga es el electroscopio.

De igual modo, ellos tratan de darle sentido a los datos obtenidos, estableciendo su importancia; al variar las frecuencias notan que varía el voltaje de frenado medido con el voltímetro. Por otra parte, mencionan que es necesario conocer la diferencia de potencial entre los electrodos y la frecuencia de la luz incidente argumentando que se deben variar por separado.

En este sentido consideran que es necesario variar el color de la luz porque desde la predicción asumen que esta influye en la descarga, por lo tanto, los cambios de color afectan de alguna manera lo que quieren medir, ya que con esto varían la longitud de onda y se puede apreciar la diferencia de la interacción radiación-materia con los valores registrados en los multímetros.

Así mismo, ven la necesidad de variar la intensidad de la luz porque afirman que, al variarla, varía el número de electrones desprendidos de la materia, es decir, "arranca" más electrones. En consecuencia, empiezan a comprender cómo se comporta

el fenómeno dependiendo de las variaciones que se hacen de la luz incidente, cuestionándose por qué afecta o no la frecuencia y la intensidad de la luz, cuestiones que en el desarrollo de la práctica experimental y en la tarea de explicar pueden ser solucionadas.

De lo anterior, fue posible encontrar que los estudiantes al momento de realizar su práctica experimental realizan reflexiones sobre lo que pueden medir y lo que pueden obtener a medida que toman datos, en gran medida orientados por sus predicciones y por las profesoras. Ellos logran encontrar cómo variar magnitudes y cómo relacionar variables, de modo que se les facilite la construcción de nuevas comprensiones en relación al fenómeno.

Esta variación de magnitudes es la que permite a los estudiantes comprender de qué depende la energía de las partículas que se desprenden de la materia. Ellos encuentran, a partir de los datos obtenidos, que se debe mantener constante la diferencia de potencial y la intensidad de la luz, y se debe variar el color del led, o sea, la frecuencia de la luz incidente. Adicional a ello, encuentran que al aumentar la intensidad de la luz la fotocorriente registrada aumenta.

Es por ello que consideran que para determinar la energía con la que son liberados los electrones, es necesario conocer el voltaje ya que están relacionados por medio de la ecuación 2, donde E es la energía cinética de los electrones liberados del cátodo, V , es el Voltaje de frenado (voltaje que se aplica entre los electrodos ánodo y cátodo) y q , es el valor de la carga eléctrica fundamental, este es un valor constante igual a $q = 1 \times 10^{-19} \text{Coulomb}$.

$$E = -Vq \quad \text{ecuación 2}$$

Además, dicen que es posible medir el voltaje, a diferencia de la energía que se debe calcular y afirman que el voltaje con el que deben determinar esa energía es el voltaje de frenado, ya que comprenden que este es el que se aplica para detener a los electrones que llegan al ánodo. Prueba de ello, es la afirmación: "el voltaje me permite conocer la

energía porque están asociados, lo podemos medir ya que cuando mido el voltaje implícitamente se puede medir la energía, esta también se puede calcular”.

De otro lado, en relación a la categoría dos que corresponde a la forma como los estudiantes comunican los datos obtenidos, se encontró que ellos generalmente los representan haciendo uso de tablas de datos y gráficas como las mostradas anteriormente, esta organización de los datos les permite evidenciar relaciones de proporcionalidad entre variables.

Para la realización de las gráficas proponen relacionar por una parte las variables que son independientes como la frecuencia y la intensidad de la luz y, por otra, las variables dependientes: voltaje de frenado y fotocorriente. Una de las conclusiones más importantes que ellos obtienen de estas gráficas es que la energía de las partículas que se “desprenden del material” no depende de la intensidad de la luz, sino de su frecuencia.

Adicional a ello, concluyen que la energía cinética depende del voltaje de frenado y la llaman energía cinética de frenado, con un valor positivo porque la carga es negativa, ellos mencionan “para calcular el valor de la energía, usamos la ecuación $E = -Vq$ el voltaje que nos permite calcular la energía es el voltaje de frenado, porque es el voltaje aplicado a las placas, que detiene al electrón, sabemos esto porque el otro voltímetro, que da el voltaje para calcular el valor de la fotocorriente, marca cero y en este momento podemos calcular la máxima energía que tiene el electrón”.

En conclusión, los estudiantes encuentran que el voltaje de frenado depende de la frecuencia de la luz porque cuando se varía la intensidad este voltaje se mantiene constante. Entonces, si aumenta la frecuencia de la luz también aumenta la energía de los electrones liberados. Esto muestra que la relación que hacen los estudiantes de los datos obtenidos y las gráficas realizadas concuerda con la explicación científica sobre el fenómeno de efecto fotoeléctrico.

Tarea: explicar

Finalmente, para la tarea de explicar se definieron tres categorías a fin de analizar las explicaciones de los estudiantes, las cuales hacen referencia a: i) explicaciones prácticas, entendidas como un tipo de justificación simple, sencilla, insustancial o trivial; ii) explicaciones descriptivas, que hacen referencia a un tipo de justificación en la cual se detalla cómo sucede cada cosa, refiriéndose a eventos relacionados, cualidades o circunstancias; y iii) explicaciones interpretativas, que son un tipo de justificación basada en una opinión personal o que puede ser entendida de diferentes modos.

La mayoría de las explicaciones de los estudiantes estuvieron clasificadas en la categoría dos —explicaciones descriptivas—, encontrando que ellos, en numerosas ocasiones, justifican con un grado de análisis alto mostrando relaciones entre la causa y el efecto. Ejemplo de ello es: “Cuando hay una mayor fotocorriente hay un mayor número de electrones arrancados porque hubo una mayor intensidad, es decir, mayor número de fotones, estas dos variables están relacionadas linealmente. Además, el electrón absorbe al fotón; si envió dos fotones saldrán más electrones que si envió uno”. Es posible apreciar que los estudiantes dan respuestas profundas y coherentes razonando de manera descriptiva.

Por la misma línea, cuando ellos se refieren al tipo de colisión entre el fotón y el electrón detallan que: “Es una colisión de tipo inelástica, el electrón y el fotón no se despegan, esto se concluye porque la luz no se refleja después de incidir. El electrón absorbe un paquete, una partícula, y queda excitado. Si el choque fuese elástico, entonces la luz rebotaría”. En esta afirmación, ellos no solo describen lo que sucede, sino que además identifican las posibles refutaciones.

Dentro de la tercera categoría, relacionada con las explicaciones de tipo interpretativo se encuentra que los estudiantes justifican a partir de lo que ellos, a juicio propio, creen que debe suceder durante la interacción entre la luz y la materia. Ellos dicen:

Tabla 3. Respuestas de los estudiantes en la tarea de explicar.

Pregunta investigable	Explicación escrita	Explicación oral
A) ¿Cómo explicas que la fotocorriente aumenta al aumentar la intensidad de la radiación incidente?	Cuando hay una mayor fotocorriente hay un mayor número de electrones arrancados porque hubo una mayor intensidad, es decir, mayor número de fotones.	Estas dos variables están relacionadas linealmente. Además, el electrón absorbe al fotón; si envió dos fotones saldrán más electrones que si envió uno.
B) ¿Cómo podrías explicar que al aumentar la frecuencia de la radiación incidente aumenta la energía de las partículas que se desprenden?	Al aumentar la frecuencia (número de oscilaciones por segundo) aumenta la energía cinética de las partículas, es decir los electrones se desprenden más rápido	Al aumentar la frecuencia se tiene mayor número de ciclos en un mismo tiempo.
C) En el proceso de interacción electrón-fotón ¿Se presenta alguna colisión entre ellos? ¿Qué tipo de colisión —elástica o inelástica—?	Sí, es una colisión de tipo inelástica (el electrón y el fotón no se despegan); esto se concluye porque la luz no se refleja después de incidir.	El electrón absorbe un paquete, una partícula, y queda excitado. Si el choque fuese elástico, entonces la luz rebotaría.
D) ¿Cómo concibes el comportamiento de los fotones —corpuscular, ondulatorio o dual—? ¿La energía de la luz incidente es por paquetes o se distribuye uniformemente en el espacio?	Los fotones son paquetes de energía. A pesar de que casi todos los fenómenos de la luz se explican como si está fuese una onda, cuando hay intercambios de energía, se comporta como partícula; con paquetes de energía.	Los fotones son quienes le dan la energía al electrón para soltarse del átomo. Tal energía dependerá de las diferentes longitudes de onda de la luz, o sea, dependerá de los fotones.
E) ¿Qué comprendes por cuantización de la energía? ¿Cómo construiste esa comprensión?, ¿para qué ese conocimiento? ¿Para qué te sirve este conocimiento en la disciplina? ¿Cómo representarías a otros tus comprensiones?	La energía viene en paquetes enteros, o sea, no hay valores irracionales. Antes se entendía la energía de forma continua, ahora se entiende de forma discreta (rampas, escalones).	La energía está cuantizada porque no puede existir medio fotón. Es decir, debe tomar valores iguales, múltiplos enteros de un valor más pequeño. Este conocimiento nos sirve para entender la naturaleza de la luz y la materia.
G) ¿En qué te parece que la “investigación” que has hecho se parece a la de los científicos?	Esta es la mejor manera para hacer un modelo físico que explique un fenómeno ya que vamos paso a paso.	Todo el tiempo quisimos saber cómo sucede el fenómeno, hicimos preguntas, tuvimos ideas y buscamos explicaciones.

“El electrón absorbe al fotón; si envió dos fotones saldrán más electrones que si envió uno”. Se logra inferir que ellos interpretan que en el fenómeno se da un proceso en el cual el electrón absorbe al fotón, a pesar que no tienen evidencia empírica para corroborarlo.

Por el mismo camino, dicen: “Es una colisión de tipo inelástica (el electrón y el fotón no se despegan); esto se concluye porque la luz no se refleja después de incidir”. Es notorio que los estudiantes van nutriendo sus comprensiones haciendo uso de interpretaciones, teniendo como marco de referencia la teoría de la reflexión de la luz.

De los anteriores resultados y discusiones es posible inferir que los estudiantes elaboraron sus explicaciones con ayuda de modelos teóricos, verificando la coherencia entre la experimentación y la explicación dada haciendo uso de diferentes canales de comunicación para expresarse como gráficas, tablas, cálculos, explicaciones escritas, orales, etc.

Para finalizar, y respondiendo a nuestra pregunta de investigación, se discutirá en las conclusiones acerca de las maneras como los estudiantes ampliaron sus comprensiones en relación al concepto de cuantización de la energía de la radiación, a partir del experimento del efecto fotoeléctrico.

Conclusiones

La pregunta de investigación que guio el presente estudio estaba orientada a saber de qué manera una propuesta de aula, basada en el experimento de efecto fotoeléctrico, ayuda a los aspirantes a profesores de física de la Universidad Pedagógica Nacional a ampliar sus comprensiones sobre el concepto de cuantización de la energía de la radiación. Pues bien, tras el análisis realizado fue posible encontrar que la propuesta de aula apoyada en las tareas de PEE funcionó en la medida en que enriqueció las comprensiones de los estudiantes. El crecimiento de dichas comprensiones se dio de manera diferencial en cada uno de ellos y se desarrolló de manera satisfactoria.

Es por esto que uno de los resultados más sobresalientes de esta investigación muestra que, durante la puesta en escena de la propuesta de aula diseñada, se fueron nutriendo las comprensiones iniciales de los estudiantes. Desde la tarea de predecir, ellos tenían comprensiones muy valiosas, las cuales se fueron fortaleciendo hasta que, posteriormente, en la tarea de explicar se ampliaron de manera sustancial, es así como al final de todo el proceso, los estudiantes dieron explicaciones que se apoyaban en el concepto de cuantización de la energía.

En suma, los estudiantes ampliaron sus comprensiones durante la realización de las tareas PEE en la interacción con sus compañeros y en las discusiones y el debate de sus ideas, ya que pasaron de explicaciones basadas en la intuición a explicaciones apoyadas en marcos teóricos y evidencia experimental. De la misma manera, el tipo de argumentos que los estudiantes dieron durante el proceso se fue fortaleciendo durante cada tarea, dado que ellos fueron pasando de explicaciones prácticas o simples a explicaciones altamente justificadas como las de tipo descriptivo e interpretativo.

Adicionalmente, los estudiantes explicitaron y transformaron de manera progresiva sus modelos e ideas científicas. Estas fueron avanzando poco a poco, hasta que eran más coherentes desde un punto de vista lógico, tenían un alcance explicativo más amplio y se apoyaban en más y mejores evidencias.

Lo anterior es producto de las situaciones problema planteadas inicialmente, las cuales implicaron a los estudiantes en procesos de análisis de conceptos y de fenómenos, más que en procesos de memorización de información y de adquisición de procesos preestablecidos. Además, las preguntas que fundamentaron nuestra propuesta de aula provocaron que ellos imaginaran y tuvieran curiosidad, dado que la búsqueda para confirmar o refutar las predicciones iniciales, generó motivación en los estudiantes.

Así mismo, es posible establecer que los estudiantes usaron al máximo algunos procesos propios de la práctica científica auténtica —predecir, experimentar y explicar— teniendo cada vez más autonomía tanto en lo que se refiere a la generación de datos y el establecimiento de hechos como a la construcción de ideas y modelos que sirven para explicar. Así, aprendieron a hacer ciencia y aprendieron sobre la ciencia, lo cual representó un valor agregado a nuestro objetivo de aprendizaje.

Por último, añadimos que la puesta en escena del dispositivo experimental construido contribuyó significativamente a la motivación y ampliación de las comprensiones de los estudiantes, en tanto que los conceptos asociados al fenómeno están estrechamente ligados al experimento y por ende al instrumento utilizado. Así, este dispositivo se constituyó en un gran aporte a nuestra propuesta de aula.

Referencias

- CORDERO, S. & MORDEGLIA, C. Concepciones sobre energía de estudiantes de carreras universitarias no físicas. Ponencia presentada en JORNADAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EDUCATIVA EN EL CAMPO DE LAS CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES, 18-19. octubre 2007.
- DE BROGLIE, L. **la física nueva y los cuantos**. Cuarta edición, editorial Lozada S.A. Buenos Aires, 1952.
- EISBERG, R. M. **Física moderna**. Limusa-Wiley, S.A. México, 1973.

- FERREIRÓS, J. & ORDOÑEZ, J. Hacia una filosofía de la experimentación. **Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía**. Pp. 47-86, 2002.
- GARVER, W. The photoelectric effect using leds as source light. **The physics teacher**. N.º 44, pp. 272-275, 2006.
- HIERREZUELO, J, MOLINA, E. Una propuesta para la introducción del concepto de energía en el bachillerato. **Enseñanza de las ciencias**. V. 8, pp. 23-30, 1990.
- HODSON, D. Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. En Ontario Instituto para estudios en educación. Toronto: Canadá, 1994.
- HOFSTEIN, A. & KIND, P. Learning from science laboratories. Second International handbook of science education. Dordrecht, Springer, 2012.
- KOPONEN, I, MANTYLA, T. Generative role of experiments in physics and in teaching physics: A suggestion for epistemological reconstruction. 2006.
- MARTÍ, J. Aprender ciencias en educación primaria. Editorial GRAÓ. España, 2012.
- MARTINEZ, J. **La enseñanza para la comprensión**. Fondo editorial Luis. Bogotá, 2007.
- PACCA, J. & HENRRIQUE, K. Dificultades y estrategias para la enseñanza del concepto de Energía. **Innovaciones didácticas**. V. 22, n.º1, pp. 159-166, 2004.
- PERKINS, D. & Blytche, T. Ante todo la comprensión. **Revista Internacional Magisterio Educación y pedagogía**. Pp. 19-23, 2005.
- PIRIS, M. **Física cuántica**. Editorial ISCTN. Cuba, 1999.
- RINAUDO, M, DONOLO, D. Estudios de diseño. Una perspectiva prometedora en la investigación educativa. **Revista de educación a distancia**. 2010.
- ROCA, M. Las preguntas en el proceso enseñanza-aprendizaje de las ciencias. **Didáctica de les Ciències**. UAB, 2005.
- SOLVES, J. & TARÍN, F. La conservación de la energía: un principio de toda la física. Una propuesta y unos resultados. **Enseñanza de la ciencia**. Pp. 185-194, 2004.
- SOLVES, J. & TARÍN, F. Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. **Enseñanza de la ciencia**. V. 16, n.º 3, pp. 387-397, 1998.

