



Hacia la conciencia cuántica a partir del efecto fotoeléctrico

Towards quantum consciousness from the photoelectric effect

Consuelo Escudero

Dpto. de Biología FCFN (UNSJ), Dpto. de Física FI (UNSJ)
cescudero@unsj-cuim.edu.ar

Eduardo A. Jaime

Dpto. de Física FI (UNSJ)
ej Jaime@unsj.edu.ar

Sonia B. González

Dpto. de Física y Química FFHA (UNSJ)
soniabeatriz.gonzalez@gmail.com

RESUMEN • En este artículo se indaga acerca de los recursos que emplean los estudiantes cuando tienen que responder a interrogantes cuyo contenido se refiere a fenómenos intangibles desde el punto de vista sensorial que vinculan el mundo a distintas escalas, tal como es el caso de la interacción de la radiación electromagnética con la materia. El estudio se realizó sobre tres situaciones problemáticas de efecto fotoeléctrico, y a partir de su análisis se pudieron diferenciar claramente cinco categorías de respuestas que nos dirigen a reflexionar acerca de la construcción de un concepto esencial de las ciencias naturales, como es el de energía, y su relación con el de interacción radiación-materia, dualidad onda-partícula, cuanto, entre otros. Se evidencia una malla de subjetividades que actúa como soporte de la formación de conceptos hacia cuya objetividad apuntan los esfuerzos del proceso de enseñanza.

PALABRAS CLAVE: interacción radiación-materia; energía; cuanto; mediciones macro y propiedades micro; representaciones.

ABSTRACT • This article inquires about the resources that students employ when they answer to questions related to non tangible phenomena that relate the world in different scales. Such is the case of the electromagnetic radiation and matter interaction. This research was focused on three problem situations related to the photoelectric effect and five categories were identified within their answers making us think about the construction of a main concept of the natural sciences such as energy and its relationship with the ideas of radiation-matter interaction, wave-particle duality, quantum, among others. It is evidenced a net of subjectivities is generated so that it works as the support for the objective concept formation that is the ultimate goal of the process of teaching.

KEYWORDS: radiation-matter interaction; energy; quantum; measurements macro and micro properties; representations.

Recepción: diciembre 2015 • Aceptación: junio 2016 • Publicación: noviembre 2016

Escudero, C., Jaime, E. A., González, S. B., (2016) Hacia la conciencia cuántica a partir del efecto fotoeléctrico. *Enseñanza de las Ciencias*, 34.3, pp. 183-200

INTRODUCCIÓN

El reto de enseñar algunos conceptos básicos de física moderna en cursos de física general ha provocado el interés de diversos grupos vinculados con la educación en física: profesores, docentes investigadores y físicos, preocupados por generar condiciones que promuevan un mayor acercamiento a las ciencias. Es así que efectuando una revisión de trabajos que se han publicado en la literatura en los últimos años (Greca, 2000; De Leone y Oberem, 2003; Fernández *et al.*, 2005; Lima *et al.*, 2010; Klassen, 2011; Gurkel y Pietrocola, 2011; Silva y Freire, 2014) se encuentran abordajes desde diferentes perspectivas: curricular, psicológica, epistemológica, psicopedagógica, didáctica, que exploran posibilidades de inclusión de esta temática.

Esta situación, en la que ya se ha consolidado la necesidad de incorporar contenidos de ciencia contemporánea, nos permite dirigir la mirada desde otro lugar, con una visión que no solo registre el libreto conceptual que se desarrolla en el aula, sino que sea capaz de reconocer la complejidad del aprendizaje de cierto tipo de conceptos cuyos atributos se encuentran alejados de la percepción sensorial, agregando aquí que los tiempos con los que se cuenta son además bastante exiguos.

En los últimos tiempos se han desarrollado investigaciones en el área de enseñanza de las ciencias (Álvarez, 1997; Escudero, 1995; De Posada, 1999; Concarì y Giorgi, 2000; Escudero, 2001; Malaver *et al.*, 2004; Escudero y González, 1996; Michinel y D'Alessandro, 1994; Níaz, 1998; Solbes y Traver, 1996) en las que se pone de manifiesto en el análisis del texto escrito la existencia de interpretaciones espontáneas o no formales de los fenómenos físicos y químicos que pudieran afectar al aprendizaje de las ciencias.

Reconocemos, quizá de forma obstinada, que uno de los factores que inciden a la hora de calificar la competencia de un profesional es la actitud que asume frente a la resolución de situaciones nuevas. Porque justamente de eso se trata la inserción actual del ciudadano, y sobre todo del universitario, que por su formación y por su experiencia la mayoría de las veces tiene que constituirse si no en líder, sí en orientador de probada capacidad intelectual y de ejecución.

En este sentido consideramos que la resolución de problemas constituye una línea de trabajo que por sí misma integra de forma privilegiada el bagaje de herramientas metodológicas, poco desarrollada a lo largo de las trayectorias escolares iniciales, fuertemente ligada a la formación y consolidación de conceptos científicos y tecnológicos y favorecedora de una sólida conformación de esquemas (Vergnaud, 1987; Vergnaud, 2009), imprescindibles a la hora de afrontar situaciones nuevas.

Una de las aristas que convendría tener en cuenta es todo aquello que tenga que ver con la imagen. Calidad primordial de innumerables objetos tecnológicos, se ha transformado en parte de la cotidianidad que construimos diariamente (Barberà y Badia, 2004; Otero, 2004; Lion, 2006). Con la mirada puesta en un medio plazo, se advierte que una mejora en el tratamiento de materiales gráficos podría actuar como catalizadora de acciones que contribuyesen a un aprendizaje más significativo.

Estamos de acuerdo con Maité Pro (2003) y Postigo y Pozo (2000) en que es posible mejorar considerablemente el aprendizaje significativo de los conceptos, otorgando a las imágenes un lugar en el que forman parte del conocimiento en construcción, procurando alejarse del papel complementario habitual de estas.

Testa, Monroy y Sassi (2002), Jaime *et al.* (2008) y Yanitelli *et al.* (2013) han señalado dificultades importantes con el análisis e interpretación de gráficas, por ejemplo en tiempo real, tales como: gráfica ideal frente a real, lectura global frente a local, forma de la curva, interpretación de correlaciones entre dos gráficas.

La naturaleza del átomo y su estructura se descubren analizando la luz. A su vez, la luz tiene una doble naturaleza, lo que altera de forma radical nuestra comprensión del mundo atómico. Así, se sitúa un nodo conceptual problemático en los vínculos que es necesario hacer visibles para articular de forma provechosa la dimensión audiovisual con la enseñanza, haciendo hincapié en el aspecto comunicativo (González *et al.*, 2013) además del operacional (Kosslyn, 2006; Escudero y Jaime, 2013).

También se busca el planteamiento de intervenciones didácticas donde las mediciones experimentales macroscópicas, tales como diferencia de potencial, corriente e intensidad de la luz, den indicios sobre propiedades microscópicas de la materia y de la luz como energía cinética del electrón, interacción uno a uno entre una unidad de «materia» y una unidad de radiación electromagnética, y estos puedan ser captados conscientemente por los estudiantes.

Un mejor conocimiento de dichos nodos en distintos contenidos, como el modelado, la resolución de problemas y también de situaciones problemáticas, la intermediación semiótica, los textos, las imágenes, contribuiría al arraigo de nuestros alumnos en las carreras científicas y tecnológicas.

MARCO TEÓRICO

La teoría de los campos conceptuales de Vergnaud es una teoría psicológica de los conceptos (Vergnaud, 1990), una mirada cognitivista del proceso de conceptualización de lo real. Se trata de un punto de vista pragmático en el sentido de que presupone que la adquisición de conocimientos es moldeada por situaciones, problemas y acciones del sujeto en esas circunstancias (Vergnaud, 1994). Es decir, que por medio de su resolución un concepto adquiere sentido para el alumno. Además, es una teoría de la complejidad cognitiva, que contempla el desarrollo de situaciones progresivamente dominadas, de los conceptos y teoremas necesarios para operar eficientemente en esas situaciones y de las palabras y símbolos que pueden eficazmente representar esos conceptos y operaciones para el individuo, dependiendo de su nivel cognitivo.

Gérard Vergnaud extiende en su teoría las preocupaciones iniciales de Piaget acerca de las operaciones lógicas generales y de las estructuras generales de pensamiento, hacia el estudio del funcionamiento cognitivo del «sujeto-en-situación». Además, toma como referencia el propio contenido del conocimiento y el análisis conceptual de dominio de ese conocimiento (Vergnaud, 1994; Franchi, 1999). Es decir, instaló en una zona de visibilidad el hecho relevante de cuánto depende el desarrollo cognitivo de situaciones y de conceptualizaciones específicas necesarias para lograr avanzar. Según Vergnaud, es infructuoso intentar reducir la complejidad conceptual, progresivamente dominada por niños y jóvenes, a algún tipo de complejidad lógica general, y en cambio es muy eficiente integrar contenidos (1994).

A principios de los ochenta, Vergnaud introduce una noción de concepción en la que interviene el sujeto. Para este autor, la concepción que construye un sujeto en relación con un concepto va variando con el tiempo y, en ese sentido, resulta ser un estado cognitivo global de dicho sujeto hacia un objeto determinado (físico, matemático, etc.).

Bajo este referencial, un concepto no puede reducirse a su definición, principalmente si nos interesamos por su aprendizaje y su enseñanza. «Los conceptos adquieren sentido por y para las situaciones problemáticas, es la capacidad de operatividad que generan» (Escudero y Jaime, 2013). Entonces, son las situaciones las que contribuyen a configurar los sentidos, a conceptualizar, es decir, a constituir una relación dialéctica entre situaciones y conceptos.

El sentido es una relación del sujeto con situaciones y significantes. Pero precisamente son los esquemas, las acciones y su organización, evocados en el sujeto por una situación o por un significante que constituyen el sentido de esa situación o de ese significante para ese individuo (Moreira, 2004).

Se entiende que las situaciones implican el entramado de un conjunto de tareas, donde la más mínima alteración en el desarrollo de una de estas últimas puede malograr todo el proceso o buena parte de él. Para el análisis de las situaciones se privilegian aquellos modelos que pertenezcan a la propia ciencia en la que se trabaja, en este caso los modelos físicos. Esto no significa que se dejen de lado otros tipos de análisis originados en la lingüística o en la lógica, solo que su papel es secundario (González y Escudero, 2013).

Es así como se entiende que en esta teoría la conceptualización ocupe un lugar preferencial. Teniendo presente que el sentido es «una relación del sujeto con las situaciones y los significantes», se advierte la importancia de las situaciones y de los problemas que se plantean para contribuir a esa construcción, es decir, al aprendizaje.

Toda vez que a un estudiante se le plantea un desafío para el que en realidad no se encuentra preparado (los esquemas adecuados no se encuentran disponibles), acudirá a aquellos que estima que tienen algún vínculo, tratando de combinarlos o de recortar lo que considera más útil, y por cierto en la medida en que posea un buen repertorio de esquemas tendrá mayores posibilidades de aproximarse a una respuesta plausible. Lo interesante de estas operaciones es rescatar todas aquellas semejanzas y diferencias que adquieren o modifican significados y se transforman en insumos para nuevos retos. Parafraseando a Vergnaud, decimos que la clave de la generalización de un esquema se encuentra en el reconocimiento de invariantes. En el caso de los estudiantes, ocultos bajo un lenguaje opaco que emplean en el cotidiano, y que transporta los significados que ellos atribuyen al contenido. En esta teoría el esquema es: «una organización invariante de actuación para un tipo de situación dada».¹

Para tener la posibilidad de intervenir sobre un concepto físico se deberá apelar a la identificación de significantes explícitos. De ahí que en esta teoría al concepto se lo considera un triplete de tres conjuntos: $C = (S, I, L)$, donde:

- S : conjunto de situaciones que le dan sentido al concepto (*el referente*);
- I : conjunto de invariantes operatorios asociados al concepto (*el significado*);
- L : conjunto de representaciones lingüísticas y no lingüísticas que permiten representar simbólicamente el concepto, sus propiedades, las situaciones a las que se aplica y los procedimientos que de él se nutren (*el significante*) (Vergnaud, 1990).

La teoría de los campos conceptuales apunta esencialmente a definir un objeto que sea de tamaño razonable, y a comprender cómo se desarrollan los procesos de conceptualización a lo largo de varios meses e incluso años. En palabras de Vergnaud, un campo conceptual se concibe como un espacio de problemas, de clases de problemas, y el conjunto de situaciones cuyo dominio requiere variedad de conceptos, procedimientos y representaciones simbólicas en estrecha conexión. Vale la pena considerar aquí que su integración no se produce espontáneamente, y que, afortunadamente, se ponen en juego en toda situación –cualitativa, cuantitativa, gráfica, experimental, teórica– en la que tengan que articularse para poder generar respuestas coherentes.

Por otro lado, el caso de la naturaleza de la luz presenta aristas controvertidas en el sentido de que constituye un claro ejemplo de «objeto no visible difícilmente representable», en el que confluyen discusiones acerca de la pertinencia de su representación. La noción de imagen está ligada a la percepción. En este tipo de casos, si bien puede haber una sutil percepción en el sentido clásico, existe una enorme cantidad de registros que han ido corroborando las previsiones apuntadas por los investigadores al poner a prueba los diferentes modelos de luz que hubo a lo largo de la historia.

De acuerdo con Martínez, el caso de la luz podría incluirse dentro de las representaciones heterogéneas: «Las representaciones heterogéneas son diferentes representaciones de una cosa o proceso que no podemos ver como describiendo partes que pueden agregarse para constituir una representación más completa, pero son la mejor representación del proceso que podemos tener» (Martínez, 2009).

1. No es un concepto simple, porque la misma palabra ha sido empleada con varias significaciones en el ámbito de las representaciones internas. Una discusión más detallada sobre estas diferencias puede encontrarse en Escudero (2005) y en Escudero y Moreira (2004).

Cada vez que se procura enfocar los análisis con la mirada que nos ofrecen las teorías brevemente descritas, nuevas posibilidades se van abriendo hacia un conocimiento más profundo acerca de las acciones que realizan los estudiantes a medida que se desarrollan los procesos cognitivos.

Una cuestión a la que frecuentemente se hace referencia en la teoría de los campos conceptuales es la necesidad de plantear situaciones a los estudiantes que permitan poner en acción sus esquemas porque siempre la evaluación será enriquecedora.

UN CAMPO CONCEPTUAL NUEVO Y TRES ESCENARIOS DIFERENTES

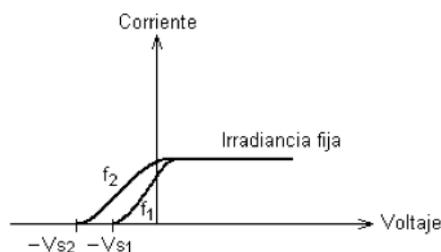
El efecto fotoeléctrico es comúnmente utilizado como el tema de introducción al estudio de la física cuántica. Sin embargo, una revisión de la literatura revela que, además de diversas debilidades y errores en su presentación (De Leone y Oberem, 2003), muchos estudiantes tienen problemas para comprender el propio efecto fotoeléctrico y, además, en relación con el modelo de fotón (De Leone y Oberem, 2003; González *et al.*, 2013), los libros de texto también contienen presentaciones incorrectas sobre tópicos como la función de trabajo y el concepto mismo de fotón (Klassen, 2011). Se requieren conceptos de electromagnetismo clásico y de relaciones fortalecidas –viejas y nuevas–, incluso algunos conceptos de mecánica (Escudero *et al.*, 2014a). En varios estudiantes no se ha consolidado el análisis de funciones (Chiu *et al.*, 2001; Escudero *et al.*, 2014b).

Año tras año observamos que estudiantes de carreras de ingeniería llegan con dificultades importantes a la hora de conceptualizar ondas y algunos conceptos introductorios de física moderna en el lapso de un cuatrimestre, lo que nos lleva a intentar distintas acciones de remediación vinculadas a alternativas de enseñanza que atiendan con mayor énfasis la complejidad de los aprendizajes y de su evaluación.

En primer año de las carreras de ingeniería en Argentina se suele desarrollar el tema de fuerzas en relación con las interacciones particularmente a nivel macroscópico. Luego se avanza en la interacción electromagnética, y en el carácter electromagnético de la materia buscando dar sentido a toda la fundamentación tanto química como electrónica. Se amplía al estudio de ondas mecánicas y electromagnéticas introduciendo un nuevo paradigma que contenga las ondas de materia.

Una manera práctica de provocar la manifestación de invariantes operatorios, dada su naturaleza implícita, es a través de la propuesta de situaciones. El eje principal de nuestro trabajo va a estar constituido entonces por los resultados del análisis y la reflexión de las tres situaciones problemáticas siguientes:

1. En el efecto fotoeléctrico, la superficie metálica tiene un potencial de frenado igual a $4,00\text{ V}$ cuando la energía incidente tiene una cantidad de movimiento lineal igual a $3,5 \cdot 10^{-27}\text{ Kg}\cdot\text{m/s}$ ¿cuál es la frecuencia umbral?
¿Por qué la existencia de una frecuencia umbral favorece la teoría del fotón y rechaza la teoría ondulatoria?
2. La figura es una curva de la corriente en función del voltaje para el efecto fotoeléctrico cuando se usa luz policromática. Explique cada detalle de la curva. ¿Qué frecuencia es mayor y por qué?



3. El norteamericano Robert A. Millikan (1868-1953) recibió el Premio Nobel en 1921 por su verificación del efecto fotoeléctrico. Sus datos relativos al litio (Li) son los siguientes:

| | | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Longitud de onda (<i>nm</i>) | 433,9 | 404,7 | 365,0 | 312,5 | 253,5 |
| Potencial de frenado (<i>V</i>) | 0,55 | 0,73 | 1,09 | 1,67 | 2,57 |

Trace una gráfica con estos valores y obtenga (*a*) la constante de Planck y (*b*) la función de trabajo del litio. (*c*) Determinar el potencial de frenado para los electrones emitidos cuando la superficie se ilumina con luz de una de las siguientes longitudes de onda: (*c1*) 200 nm, (*c2*) 400 nm y (*c3*) 600 nm. Explicar los resultados obtenidos.

La propuesta de la escritura y la lectura en la universidad, en cada disciplina y en distintos contenidos como herramienta de análisis, requiere encaminar el pensamiento no solo de los estudiantes. Las relaciones entre pensamiento y lenguaje son muy poderosas en este sentido.

La escritura no es solo un canal para comunicar lo que ya se sabe, sino una herramienta de análisis que requiere orientar el pensamiento. Resolver una tarea, un ejercicio o una situación problemática, también lo es. Escribir en otro lenguaje implica a su vez volver a pensar. Por otro lado, hoy también sabemos que leer no es simplemente lo que la bibliografía dice, sino cómo buscar lo que será posible comprender.

A su vez, construir conocimiento a partir de la información suministrada por una imagen requiere la adquisición de competencias muy específicas. La identificación de elementos a través de su lectura, de relaciones entre las variables involucradas en busca de patrones y tendencias, así como de relaciones conceptuales a partir del análisis global de la estructura del conocimiento gráfico que posibilita la recuperación de otras ideas disponibles, resulta ser una instancia de reconstrucción intrínseca de la representación de imágenes (estáticas y dinámicas) para resignificarlas. En la propuesta de aula planteada una alternativa utilizada fue el uso de simulaciones.

Más importante que considerar [a la simulación] un recurso novedoso y motivador para los alumnos es tenerla en cuenta porque resulta una herramienta que colabora en la conceptualización de un modo distinto a cuando la misma noción es abordada con otra herramienta. Para ello, resulta imprescindible tener en cuenta tanto las numerosas ventajas que ofrecen las simulaciones en la enseñanza de la Física, como las no menos numerosas limitaciones (Roa e Islas, 2016).

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS

Este trabajo forma parte de una investigación de mayor alcance cuyos objetivos se relacionan con la búsqueda de huellas que indiquen la presencia de invariantes operatorios de interés para el aprendizaje de nociones de alto nivel de abstracción, como son muchos de los conceptos que se emplean en la física moderna.

Puede encuadrarse como un estudio de caso, que contribuye a integrar la serie de investigaciones programadas para continuar indagando en este capítulo de la física.

Se presenta un análisis realizado a partir de situaciones problemáticas propuestas a estudiantes de segundo año de universidad y a estudiantes avanzados, con ocasión de prepararlos actitudinal y conceptualmente para abordar aspectos de la interacción de la luz con la materia a través de la comunicación docente-alumno.

El presente estudio fue realizado en situación real de aula. Se trabajó con un grupo de 41 alumnos (20 en 2012, 12 en 2013 y 9 en 2014) pertenecientes a una carrera de segundo año en ingeniería y otro formado por 5 alumnos avanzados en la carrera.

Una vez aplicada la propuesta en 2012, se analizaron las resoluciones escritas y se realizaron las primeras reflexiones consignadas en Escudero y Jaime (2013). Nuevas versiones de la propuesta fueron llevadas a cabo en grupos equivalentes en los cursos 2013 y 2014 y se produjeron nuevas comunicaciones (Escudero, Jaime y González, 2014a y b). Aquí se analiza la totalidad.

Durante el proceso mencionado, se intercalaron prácticas, simulaciones y evaluaciones, de las que se seleccionaron algunas tareas para este estudio, teniendo en cuenta que eran oportunidades para que expresasen las nociones y relaciones que iban construyendo.

Se ha procurado sostener el paradigma interpretativo en el sentido de resaltar el significado de la palabra, de la acción y sobre todo de las relaciones que se proponen por parte de los alumnos, porque en ellas es donde generalmente quedan grabadas las huellas de los procesos cognitivos que se activan frente a las situaciones problemáticas. Los protocolos utilizados se construyeron a partir de hipótesis que se fueron sometiendo a validación a medida que fue avanzando la investigación (Escudero y Stipich, 2008). Pero también reconociendo que la ciencia tiene un carácter institucional cuya producción exige un elemento de universalización y de demostración.

La universalización, en la medida en que se trata de producir un conocimiento del objeto en sus aspectos no meramente circunstanciales sino generales (es decir, exportables a otros tiempos y a otros espacios); y la demostración por cuanto la aspiración a valer en el dominio público exige que se someta a los criterios normativos mediante los que una comunidad dada legitima la circulación de conocimientos y la estabilidad de sus creencias básicas (Samaja, 2006: 34).

Afirmarse en una postura cualitativa significa, además de posicionarse en una actitud interpretativa, basarse en datos contextualizados, sensibles al ámbito en el que se producen y también comprometerse con una mirada que advierta los detalles. Estamos de acuerdo con la importancia que se le otorga al significado y la interpretación, al contexto, al comportamiento humano en toda su complejidad y al alcance asignado al estudio del lenguaje de los actores, a sus prácticas, a sus diferentes conocimientos y a sus distintos puntos de vista. Aplicar técnicas estadísticas será motivo de otro trabajo. En el presente es hacer visible la existencia de algunas estructuras cognitivas.

DISCUSIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En 1900 Planck presenta las bases de lo que sería una gran revolución en el pensamiento científico: la mecánica cuántica, una teoría que abarca los fenómenos a nivel micro. En 1905, basándose en estas ideas, Einstein propuso una nueva forma de teoría corpuscular en la cual afirmaba que la luz consistía en globos o partículas de energía. Cada uno de tales cuantos de energía radiante o fotones, como se les habría de llamar, tenían una energía proporcional a su frecuencia. La imagen mental de una partícula atómica (electrones, neutrones, etc.) como un trozo localizado de materia ya no satisface.

Un posible modelo teórico según Einstein podría estar representado matemáticamente por:

$$n [hf] = n [\Phi + k_e]$$

Un estudiante, para resolver situaciones problemáticas como las aquí presentadas, necesita captar esencialmente que la energía radiante –en forma de rayos X, ultravioletas o luminosos– que llega a diversos metales expulsa electrones de sus superficies, donde la interacción específica es uno a uno entre un «cuanto de materia» y un «cuanto de radiación». Mientras, por otro lado, el potencial de frenado limita el movimiento del electrón. En otras palabras, no puede disponer de más energía que la provista por el fotón incidente.

Una posible representación externa del cuanto de energía correspondiente a fotones –discontinuo dentro de la continuidad– se muestra en la figura 1, donde n encarna lo discreto y f lo continuo. A

principios del siglo xx, en las ciencias físicas se consideraba que la variación de la energía (ΔE) tendía a cero para cualquier radiación electromagnética (constituida por la frecuencia), y su representación cuántica: h (hoy constante de Planck) podía valer cero. En cambio, bajo la mirada cuántica la variación de la energía tomaba un valor mínimo igual a hf con $h \neq 0$.

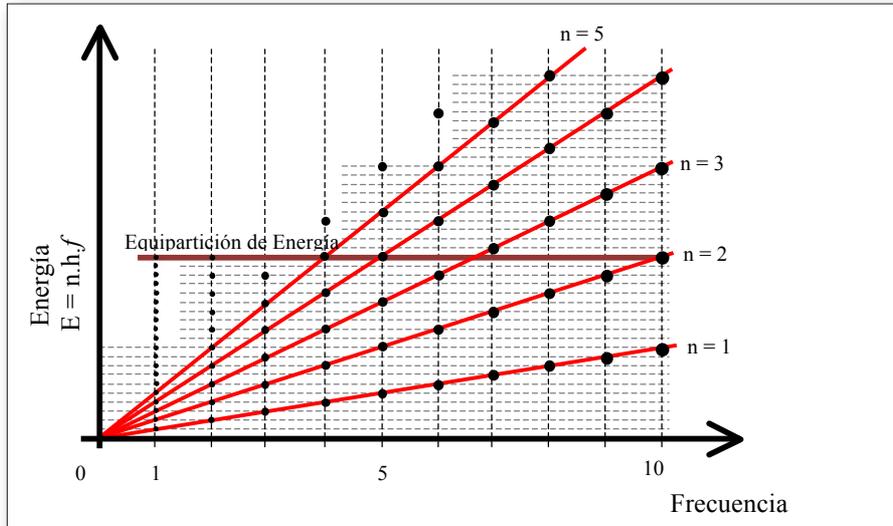


Fig. 1. Energía de n «cuantos de radiación» en función de la frecuencia, donde $h = 6,67 \cdot 10^{-27} J \cdot s$.

No es trivial hacer conscientes, prácticamente al mismo tiempo, aspectos tales como que el potencial de frenado (donde $i_{fc} = 0$) para un determinado fotón se asocia con la energía cinética máxima que puede tener un electrón, que la frecuencia del haz incidente se asocia a la energía de un fotón y, por último, que la función de trabajo se asocia con el material (electrón ligado) sobre el que se hace incidir la luz y también con la frecuencia umbral (obtenida experimentalmente en forma indirecta).

Para situaciones nuevas como las propuestas la persona dispone de algunas competencias, aunque no suficientes para resolver de inmediato, sino que necesita tiempo de búsqueda, de intentos, que pueden o no culminar en un acierto. Cobra sentido aquí el concepto de esquema al que sintéticamente Franchi (1999) define como «una forma estructural de la actividad», y se produce una puesta en juego de varios de ellos, con los que se ensayan diversas alternativas: uniones, intersecciones, combinaciones, etc. De ello resulta una verdadera instancia de aprendizaje. Uno de los esquemas posibles sería advertir la relación de Einstein como la ecuación de una recta.

En cierto sentido, se relaciona con el juego de cuadros propuesto por Douady (2011), desde donde se enfoca el contenido; así, es posible que se activen los conocimientos matemáticos y geométricos, la lectura de imágenes (esquemas, simulaciones, gráficos, secuencias, etc.) y también el lenguaje natural.

La base conceptual primitiva para haber alcanzado lo anterior conlleva conceptos afianzados de trabajo, energía potencial, asociados con otras formas específicas de energía (radiante, cinética) y con interacciones definidas observadas en la naturaleza, o próximas a ello. Se necesitan relaciones trabajo y energía, fortalecidas, articuladas con interacciones específicas. En otra investigación (Escudero y Jaime, 2009) hallamos este mismo tipo de condiciones necesarias, aunque para el estudio de los movimientos en mecánica.

Análisis de las situaciones

Para ver la profundidad de las dificultades en la temática se ha comenzado por las respuestas que distan más del modelo científico. Su análisis permitió diferenciar cinco categorías definidas según la operación del proceso cognitivo realizado:

- Categoría I: No realizan consideraciones energéticas ni diferencian la tendencia general de los datos en los detalles particulares. La única operación que se realiza es un reconocimiento (o percepción) plano, de la que puede inferirse la naturaleza semiótica de los cambios ligada al proceso de aculturación de las personas en el desarrollo en un área. No avanza en su solución.
- Categoría II: No realizan balances energéticos y muestran asociaciones entre potencial de frenado V_0 con función de trabajo Φ_0 (y no con la energía cinética), concluyendo que $f_{inc} = f_u$ (observar que la f es una «energía», parece no ser obvio). No explicitan relaciones entre energía y las interacciones específicas: no han conceptualizado función de trabajo. O bien, advierten que las frecuencias f_1 y f_2 son mayores que la frecuencia umbral. Sin embargo, no advierten el rango donde la tensión se hace negativa anulando la corriente fotoeléctrica. Además de la percepción, atribuyen una causa al cambio, pero sin profundizar en ella. La forma «global» de la curva parece oscurecer cualquier otra información que se visualiza en la gráfica.
- Categoría III: Plantean un balance energético, aunque siguen confundidas y mezcladas magnitudes como potencial de frenado V_0 y función de trabajo Φ_0 , energía cinética y cantidad de movimiento. Arriesgan respuestas que aparecen desvinculadas de los modelos teóricos. Si bien consideran la energía como causa de una variación (o cambio), no comprenden en qué sentido ocurren las transformaciones.
- Categoría IV: Plantean un balance energético, sin embargo, todavía dudan sobre las energías y los trabajos presentes, así como su relación con las magnitudes medidas. Procuran fortalecer algunos vínculos entre la causa (la energía incidente de luz expresada en función de la frecuencia) y la(s) consecuencia(s) (la liberación de electrones en un metal, la circulación de corriente en un circuito) de una manera coherente. Por sostener el balance energético con sus dimensiones adecuadas pueden perder alguna condición de contorno, por ejemplo, aluden a la presencia de dos materiales.
- Categoría V: Logran distintos vínculos entre la causa (la energía incidente de luz expresada en función de la frecuencia y también como función de la cantidad de movimiento lineal) y la(s) consecuencia(s) (la liberación de electrones en un metal y su relación con las características del material, la circulación de corriente en un circuito) de una manera coherente. También utilizan puentes entre estructuras matemáticas y pensamiento físico: conceptos como igualdad se trabajan autónomamente en ambos miembros. Incluso se preguntan si la gráfica «da» siempre la energía cinética del electrón ¿para todos sus puntos? o ¿en determinado valor del potencial?

Se seleccionaron respuestas representativas de las modalidades que se pudieron advertir en el corpus, integrado por todas las producciones de los alumnos, cuyos contenidos revelan, aunque tímidamente, la naturaleza de diversos obstáculos que, para este tipo de investigación, son de gran valor intrínseco. Por razones de espacio no figuran aquí de forma completa. Pueden consultarse en dos trabajos (Escudero *et al.*, 2014a y b).

Cada vez que se intenta desarrollar un tema nuevo –en el sentido de que hay una construcción teórica que resulta de una combinación diferente de viejos y nuevos conceptos–, emerge la indiferenciación de nociones que poseen un notable contenido en sí mismas, como la energía, los campos y sus relaciones con objetos considerados materiales (electrón, protón, átomo), etc.

En las aproximaciones iniciales a un modelo tan alejado de los sentidos como es un modelo de la luz, de la materia y su interacción, se aprecia la necesidad de reforzar toda acción que ayude a discriminar conceptos. A continuación se sintetizan e ilustran las categorías halladas:

Podemos decir que en la *categoría I* solo se identifica el fenómeno físico y su asociación a la energía a lo sumo por intermediación semiótica pero sin hacer uso de ella.

V_{s1} y V_{s2} : son potenciales de frenado. « f_0 »: frecuencia de frenado para valores menores a esta no se produce efecto fotoeléctrico. La irradiancia fija depende directamente de la corriente.

$$V = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda_1 = V/f_1 \rightarrow \lambda_2 = V/f_2$$

$$V_1/f_1 = V_2/f_2 \quad V_1 > V_2 \rightarrow f_2 < f_1 \text{ (Solución representativa de SP2.)}$$

En la *categoría II* se limita a calcular la frecuencia de la radiación incidente y a asociarla con la frecuencia umbral sin que medie parámetro. Parecen no ser conscientes de que no consideran la presencia de la materia (átomo) en la interacción total del sistema bajo estudio.

Desconecta el modelo experimental de la gráfica transformando la luz incidente. Aparentemente, la corriente constante estaría asociada a la corriente de saturación, igual para ambas frecuencias. Pueden leer V_s en valor absoluto.

$$V_0 = 4 \text{ V}$$

$$p = h/\lambda$$

$$p = 3,5 \times 10^{-27} \text{ kgm/s}$$

$$E = h \cdot f$$

$$p = h/\lambda \rightarrow 3,5 \times 10^{-27} \text{ kgm/s} = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s} / \lambda$$

$$\lambda = 189,14 \text{ nm}$$

$$c = f \lambda \rightarrow f = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} / 189,14 \text{ nm}$$

$$f_0 = 1,58 \times 10^{15} \text{ Hz} \text{ Frecuencia umbral (Solución representativa de SP1).}$$

En la *categoría III* se vincula el desagregado de la energía incidente con la necesidad de una energía mínima para desprender el electrón y ponerlo en movimiento. Se desdibuja incluso por no tener afianzadas magnitudes clásicas.

Pone en juego que cuando se ilumina con luz policromática en la parte de saturación de corriente la luz se transforma en monocromática, ¿puede cambiar la frecuencia en estas condiciones? La frecuencia se unifica cuando la intensidad es la misma.

« f_2 » es de mayor frecuencia porque tiene más voltaje. Las ondas de frecuencias se las hace variar su voltaje y corriente hasta obtener una suma de las dos ondas que irradian luz monocromática. Al iluminarse con ondas de distinto « λ » se obtiene luz monocromática (Solución representativa de SP2).

En la *categoría IV*, si bien se plantea la necesidad de otro balance energético, no es significativo todavía el término de la energía cinética y su relación con las variables en juego: conservación de energía (la liberación de electrones en un metal, la circulación de corriente en un circuito, la creación o destrucción de un fotón). Tampoco se asocia con el potencial de frenado.

$$E = 3,5 \times 10^{-27} \text{ kgm/s}$$

$$E = h \cdot \lambda$$

$$p = h / \lambda$$

$$h = 6,64 \times 10^{-34} \text{ J.s.}$$

$$f = v / \lambda$$

$$\lambda = E/h$$

$$V = 4 \text{ V}$$

$$f = ? \quad f = 4 \text{ V} \cdot h/E \quad f = 4V \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}}{3,5 \cdot 10^{-27} \text{ kg.m / s}} = 758 \times 10^{-9} \text{ 1/s (Solución representativa de SP1).}$$

En la *categoría V* se considera el marco teórico básico del efecto fotoeléctrico. Permuta (o no) las variables independiente y dependiente: corriente e intensidad. A pesar de que se producen resoluciones que relacionan energía con el cambio de configuración y la creación o destrucción de un fotón, lo hacen desde preconcepciones aferradas a estructuras apoyadas en contenidos de la vida cotidiana.

Este microanálisis de tipos de soluciones es el que nos permite advertir que hay muchos casos con una aproximación adecuada a la noción de energía pero que no ha sido convenientemente ampliada para adaptarse a la mayor cantidad y variedad de campos conceptuales transitados, para su proyección en relaciones con luz y partículas subatómicas. Esto nos remite a reflexionar acerca de las dificultades que acompañan frecuentemente a la construcción de un concepto tan esencial y camaleónico como es el de energía. Las soluciones muestran claramente los esfuerzos por establecer lazos con objetos comunes, que aún con precisiones les permiten relevar indicios de que sí poseen una idea aproximada acerca de ella.

La gráfica, en uno de los problemas singularmente, no comunica –al parecer– conocimiento ni apela a la ecuación de emisión de fotoelectrones dependiente de la frecuencia de radiación. Sin embargo, un buen uso puede ayudarnos a predecir aspectos que no expresa directamente: cómo obtener la frecuencia umbral f_u y si el potencial de frenado es proporcional a la frecuencia. Esa interpretación posibilita tomar conciencia de que la relación aquí es uno a uno y de que la energía está cuantizada.

En la última situación analizada se observan las mismas tendencias generales. Podría decirse que obtener la constante de Planck se constituyó en un nudo que desatar desde el punto de vista de su contenido conceptual. Los estudiantes se preguntaron cómo puede obtenerse una constante universal a partir de valores en una tabla. El obstáculo que hay que superar parece obedecer más a la naturaleza de relaciones específicas entre significados y significantes que es necesario traer a colación. Uno de ellos logró estimar la constante de Planck articulando la representación gráfica con la analítica, y antes había vinculado la información dada en formato tabla a través de la pendiente. Rescatamos no solo la articulación lograda, sino la posibilidad de unir distintas formas de resolver problemas. Sin embargo, no advierten que para frecuencias menores que la umbral (f_u), la energía incidente no es suficiente para lograr el efecto fotoeléctrico. No habrían relacionado el valor numérico de la solución con el significado que tiene.

HIPÓTESIS PARCIALES

Puede decirse que los conceptos y teoremas que los estudiantes ponen en práctica al resolver las situaciones problemáticas bajo análisis están fundamentalmente en construcción. Expresan carencias de conexiones. Eso nos ha llevado a otorgar grados en el uso hecho de estos. ¿Qué nos indican acerca de concepciones y competencias de los jóvenes sobre la construcción del modelo de fotón y la naturaleza de la radiación electromagnética?

No suele haber resultados alentadores a pesar de los esfuerzos en las carreras científico-tecnológicas. Quizá haya que profundizar la mirada. Ya en segundo año podemos tener algunos indicadores parciales de qué está logrando la universidad. No debemos olvidar el carácter procesual del aprendizaje. Hay que trabajar en armar la mejor base posible. Al aula de Matemáticas y Ciencias Naturales, en particular, se le suma hoy la complejidad intrínseca de los grupos sociales, las peculiaridades de estas áreas, cuya puesta en acto exige equipamiento intelectual en su mayor expresión. Hay que contribuir con los estudiantes a su propio crecimiento. Es necesario crear o re-crear escenarios para ayudarlos a delinear una red con «conceptos de referencia» para el aprendizaje de conceptos nuevos.

¿Por qué analizamos el aprendizaje y la enseñanza del átomo y de la luz? El modelo teórico bajo estudio hace explícito el principio de conservación de la energía entre la interacción de la materia y la radiación. Además de la incorporación de la novedad, un nudo problemático que se ha manifestado fuertemente lo representa la cantidad de vínculos que es necesario hacer «visibles» para articular de forma provechosa la dimensión audiovisual con la educación, haciendo hincapié en aspectos comunicativos y operativos.

¿Por qué el potencial de frenado se asocia con tanta firmeza a la función trabajo (Φ)? Nuestros hallazgos muestran que se relaciona prácticamente desde la categoría 1 hasta la 4, justo en la final se coordina el potencial de frenado con la energía cinética máxima. Podríamos afirmar que es una de las últimas «estructuras» en acomodarse.

Antes de tener conciencia cuántica, la humanidad no había encontrado una respuesta sobre por qué frecuencias menores que la frecuencia umbral no producen el efecto fotoeléctrico por más que se aumente la intensidad al infinito. Sin embargo, esta función analizada con el modelo corpuscular para la luz (véase figura 1) permite conectar por qué no se produce el efecto fotoeléctrico, sobre todo, cuando habilita visualizar que los puntos se ubican sobre una recta para un material dado cuando se grafica potencial de frenado frente a frecuencia. Esta misma función interpretada sin conciencia cuántica no admite concebir la relación entre el parámetro cuántico (hf) y otras variables.

Un análisis

Recordemos la definición de concepto propuesta por Vergnaud y enunciada más arriba: «Un concepto es un triplete de tres conjuntos: $C = (S, I, L)$ ».

S: El referente

Cada vez parece ser más frecuente que los docentes se vean en la necesidad de crear o re-crear escenarios que contribuyan con los estudiantes en el sentido de ayudarlos a delinear durante el tiempo de la enseñanza una red (más o menos ordenada) que contenga al menos algunos de los conceptos que se puedan pensar como referencia para el aprendizaje de nuevos conceptos. Esa red no la puede construir el docente en solitario, puesto que justamente su calidad reside en que se constituye a partir de los referentes que apuntan los estudiantes. En el análisis se observa que, por un lado, se manifiesta la necesidad de traer conceptos previos que no figuran en la secuencia (por ejemplo, intensidad, diferencia de potencial) y, por otro, convoca conceptos que se comenzaron a abordar en este tema (por ejemplo, cuanto de luz, constante de Planck), pero de los que aún no consigue clarificar propiedades y relaciones.

I: El significado

Una manera de explicitar el sentido que se va construyendo en relación con el objeto de aprendizaje es en la acción. En estas categorías, los estudiantes utilizan como marco para su conceptualización un concepto-en-acción donde la energía cinética es vista como constante y un teorema-en-acción donde este valor es cero. Vergnaud propone para este aspecto diferentes tipos de invariantes, según cómo se activen:

- Los *conceptos-en-acción* no son susceptibles de ser verdaderos o falsos y constituyen marcos indispensables para la conceptualización. Por ejemplo:

R_{11} -. Sabemos que:

$E = W + E_c$; W trabajo; $E = h \cdot f$; $\rightarrow W = E - E_c$. Como E depende de la frecuencia porque h es una constante, a mayor frecuencia mayor E , por ende mayor trabajo.

Este estudiante deja ver que le otorga característica de invariante a la energía cinética. Atribuye al trabajo (función trabajo) propiedades variables donde precisamente este es constante. No está asociando la E_c del electrón con la corriente del circuito –sobre todo– cuando la $i = 0$. Es decir, disociando la $E_{c_{\text{máx}}}$ del electrón con el potencial de frenado donde la corriente vale cero. La función de trabajo está relacionada con la frecuencia de corte.

- Los *teoremas-en-acción* pueden ser verdaderos o falsos. Implican una cuasi explicación, un avance del proceso que se describe.

$$R_3\text{-} p = h/\lambda \rightarrow 3,5 \times 10^{-27} \text{ kgm/s} = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s/} \lambda$$

$$\lambda = 189,14 \text{ nm}$$

$$c = f \lambda \rightarrow f = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} / 189,14 \text{ nm}$$

$$f_0 = 1,58 \times 10^{15} \text{ Hz} \text{ Frecuencia Umbral}$$

R₃-. Existen dos frecuencias porque hay dos materiales diferentes. Según el efecto fotoeléctrico necesita de la energía de un fotón para poder desprenderse de la superficie, esta energía tiene que ser mayor a la del trabajo, si esto no es así el electrón no se desprende de la superficie.

Posibles teoremas-en-acción:

- Cuando luz de cierta frecuencia incide sobre un metal, esta frecuencia coincide con la frecuencia umbral, necesaria.
- Dos «luces diferentes» que inciden sobre un material causan dos frecuencias umbral.

No está considerando la presencia del átomo en la interacción total. No se pregunta, en el fondo, que al igualar energía incidente con función trabajo, está haciendo: $E_c = \text{cte}$. O simplemente no puede otorgarle sentido. Tampoco articula con la necesidad de un balance energético y la presencia de una interacción nueva; es decir, una estructura donde se integren pensamiento lineal ($V_0 = h/e f - h/e f_u$), energía, onda, magnitudes y propiedades correspondientes a distintas escalas, corpúsculos de luz. Cuesta desvincularse de la experiencia para la cual se formuló la teoría del fotón y captar el potencial explicativo de dicha teoría, sobre todo si los textos se centran en la descripción del circuito. Además, no realiza análisis de resultados. Los valores resultan todavía extraños. Quizá creen que la frecuencia debe ser pequeña como lo es el electrón.

Parecen transferir directamente las propiedades de las «luces» (como ondas de frecuencias: f_1 y f_2) al material. Esta parte del triplete es el núcleo del análisis de los conceptos, es la herramienta que ayuda a ubicar en qué etapa de asimilación de este se encuentra quien aprende. Una consecuencia de este proceso es la cantidad de información que le aporta al docente, lo que hace posible que encauce sus esfuerzos.

L: La representación

Ya se ha mencionado anteriormente, aunque de modo sutil, que las personas construyen los objetos desde su organización interna y también desde sus formas de organizarse, y si ese proceso está mediado por algún tipo de recurso dinámico, accesible, el proceso mencionado tenderá a ser bastante completo, cuestión que se encuentra muy vinculada al aprendizaje. En este marco tiene un particular interés la representación de los objetos. La física cuenta con diversos sistemas externos de representación, por ejemplo, el álgebra, con sus ecuaciones y fórmulas, o las gráficas.

También surgen algunos interrogantes tales como ¿por qué si el potencial de frenado es negativo en la bibliografía, entonces cuando se representa potencial de frenado frente a frecuencia para obtener la frecuencia umbral se le cambia el signo?

Aparentemente, el desarrollo previo bajo el formato de relato anecdótico de los experimentos sobre efecto fotoeléctrico no sería un factor desequilibrante para la comprensión del modelo de fotón. En tanto que si aquel se hiciera desde una perspectiva inquisidora, sí podría pensarse en una construcción histórica coherente. Sin embargo, este tipo de desarrollo prácticamente no se puede llevar a cabo debido a las limitaciones de tiempo que imponen los currículos institucionales. En esta propuesta se tuvieron en cuenta estas condiciones con el fin de detectar posibles desajustes. Encontramos que uno de ellos, que se puede considerar central, es el concepto de *interacción-energía*, lo que nos orienta a reflexionar acerca del lugar que le hemos dado en el plan.

CONSIDERACIONES FINALES

Los conceptos no son solo definiciones, sino que poseen una variedad de dimensiones que dependen de su ubicación en el área de trabajo tanto como de su historicidad; además, adquieren sentido en el contexto en el que se encuentran y desde los sujetos que los piensan. Una referencia clásica en la enseñanza de la física es la de la conceptualización del análisis de funciones y su campo de operaciones. Si el estudiante trabajó previamente en matemática —específicamente en Análisis Matemático I— con este tema, no realiza una migración natural de este hacia la física, como si las funciones que se emplean fueran objetos diferentes. Este es un obstáculo que acarrea inconvenientes para los procedimientos. Lo mismo sucede con los vectores y sus operaciones, las integrales de línea y de superficie, cerradas y abiertas, y sus relaciones, que por más que el estudiante haya tenido un buen desempeño en matemática, parece que debe comenzar prácticamente desde el principio al estudiar tópicos específicos en física.

Otro ejemplo sería el de la conceptualización del potencial de frenado y la función de trabajo y su campo de operaciones. Si el estudiante trabajó previamente en electromagnetismo, mecánica, etc., con estos temas, tampoco realiza necesariamente una migración directa de estos hacia la física moderna, como si las diferencias de potencial, los campos, las relaciones trabajo y energía, la energía potencial, la frecuencia, la energía cinética que se emplean fueran objetos diferentes. Este es un obstáculo no menor cuando se siguen metodologías de trabajo específicas. Por más que el estudiante haya tenido un buen desempeño en otros campos de la física, pareciera que debe comenzar desde el inicio al aprender física moderna y contemporánea.

Además, hay todo un proceso inesperado por el alumno, que es el de dotar de sentido a los conceptos nuevos, como cuanto de luz, constante de Planck, entre otros, en relación con algunos más viejos, pero necesariamente redefinidos.

Este tipo de situaciones nos da la pauta de que no es sencillo para las personas asumir la noción de *herramienta teórica o herramienta conceptual*. Coincidimos con Vergnaud en que:

Toda situación compleja es una combinación de situaciones elementales y no se puede obviar el análisis de las tareas cognitivas que pueden ser generadas por ellas. Sin embargo, la organización de una situación didáctica, en un proyecto colectivo de investigación en clase, supone la consideración simultánea de las funciones epistemológicas de un concepto, de la significación social de las áreas de experiencia a que él se refiere, de los desempeños de los actores de la situación didáctica, de los resultados de ese desempeño, del contrato y de la transposición (1993).

Cabe señalar que estudios de este tipo son de gran valor por los resultados. Aportan —parafraseando a Vergnaud (1993)— acerca del conocimiento de la *dificultad relativa* de las tareas cognitivas, de los obstáculos habitualmente afrontados, del repertorio de procedimientos disponibles y de las representaciones posibles en el aquí y ahora del trabajo en el aula. Destaca también la idea de historia como esencial a nuestro propósito. No se trata de historia de la física, sino de la historia del aprendizaje de la física. Esta es una historia individual, aunque comparte impresionantes regularidades entre los individuos, en el modo por el cual abordan y tratan una misma situación, en las concepciones primitivas que hacen de los objetos, sus propiedades y relaciones, y en las etapas por las que pasan.

Teniendo claramente definido hacia dónde se apunta y cuáles son los estadios que pueden llegar a presentarse, la mirada del docente se encontrará más preparada para descubrir cuáles son los caminos que siguen algunos estudiantes para aprender y si esos caminos son fructíferos en el sentido de contribuir a la configuración de estructuras de conocimiento y de competencias que sean realmente representativas para su ámbito profesional y, si no lo son, reorientarlas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del PICTO 2009-UNSJ aprobado por Resol. 199/2011-ANP-CYT. N.º 0109, FCEFyN (UNSJ). Of. 02-2363/09 y subsidiado por FONCyT-ANPCYT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, V. (1997). Argumentación y razonamiento en los textos de física de secundaria. *Alambique Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 11, pp. 65-74.
- BARBERÀ, E. y BADIA, A. (2004). *Educación con aulas virtuales. Orientaciones para la innovación en el proceso de enseñanza y aprendizaje*. Madrid: Machado Libros.
- CHIU, M. M.; KESSEL, C.; MOSCHKOVICH, J. y MUÑOZ, A. (2001). Learning to Graph Linear Functions: Case Study of Conceptual Change. *Cognition and Instruction*, 19(2), pp. 215-252. http://dx.doi.org/10.1207/S1532690XCI1902_03
- CONCARI, S. B. y GIORGI, S. M. (2000). Los problemas resueltos en textos universitarios de Física. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(3), pp. 381-390.
- DE LEONE, C. J. y OBEREM, G. E. (2003). Toward Understanding Student Conceptions of the Photoelectric Effect. *AIP Conf. Proc.* 720, 85, Wisconsin (USA).
- DE POSADA, J. M. (1999). The presentation of metallic bonding in high school science textbooks during three decades: science educational reforms and substantive changes of tendencies. *Science Education*, 4(83), pp. 423-447. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199907\)83:4<423::AID-SCE3>3.3.CO;2-0](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199907)83:4<423::AID-SCE3>3.3.CO;2-0) [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199907\)83:4<423::AID-SCE3>3.0.CO;2-9](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199907)83:4<423::AID-SCE3>3.0.CO;2-9)
- DOUADY, R. (2011). Géométrie, graphiques, fonctions au college. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*. Año 6, n.º 1, pp. 1-7.
- EINSTEIN, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, pp. 132-148. Sobre un punto de vista heurístico concierne a la producción y a la transformación de la luz.
- ESCUADERO, C. (1995). Resolución de problemas en Física: herramienta para reorganizar significados. *Cad. Bras. Ens. Fis.*, Brasil, 12(2), pp. 95-106.
- ESCUADERO, C. (2001). Representaciones, Modelos Mentales y su relación con omisiones, aciertos y errores de actuación al resolver un problema de Física. *Enseñanza de las Ciencias*, Número Extra, VI CIIDC, Barcelona (España).
- ESCUADERO, C. (2005). *Inferencias y modelos mentales: un estudio de resolución de problemas acerca de los primeros contenidos de Física abordados en el aula por estudiantes de nivel medio*. Tesis (Doutorado)-Universidad de Burgos-Universidad Federal de Rio Grande do Sul.
- ESCUADERO, C. y GONZÁLEZ, S. (1996). Resolución de problemas en nivel medio: un cambio cognitivo y social. *Investigações em Ensino de Ciências*, Brasil, 1(2), pp. 155-175.
- ESCUADERO, C. y JAIME, E. (2009). Conocimientos-en-acción: un estudio acerca de la integración de las fuerzas y la energía en cuerpo rígido. *Investigações em Ensino de Ciências*, 14(1), pp. 115-133.
- ESCUADERO, C. y JAIME, E. (2013). Los docentes frente al aprendizaje. El caso de la interacción de la luz con la materia: efecto fotoeléctrico. *1º Workshop Enseñanza de la Física en Argentina*, Tandil (Pcia. de Bs. As.), May; 141-152. Disponible en línea: <<https://sites.google.com/site/wfenseñanzadela-fisica/envio-de-trabajos/actas-wef>>.
- ESCUADERO, C.; JAIME, E. y GONZÁLEZ, S. (2014a). *Conciencias cuánticas 1: Aportes para su enseñanza en universitario básico. El efecto fotoeléctrico en contexto*. Cuartas Jornadas: Ingreso y Permanencia en Carreras Científicas y Tecnológicas (IV IPECyT 2014), Rosario (Argentina), 14-16 May, pp. 126-132.

- ESCUDERO, C.; JAIME, E. y GONZÁLEZ, S. (2014b). *Conciencias cuánticas 2: Conocimiento gráfico en universitario básico. El efecto fotoeléctrico en contexto*. IV IPECyT 2014, Rosario (Argentina), 14-16 May, pp. 133-139.
- ESCUDERO, C. y MOREIRA, M. A. (2004). La investigación en resolución de problemas: una visión contemporánea. Capítulo (49 pp.). *Actas del PIDEAC (Programa Internacional de Doutorado em ensino de Ciências)*, Texto de Apoio n.º 23 da Universidade de BURGOS/UFRGS, v. 6, pp. 41-90. Publicación en modalidad libro.
- ESCUDERO, C. y STIPCICH, S. (2008). Análisis de protocolos verbales. En: *Texto de Apoio para PIDEAC*. Texto n.º 33, Instituto de Física. UFRGS, Porto Alegre, Brasil; vol. 10, pp. 81-122.
- FERNÁNDEZ, P.; GONZÁLEZ, E. y MATARREDONA (2005). De los corpúsculos de luz al efecto fotoeléctrico. Una propuesta didáctica con base en la discusión de modelos. *Revista de Enseñanza de la Física*, 18(1), pp. 69-80.
- GONZÁLEZ, S. y ESCUDERO, C. (2013a). *Las imágenes y la conceptualización del modelo atómico actual. 1º Workshop Enseñanza de la Física en Argentina*, Tandil (Pcia. de Bs. As.), May; pp. 69-78. Disponible en línea: <<https://sites.google.com/site/wefenseñanzadelafisica/envio-de-trabajos/actas-wef>>.
- GONZÁLEZ, S. y ESCUDERO, C. (2013b). Un análisis del concepto de fotón desde la teoría de los campos conceptuales. *98º Reunión Nacional de AFA*, Bariloche (RN), Set.
- GONZÁLEZ, S. y ESCUDERO, C. (2014). Atomic state, electronic state: an investigation of upper level students, *Journal of Research in Science Teaching* (Enviado).
- GRECA, I.M.R. (2000). *Construindo significados em Mecânica Quântica: Resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de física geral*. Tesis (Doutorado). Porto Alegre UFRGS.
- GURKEL, I. y PIETROCOLA, M. (2011). Una discusión epistemológica sobre la imaginación científica *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33(1), 1602.
- JAIME, E. y ESCUDERO, C. (2008). Experimentos en física básica y su conceptualización con NTICs. *EnIDI 2008*, Mendoza (Argentina), pp. 207-214.
- KLASSEN, S. (2011). The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom. *Science & Education*, July 2011, 20(7-8), pp. 719-731. <http://dx.doi.org/10.1007/s11191-009-9214-6>
- KOSSLYN, S. (2006) *Graph design for the eye and mind*. New York: Oxford University Press. <http://dx.doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195311846.001.0001>
- LIMA, P. F. et al. (2010) Pensamento transdisciplinar: uma abordagem para compreensão do princípio da dualidade da luz. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32(2), 2402.
- LION, C. (2006). *Imaginar con tecnologías. Relaciones entre tecnologías y conocimiento*. Ciudad de Bs. As. Ed. Stella: La Crujía ediciones.
- MALAYER, M., PUJOL, R. y D'ALESSANDRO MARTÍNEZ, A. (2004). Los estilos de prosa y el enfoque Ciencia-Tecnología-Sociedad en textos universitarios de química general. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(3), pp. 441-454.
- MARTÍNEZ, S. (2009). Elementos para una epistemología de los diagramas. En *El Giro Pictórico. Epistemología de la imagen*. México: Anthropos.
- MICHINEL, J. L. y D'ALESSANDRO, M. A. (1994). El concepto de energía en los libros de texto: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo lenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(3), pp. 369-380.
- MOREIRA, M. A. (comp.) (2004). *La Teoría de los campos Conceptuales de Vergnaud, la enseñanza de las ciencias y la investigación en el área*. Brasil: Instituto de Física. UFRGS.
- NÍAZ, M. (1998). From cathode rays to alpha particles to quantum to action: a rational reconstruction of structure of the atom and its implications for chemistry. *Science Education*, 82(5), pp. 527-552. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199809\)82:5<527::AID-SCE1>3.0.CO;2-B](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199809)82:5<527::AID-SCE1>3.0.CO;2-B)

- OTERO, R. (2004). Imágenes e investigación en Enseñanza de las ciencias. *Revista Actas del PIDECE*: Universidad de Burgos. Instituto de Física de la UFGRS.
- POSTIGO, Y. y POZO, J. I. (2000). Cuando una gráfica vale más que 1000 datos: la interpretación de gráficas por alumnos adolescentes. *Infancia y Aprendizaje*, 90, pp. 89-110.
<http://dx.doi.org/10.1174/021037000760087982>
- PRO, M. (2003). *Aprender con imágenes. Incidencia y uso de la imagen en las estrategias de aprendizaje*. Barcelona: Paidós.
- ROA, M. e ISLAS, S. (2016). Simulaciones en mecánica: potencialidades y limitaciones a partir del análisis de modelos matemáticos y físicos. En: Escudero, C. y Stipcich, S. *Pasaporte a la enseñanza de las ciencias*. Buenos Aires: Editorial Novedades Educativas (en prensa).
- SAMAJA, J. (2006). *Epistemología y Metodología. Elementos para una teoría de la investigación científica*. Buenos Aires: Eudeba.
- SILVA, I. y FREIRE Jr., O. (2014). A descoberta do efeito Compton: De um abordagem semiclássico a um abordagem quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(1), 1601.
- SOLBES, J. y TRAVER, M. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(1), pp. 103-112.
- TESTA, I., MONROY, G. y SASSI, E., (2002). Student's reading images in kinematics: the case of real-time graphs. *International Journal of Science Education*, 24(3), pp. 235-256.
<http://dx.doi.org/10.1080/09500690110078897>
- VERGNAUD, G. (1987). *Problem solving and concept development in the learning of mathematics. E.A.R.L.I. Second Meeting*. Tübingen.
- VERGNAUD, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(23), pp. 133-170.
- VERGNAUD, G. (1993). Teoria dos campos conceituais. En Nasser, L. (ed.). *Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro*, pp. 1-26.
- VERGNAUD, G. (1994). Multiplicative conceptual field: what and why? En Guershon, H. y Confrey, J. (eds.). *The development of multiplicative reasoning in the learning of mathematics*. Albany: State University of New York Press, pp. 41-59.
- VERGNAUD, G. (1998). A comprehensive theory of representation for mathematics education. *Journal of Mathematical Behavior*, 17(2), pp. 167-181.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0364-0213\(99\)80057-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0364-0213(99)80057-3)
- VERGNAUD, G. (2009). The Theory of Conceptual Fields. *Human Development*, 52, pp. 83-94. Disponible en línea: <www.karger.com/hde> (consulta 15/03/2014).
- YANITELLI, M; CONCARI, S.; SCANCICH, M. y PEREZ, R. (2013). Dificultades de aprendizaje en la aplicación de dos diseños didácticos que integran tecnologías digitales. *1º Workshop Enseñanza de la Física en Argentina*, Tandil (Pcia. de Bs. As.), May; pp. 118-129. Disponible en línea: <<https://sites.google.com/site/wefenseñanzadelafisica/envio-de-trabajos/actas-wef>>.

Towards quantum consciousness from the photoelectric effect

Consuelo Escudero
Dpto. de Biología FCFN (UNSJ),
Dpto. de Física FI (UNSJ)
cescudero@unsj-cuim.edu.ar

Eduardo A. Jaime
Dpto. de Física FI (UNSJ)
ejaime@unsj.edu.ar

Sonia B. González
Dpto. de Física y Química FFHA (UNSJ)
soniabeatriz.gonzalez@gmail.com

The challenge of teaching some basic concepts of modern physics in General Physics courses has stirred the interest of various groups devoted to education in Physics: teachers, educational researchers, and physicists, all concerned with creating conditions that promote a better approach to the sciences. A situation like this allows to approach the subject from a different perspective, one that not only registers the conceptual tenets developed in the classroom, but one that accepts the complexity of the learning process involved in the acquisition of certain type of concepts which fall outside the field of sensory perception, this added to the little time available to develop these concepts.

In a possibly obstinate manner, we should admit that one of the most relevant factors that determines the competence of a professional is the attitude they assume when solving new situations. This is exactly what the job market currently expects from newly graduates.

This paper inquires about the resources used by students to respond to questions the content of which refers to phenomena that is intangible from a sensory standpoint and that link the world at various scales, as is the case of electromagnetic radiation interaction with matter. The nature of the atom and its structure are discovered by analysing light. At the same time, light has a dual nature which radically alters our understanding of the atomic world.

The practical way to cause the manifestation of operative invariants, given their implicit nature, is through the proposal of situations. In this study, some achievements and difficulties are analysed, based on three problematic situations related to the photoelectric effect, and based on the Theory Conceptual Fields (TCF) by Vergnaud. It is Gérard Vergnaud, who, in his theory, extends Piaget's initial concerns about general logical operations and general structures of thought, towards the study of the cognitive function of the «subject-in-situation». In addition, Vergnaud takes knowledge content itself and the conceptual analysis of the command of that knowledge as reference. He brought to the foreground the relevant fact that cognitive development depends on situations and on specific conceptualizations required to achieve progress. He thus claims that it is pointless to try to reduce conceptual complexity, progressively dominated by children and young people, to some kind of general logical complexity and instead claims that it is very efficient to integrate contents.

In the present research, a research methodology based on the interpretative paradigm is used, where data are grouped in categories that are not provided a priori by the theoretical framework. The research can be classified as a contributive case study, in the sense that it integrates a series of investigations aimed at inquiring into this area of Physics research.

The study was conducted in real classroom situation. The project was based on a group of forty-one second year students in the Engineering program and another group formed by five advanced students of the same program. The corpus consists mainly of participant observation records and solution production for problem situations obtained in individual work.

From the analysis conducted, five response categories could be clearly identified that led us to reflect on the construction of an essential concept in the natural sciences: energy, and its relationship with the radiation-matter interaction concept, with wave-particle duality, quantum, among others. Everything that is related to image is also taken into account. The graphics singularly provided in one of the problems -apparently- do not communicate knowledge or appeal to the photoelectron emission equation, dependent on the frequency of radiation.

However, good use can help us predict what is not directly expressed: how to obtain the frequency threshold f_0 , and if the braking potential is proportional to the frequency. This type of situations show that it is not easy for people to assume the notion of *theoretical tool* or *conceptual tool*. It should be noted that this type of studies are of great value because of the results obtained.

They provide knowledge about the *relative difficulty* of cognitive tasks, of the obstacles commonly encountered, of the repertoire of available procedures, and of the possible representations in the here and now of classroom work. The results provide evidence of an array of subjectivities that offer in turn a support for concept formation, with the intention of acquiring the objectivity that the teaching process aims at.