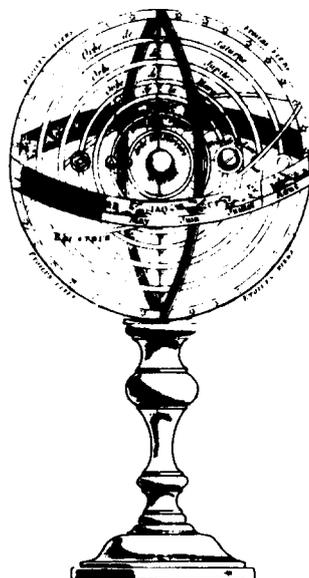


INNOVACIONES DIDÁCTICAS



CONSTRUYENDO SIGNIFICADOS EN MECÁNICA CUÁNTICA: FUNDAMENTACIÓN Y RESULTADOS DE UNA PROPUESTA INNOVADORA PARA SU INTRODUCCIÓN EN EL NIVEL UNIVERSITARIO

GRECA, ILEANA M. y HERSCOVITZ, VICTORIA E.
Instituto de Física, Universidad Federal do Rio Grande do Sul
Caixa Postal 15051. Campus do Vale. Cep: 91501-970- Porto Alegre. Brasil
ilegreca@terra.com.br
victoria@if.ufrgs.br

Resumen. El rápido crecimiento de una tecnología basada en los principios de la mecánica cuántica torna imperioso el conocimiento de sus fundamentos por la mayoría de los estudiantes universitarios. Siendo una de las mayores dificultades al estudiar estos temas la creación de la «nueva percepción» que la mecánica cuántica implica para el mundo microscópico, desarrollamos una unidad didáctica introductoria con un abordaje que denominamos *fenomenológico-conceptual*, con énfasis en las características cuánticas de los sistemas. La unidad incluyó discusiones conceptuales sobre tópicos como los de computación cuántica, efecto túnel, autointerferencia de una partícula, saltos cuánticos y la paradoja del gato de Schrödinger. Los resultados de la implementación de esta estrategia con tres grupos de estudiantes de ingeniería muestran que más de la mitad de los estudiantes participantes consiguieron una comprensión razonable de los conceptos discutidos.

Palabras clave. Mecánica cuántica, enseñanza universitaria, modelos mentales, enfoque fenomenológico-conceptual.

Summary. Technology based on the principles of Quantum Mechanics is of growing importance so it becomes imperative to offer to the future professionals at least courses on the basics of it. One of the main problems faced by students when learning this subject relates to the difficulty of creating a «new perception» for the microscopic world. To help students in this matter, we used in a introductory unit a phenomenological-conceptual approach with emphasis on the quantum characteristics of the systems, in lieu of searching for classical analogies. The unit included conceptual discussions using topics like quantum computing, teleportation, quantum tunneling, one particle self interference, quantum jumps and the Schrödinger's cat paradox. The results of the implementation of this strategy, with three groups of engineering students, showed that more than half of them attained a good understanding of the central concepts discussed.

Keywords. Quantum mechanics, college science students, mental models, phenomenological-conceptual approach.

INTRODUCCIÓN

Desde su surgimiento, la mecánica cuántica ha generado una verdadera revolución cognitiva, en gran medida debido a que supone una nueva forma de percibir los fenómenos, donde ideas y conceptos fuertemente arraigados en nuestra cultura –como determinismo, localidad, o simplemente trayectoria– han tenido su ámbito de validez reducido. Tal ha sido su impacto, que se ha llegado a afirmar que es la teoría científica que influyó más profundamente en el pensamiento humano (Jammer, 1974). Ésa es una de las razones por la que es importante, para enseñar, llegar a comprender las dificultades a las que se han de enfrentar los alumnos para poder entender las nuevas ideas y principios (Gil y Solbes, 1993; Hobson, 1996). Sin embargo, los análisis acerca de las dificultades para tal comprensión han sido escasos y, en general, centrados en la enseñanza media (Fischler y Lichtfeldt, 1992; Gil y Solbes, 1993; Masshadi, 1996; Niedderer y Deylitz, 1999). Solamente en los últimos años se ha apreciado un sensible aumento en el interés de conocer las dificultades que los contenidos de mecánica cuántica presentan a los estudiantes universitarios (Bao et al., 1996; Styer, 1996; Johnston et al., 1998; Ambrose et al., 1999; Fletcher y Johnston, 1999; Greca y Moreira, 1999) y algunas implementaciones para facilitar su aprendizaje (Hobson, 1996; Rebello y Zollman, 1999; Euler et al., 1999; Greca y Herscovitz, 2000). Esto se debe, probablemente, a que en las dos últimas décadas asistimos a la aparición de una tecnología sustentada en los principios fundamentales que gobiernan el mundo microscópico –dispositivos de producción de imágenes por resonancia magnética, tomografía por emisión de positrones, microscopio electrónico de barrido por tunelamiento, relojes atómicos del sistema de posicionamiento global, nanotecnología– y, por lo tanto, urge que los profesionales que más utilizan esos recursos entiendan sus fundamentos. Así es que la formación en estos contenidos no se debe reducir simplemente al conocimiento de reglas o de algoritmos de resolución, características frecuentes de los cursos introductorios de mecánica cuántica en las carreras de ciencias exactas (Greca, 2000).

Las investigaciones relativas a las ideas de estudiantes universitarios sobre conceptos cuánticos (en particular,

sobre estabilidad del átomo, dualidad onda-partícula, principio de incertidumbre, concepto de cuantización, fotones y electrones), aunque desarrolladas desde marcos teóricos distintos, parecen coincidir en mostrar que el conocimiento adquirido en las disciplinas que introducen esos temas es en general superficial, a menudo no más que una colección de hechos aislados útiles para la aprobación de dichas disciplinas (Johnston et al., 1998). Más aún, parece también que la mayoría de los estudiantes investigados intentan interpretar los nuevos fenómenos a partir de su conocimiento de la física clásica, ya sea simplemente transfiriendo este conocimiento para el mundo microscópico o modificándolo en forma híbrida, sin abandonar una matriz clásica. Algunos ejemplos al respecto son las interpretaciones encontradas para la dualidad onda-partícula, para el principio de incertidumbre y para la función de onda (Euler et al., 1999; Fletcher y Johnston, 1999; Greca y Moreira, 1999). Tampoco parecen abandonar los modelos sobre el átomo estudiados en la escuela secundaria, básicamente variantes del modelo atómico de Bohr, en que los electrones se encuentran en órbitas, recorriendo trayectorias bien definidas. Ese cuadro no se modifica mucho cuando son analizadas las respuestas dadas por estudiantes más avanzados de cursos de física e, inclusive, por graduados (Johnston et al., 1998; Ambrose et al., 1999; Greca y Moreira, 1999).

Caben señalar, también, las características de las disciplinas consideradas, en que temas de mecánica cuántica son introducidos en cursos de ciencias exactas. En general, estos temas son tratados en la última parte de la última disciplina de física general, con una duración de alrededor de cuatro o cinco semanas¹. En contraste con otras asignaturas de física clásica, como la de Mecánica o de Electromagnetismo, en estos casos se comienza casi siempre por una «perspectiva histórica»: un conjunto de hechos experimentales (radiación del cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, efecto Compton, rayos X, espectros de emisión) son presentados cronológicamente con el objetivo didáctico de persuadir a los estudiantes que la cuantización de la energía es una conclusión «obvia» a la que se llegó racionalmente como consecuencia de esos experimentos². A continuación son discutidos los pri-

meros modelos atómicos, especialmente el modelo del átomo de Bohr, superado hace ya más de setenta años. Es común en esas introducciones que la vieja teoría cuántica y las experiencias centenarias ocupen una parte importante del exiguuo tiempo destinado al asunto, casi siempre más que el destinado a la discusión-presentación de la mecánica cuántica verdaderamente dicha, cuyos fundamentos son introducidos, en general, simplemente como postulados y fórmulas con poca conexión. Esta introducción no sólo no es correcta desde el punto de vista histórico³, sino que muchas veces propone a los estudiantes postulados presentados de tal forma que su racionalidad parece dudosa (Hood, 1993), además de fortalecer concepciones clásicas, como las originadas de los modelos atómicos. Kragh (1992), por ejemplo, denomina estas versiones estandarizadas de «casi-historia», destacando los errores y los mitos que las mismas contienen. Los resultados de las investigaciones indicadas anteriormente parecen demostrar además que cursos posteriores⁴, en general más técnicos y centrados en el formalismo, no logran modificar las ideas adquiridas en ese primer contacto sobre el tema.

Por lo tanto, resulta importante implementar nuevas estrategias didácticas para facilitar la comprensión de los conceptos cuánticos fundamentales. En este trabajo fundamentaremos y presentaremos los resultados de una propuesta de enseñanza de primeros conceptos cuánticos, implementada en cursos de ingeniería.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA PROPUESTA

Este trabajo tiene por base la idea de que, para intentar entender el mundo, construimos modelos mentales –representaciones mentales idiosincráticas, funcionales aunque incompletas, que actúan como análogos estructurales a fenómenos o situaciones del mundo externo–. Así, la cuestión central para la comprensión está en la capacidad de crear modelos de trabajo –elaborados tanto a partir de la percepción como del discurso– con los cuales es posible explicar situaciones o predecir el comportamiento de sistemas (Johnson-Laird, 1983). Como muchas veces las situaciones son descritas por conceptos, para comprender un concepto es también necesario que seamos capaces de construir modelos mentales del mismo, siendo esto válido tanto para los conceptos concretos como para los abstractos.

Así, para comprender los conceptos y leyes de una teoría científica y, en consecuencia, los fenómenos que ésta describe y explica, los estudiantes deberían construir modelos mentales capaces de propiciar explicaciones y predicciones coincidentes con las científicamente aceptadas. Sin embargo, este proceso no parece lograr éxito para la mayoría de los estudiantes que, aun presentando explicaciones y haciendo predicciones sobre los fenómenos físicos, no son coincidentes con las científicamente aceptadas. O sea, los estudiantes muchas veces construyen modelos mentales para poder dar sentido al

mundo en que viven, pero no logran que esos modelos les permitan comprender los conceptos científicos (Greca y Moreira, 1997, 1998a; Borges y Gilbert, 1998). Puede parecer que esto sea determinado en parte por elementos que estarían implícitos en los núcleos de los posibles modelos mentales construidos para comprender un cierto concepto, determinando la forma de percepción de los fenómenos o situaciones en que ese concepto estaría involucrado (Greca y Moreira, 1998b). Para ilustrar este punto, tomemos uno de los conceptos más estudiado en el área de la investigación en enseñanza de la ciencias, el concepto de *fuerza*. Para los estudiantes, una característica esencial del concepto es una relación causal simple entre fuerza y movimiento, como indican los resultados de las investigaciones sobre concepciones alternativas. Sin embargo, lo esencial de tal concepto en la visión de la física clásica es la interacción. Las características esenciales deberían estar ubicadas en los núcleos de todos los modelos mentales construidos para explicar situaciones en las cuales se considere que la idea de *fuerza* es necesaria, determinando de hecho modos distintos de visualizar los fenómenos vinculados con este concepto, ya que incluyen la construcción de modelos mentales «esencialmente» distintos en cada caso.

Desde ese marco conceptual, los resultados de las investigaciones sobre las ideas de los estudiantes acerca de conceptos cuánticos parecen sugerir que los estudiantes investigados no logran formar modelos mentales que les permitan visualizar cuánticamente la fenomenología microscópica⁵. O sea, los nuevos conceptos, necesarios para tal descripción, son entendidos a partir de núcleos derivados de la fenomenología y la visión clásicas, de forma que los estudiantes no consiguen elaborar explicaciones o predicciones en concordancia con las científicamente aceptadas. En el caso de la mecánica cuántica, estas dificultades son todavía mayores, porque los nuevos núcleos resultan de una fenomenología sobre la cual no tenemos experiencia directa y que se nos presenta cuando ya sedimentamos otra fenomenología.

¿Cuáles son los elementos más característicos de la percepción cuántica, que la diferencian de la clásica, y que deberían ser adquiridos por los estudiantes en general? Consideramos entre otros, las ideas⁶ que resultan del principio de superposición lineal de estados, del principio de incertidumbre (dualidad onda-partícula) y del carácter probabilístico de los resultados de medición (distribución de probabilidades). De hecho, los dos primeros principios constituyen la base de las dos vertientes que históricamente conformaron la mecánica cuántica –la mecánica ondulatoria (formulación de Schrödinger) y la mecánica matricial (formulación de Heisenberg)– y de ellos deriva el tercero (Hughes, 1989). El principio de superposición de estados implica, entre otras cosas, la posibilidad de coexistencia simultánea de estados distintos (de algún observable) para un mismo sistema, como la expresada en la famosa paradoja del gato de Schrödinger (1935). Véase que la superposición lineal de vectores, con la misma formulación matemática en las teorías cuántica y clásica, involucra significados diferentes en ambas: en la física clásica es básica-

mente una herramienta matemática y está totalmente excluida del pensamiento clásico la posibilidad de que implique en coexistencia simultánea de estados. El principio de incertidumbre presupone la idea de que existe una imposibilidad intrínseca del mundo microscópico para la realización simultánea de determinadas mediciones y que esta imposibilidad no es resultado (como sería en el caso clásico) de una limitación de los dispositivos de medida o de la falta de información sobre variables del sistema. La dualidad onda-partícula (directamente conectada al principio de incertidumbre) implica aceptar que los objetos cuánticos evidencian a veces propiedades de partículas clásicas y, en otras situaciones, características de ondas, pero que en ningún caso pueden identificarse con unas o con otras, o sea, implica abandonar imágenes clásicas ya definidas. Como ha sido indicado, de estos principios resulta que la mecánica cuántica es una teoría inherentemente probabilística; en tanto en la mecánica clásica, el resultado de cada medida puede ser previsto con la precisión deseada, si es conocido el estado inicial del sistema, la mecánica cuántica, en las mismas condiciones, ofrece apenas predicciones probabilísticas. La naturaleza de esas probabilidades, además, es diferente de las de la física clásica: no ocurren por falta de conocimiento, pues la función de onda (vector de estado) contiene toda la información acerca del estado de un sistema, y además las densidades de probabilidades presentan términos de interferencia, resultantes del módulo al cuadrado de la suma de las amplitudes.

Aunque estos conceptos lleven a establecer nuevas relaciones de percepción, como ya discutimos, son general-

mente introducidos de forma superficial, resaltándose más las características clásicas de los sistemas que las cuánticas. Muchas veces, además, los estudiantes reciben informaciones sobre todo en forma de ecuaciones, sin percibir los vínculos con la fenomenología.

Consideramos que es necesario adoptar estrategias didácticas que faciliten la formación de los (nuevos) núcleos que direccionan la visualización de los fenómenos; o sea, intentar ayudar a los estudiantes a incorporar significativamente los conceptos, las ideas que deben estar en los núcleos de los modelos mentales adecuados para la comprensión de esta teoría física. En principio, esos conceptos no forman parte de la estructura cognitiva de los estudiantes y los intentos de «aproximarlos» a los conceptos clásicos conocidos (que es en parte lo que se intenta desde el abordaje tradicional) no parecería ser una buena alternativa. Consideramos que una solución posible es, sobre todo en las disciplinas introductorias, focalizar los experimentos y observaciones que enfatizan los primeros principios de la mecánica cuántica. El objetivo principal de esta propuesta es convertir estos principios en «palpables», de forma que no se conviertan en simples relaciones matemáticas a memorizar, con remota o dudosa relación con el mundo físico, sino que adquieran, para los estudiantes, una realidad física. Consideramos que, si estos principios son presentados no solamente como determinantes de otra realidad física, sino también mostrando las consecuencias directas de estos principios sobre la nueva realidad –y ahí reside el papel fundamental de la presentación fenomenológica–, estaremos proporcionando a los estudiantes elementos esenciales para la formación de modelos menta-

Figura 1
Cuadro-resumen de la propuesta.

Textos elaborados sobre	Características más significativas
<ul style="list-style-type: none"> – Computación cuántica – Interferencia de Young para sistemas cuánticos – Experiencia de Stern-Gerlach – Ecuación de Schrödinger – Pozos y barreras de potencial – Tunelamiento y microscopio electrónico de barrido – Átomo de hidrógeno – Espectros y saltos cuánticos – Paradoja del gato de Schrödinger – Mediciones sin interacción con el objeto – Teleportación – Tránsito al mundo macroscópico: teoría de la descoherencia 	<ul style="list-style-type: none"> – Espiral: para los distintos fenómenos presentados, los conceptos fundamentales son (re)discutidos – No utilización de conceptos y analogías clásicas <i>ab initio</i> – Introducción, en situaciones simples, de herramientas y entes matemáticos adecuados: sistemas de dos niveles – Vinculación del modelo físico a aplicaciones tecnológicas recientes – Utilización parcial de recursos computacionales (cuantización regulada por soluciones físicamente aceptables de la función de onda y tunelamiento) – Discusión en pequeños grupos: favorecer la (re)creación de la percepción a través de la discusión con los pares y con el profesor

les. O sea, consideramos que de esta forma estaremos favoreciendo que los alumnos aprendan a «visualizar» el mundo microscópico. Para conseguir este objetivo es posible usar varias experiencias con una o pocas partículas disponibles hoy en día, en general conceptualmente simples. De alguna manera, estas experiencias –muchas de ellas realizaciones de los antiguos *gedanken-experiments*, otras buscando derrumbar mitos clásicos embutidos en las famosas paradojas de la mecánica cuántica– están proporcionando la formación de una nueva generación de físicos que están adquiriendo una comprensión natural, «intuitiva», de los fenómenos cuánticos (Zeilinger, 1999). Aunque lejos de pretender que los estudiantes en un primer curso alcancen tal nivel de comprensión, consideramos que esta propuesta puede ser una alternativa razonable para una enseñanza más eficiente de los conceptos básicos de la mecánica cuántica en disciplinas introductorias. Además, experiencias recientes involucrando primeros principios presentan muchas veces desdoblamientos tecnológicos que pueden ser explicados en términos relativamente simples a partir de los postulados fundamentales, dando a la mecánica cuántica un halo de actualidad muchas veces ausente en las disciplinas introductorias. Denominamos a esta estrategia *fenomenológico-conceptual* (Greca y Herscovitz, 2001): *fenomenológica* para favorecer la creación de una nueva percepción y *conceptual* porque los fenómenos seleccionados para el curso deben ser suficientemente simples (elementales) y dirigidos de forma que la esencia de los conceptos fundamentales sea evidente.

Además de estos elementos, consideramos importante, para la formación de modelos mentales, la interacción con terceros –profesor y pares– a través del trabajo de los estudiantes en pequeños grupos. Esto se sustenta en la postura vygostkiana por la cual el aprendizaje es la apropiación de signos e instrumentos en un contexto de interacción (Rivière, 1985). Para la perspectiva socio-cultural, la construcción del conocimiento ocurre durante la participación en actividades guiadas por adultos o por pares más competentes, donde ocurre el intercambio social y la negociación colectiva de significados, para luego internalizarse en cada sujeto concreto. En el lenguaje de los modelos mentales diríamos que el sujeto se apropia de los signos mediante la generación de dichos modelos mentales. Para que los estudiantes puedan apropiarse de los conceptos de la mecánica cuántica, es importante que discutan entre sí y con el profesor, de cara a externalizar las representaciones que resultan de los modelos mentales que construyan y a realizar las correcciones necesarias a esos modelos, mejorando así recursivamente los modelos iniciales. Aquí también la utilización de situaciones experimentales variadas facilitaría el proceso⁷.

DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Para lograr el objetivo buscado, preparamos una unidad instruccional, para ser desarrollada en aproximadamente veinticuatro horas aula (el tiempo usualmente destina-

do a la introducción de mecánica cuántica en las disciplinas de física general). Los principales conceptos abordados en la unidad son los recién mencionados –superposición lineal de estados, principio de incertidumbre (dualidad onda-partícula), distribución de probabilidades y el problema de la medida. La estructuración de la unidad fue en espiral: después de la tercera lección, los conceptos seleccionados ya habían sido todos presentados a los estudiantes, siendo, a cada nueva oportunidad, retomados en la discusión de los nuevos fenómenos. Así, por ejemplo, la experiencia de Stern-Gerlach (elegida por permitir presentar sistemas de dos estados de forma simple) sirvió para discutir la superposición lineal de estados, observables incompatibles, principio de incertidumbre y el carácter probabilístico de los resultados de medida. Siempre que fue posible, los demás temas fueron tratados de la misma forma. Se evitó la utilización de analogías y modelos clásicos o semiclásicos, y las doce lecciones de la unidad incluyeron ejemplos fenomenológicos centrados en las manifestaciones de los conceptos mencionados. Por ejemplo, para la discusión de la superposición lineal de estados, utilizamos las experiencias de Stern-Gerlach (espín) y de Young (autointerferencia de una partícula), la paradoja del gato de Schrödinger, la computación cuántica y la teleportación. Trabajamos fundamentalmente sobre la base de sistemas de dos estados, ya que trabajar en espacios (finitos) bidimensionales permite a los estudiantes pensar en forma más concreta, percibiendo mejor las implicaciones de los principios fundamentales, lo que pueda quedar enmascarado cuando son presentados en espacios generales de muchas dimensiones (que es la forma habitual en que este principio es presentado, cuando lo es). Las exigencias matemáticas fueron mínimas y en la discusión de soluciones de la ecuación de Schrödinger, fueron usados programas computacionales para proporcionar a los estudiantes la visualización de las soluciones de la ecuación con el fin de evitar resoluciones matemáticas de ecuaciones diferenciales. En la figura 1 están relacionados los temas tratados en la unidad y sus características más significativas.

La metodología de trabajo en clase fue la de actividades en pequeños grupos (3 a 4 estudiantes), que no fueron alterados mientras se desarrolló el proyecto. Al inicio de cada período de dos horas de clase, cada alumno recibió un texto especialmente elaborado, sobre el tema a tratar. Ese material no fue preparado para ser leído de forma pasiva, así es que fueron intercalados en el mismo preguntas y problemas, buscando complementar el razonamiento expuesto en el texto. Los alumnos debían trabajar tales ejercicios en los grupos y entregarlos a los profesores al final de cada período de clase. El profesor del curso circulaba entre los estudiantes, aclarando dudas y colocando nuevas preguntas, para estimular y acelerar la comprensión. Otra tarea del profesor fue, al inicio de cada período, presentar un resumen general, en torno a cinco minutos, sobre el tema trabajado en la clase anterior y responder a preguntas de los estudiantes. Esta interacción entre los estudiantes y de ellos con el profesor fue muy importante en el proyecto: para poder comprender el texto y responder a las preguntas del mismo los estudiantes debían expresar sus formas perso-

nales de percibir los fenómenos, externalizando contradicciones y dificultades. Creemos que este proceso permitió a los alumnos modificar recursivamente sus modelos mentales, facilitando la adquisición de los nuevos significados.

Esta propuesta fue implementada en tres oportunidades (en los dos semestres de 1999), en clases de física general del cuarto semestre de las diferentes especialidades de las carreras de ingeniería y de química de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil), con un total de 105 estudiantes.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En consonancia con nuestro referencial intentamos caracterizar los núcleos de los modelos mentales utilizados por los estudiantes para visualizar los conceptos cuánticos construidos a partir de la estrategia didáctica implementada. Para ello elaboramos un instrumento con un test de asociación de conceptos y tres problemas, que incluyen los conceptos de estado de un sistema físico, superposición de estados, principio de incertidumbre, autovalores, observable, observables simultáneos, valor esperado, función de onda, probabilidades, dualidad onda-partícula, electrón, efecto fotoeléctrico, efecto túnel, trayectoria y resultado de mediciones. Este test fue aplicado antes y después de la unidad didáctica. (La fundamentación de la utilización del test de asociación de conceptos y la elección de los principios, así como los análisis realizados con esos datos pueden ser encontrados en Greca, 2000). Se solicitó a los estudiantes, además, que explicaran con sus palabras lo que entendían sobre cada uno de los conceptos listados, presentando ejemplos o utilizando dibujos si se deseaba. Estas explicaciones, además de las respuestas a los problemas y el material recogido durante la implementación de la unidad – anotaciones de campo y las respuestas a las preguntas de los textos de cada clase –, fueron analizados desde una perspectiva cualitativa.

Para tal análisis fueron considerados los siguientes criterios: características de las explicaciones dadas (si explicaban o no, si eran simple repetición de definiciones, si eran fragmentadas), relación de las explicaciones con la fenomenología y el formalismo cuántico, relación con los modelos clásicos de partícula y de ondas, consistencia entre explicaciones o respuestas para distintos ítems y concordancia de las explicaciones con las científicamente aceptadas. Para cada estudiante se determinaron las características principales según estos criterios y fueron extraídos los párrafos o frases que mejor las describían. Posteriormente se analizó el conjunto de los estudiantes, en busca de patrones comunes que definirían, a nuestro entender, los núcleos desde los cuales los estudiantes estarían visualizando los diferentes conceptos. Una vez que esos patrones eran encontrados se les caracterizaba, estableciendo categorías, y se retornaba al material original para establecer si las categorías

encontradas definían a cada uno de los estudiantes. Ese proceso continuaba hasta que las explicaciones de los estudiantes fueran agotadas, o sea, cuando cualquier refinamiento en las categorías propuestas para incluir la explicación de un alumno haría perder sentido al conjunto. Este procedimiento fue realizado en dos oportunidades diferentes para observar en qué medida las categorías propuestas eran estables para los propios investigadores.

A continuación presentaremos las categorías resultantes para dos de los grupos que recibieron la instrucción propuesta (número de alumnos = 69).

RESULTADOS

El análisis cualitativo del material disponible desembocó en cuatro categorías⁸, cuyas características principales presentamos a continuación. Como ilustración, presentaremos las respuestas de estudiantes de cada categoría a los problemas que aparecen en el cuadro I (un análisis más detallado en Greca, 2000).

Cuadro I
Problemas de los tests.

- 1) Un electrón de un átomo de hidrógeno se encuentra en el estado de menor energía posible. ¿Esto significa que la posición del electrón es fija? ¿Esto significa que el momento del electrón es fijo? Explique sus respuestas.
- 2) Se sabe que un electrón, prácticamente libre, viaja como un momento lineal k constante. Se coloca delante del electrón una pantalla cuadrada A , ortogonal a la dirección del momento del electrón y simétricamente dispuesta en relación a esta dirección. ¿Espera usted que el electrón incida en algún punto de la pantalla? Si la respuesta a la pregunta anterior es afirmativa, ¿en qué punto? Si otros electrones siguiesen al primero, exactamente con el mismo momento, ¿qué resultados esperaría usted para la medida de la posición de aquéllos sobre la pantalla?
- 3) Un conjunto de sistemas atómicos, preparados todos del mismo modo, es sometido a una serie de medidas de energía, obteniéndose para algunos sistemas el valor E_1 , para otros E_2 , etc. ¿Cómo se podría interpretar este resultado? Estamos particularmente interesados en obtener información sobre cuál era el estado del sistema inmediatamente *antes* de la medida.

– Categoría 1: Núcleo de objeto cuántico (N = 17)

Los estudiantes de esta categoría parecen generar modelos mentales en los que están incorporadas las ideas cuánticas consideradas fundamentales, describen los fenómenos cuánticos a partir de principios más generales, consiguen todos establecer predicciones y, muchos de ellos, presentar explicaciones satisfactorias en este nivel de instrucción para las cuestiones propuestas, además de establecer diferenciaciones entre conceptos clásicos y cuánticos. Podríamos resumir así lo que parece que estos estudiantes «conocen»: saben que un objeto cuántico puede existir en un estado que puede ser superposición de otros estados; saben que las mediciones

influyen en general en el resultado obtenido, ya sea porque obligan al sistema a definirse por un estado particular dependiente de la propiedad medida o porque no es posible medir determinados observables físicos simultáneamente; perciben que la función de onda describe el comportamiento de estos objetos, determinando las probabilidades de que ciertos resultados ocurran. El nivel de articulación entre los conceptos alcanzado por los integrantes de esta categoría varía en algunos alumnos llegando a incorporar la noción de *descoherencia* para explicar por qué no son observados efectos cuánticos a escala macroscópica. La importancia dada a cada concepto también es variable: algunos estudiantes atribuyen al principio de incertidumbre la diferencia más importante entre el mundo clásico y el cuántico, mientras que para otros este lugar es ocupado por la posibilidad de superposición lineal de estados y por la probabilidad.

Como ilustración del tipo de respuestas típicas de un alumno de la disciplina en el pretest presentamos las respuestas de uno de los estudiantes (24B).

Problema 1: «*La posición del electrón no es fija, pues describe órbitas en torno al núcleo. El momento es fijo, porque el electrón posee masa y velocidad que se conservan en su trayectoria alrededor del núcleo.*»

Problema 2: «*Todos los electrones van a llegar a la pantalla en el mismo punto, ubicado en la posición central.*»

Problema 3: «*Por alguna razón, la energía del sistema es alterada. Tal vez esta alteración esté relacionada con la energía de los propios átomos constituyentes del sistema en cuestión.*»

Estas respuestas son incorrectas. De hecho, las respuestas a los dos primeros problemas pueden ser entendidas considerando que el estudiante «vea» el electrón como una partícula clásica que, en consecuencia, recorre trayectorias definidas. La explicación dada a la última cuestión es, nuevamente, una explicación clásica: si los sistemas están preparados de la misma forma pero las energías medidas son diferentes, entonces algo alteró su estado inicial. Este patrón de respuestas fue común a todos los estudiantes que respondieron estas cuestiones en el pretest.

En contraposición, en el postest de este mismo estudiante pueden notarse algunas de las características descritas anteriormente, o sea, las predicciones y las explicaciones parecen resultar de modelos mentales en los que han sido incorporados los conceptos cuánticos fundamentales.

Problema 1: «*La posición del electrón no es determinada, así como tampoco su momento. Su energía es dada por $E = -13,6 \frac{eV}{n}$ (siendo n el número cuántico principal). En el estado de menor energía, el estado fundamental, el electrón tiene esa energía total, que es la suma de las energías cinética y potencial. Por el principio de*

incertidumbre, estando el electrón más cerca del núcleo, más confinado al potencial nuclear, la incertidumbre en su localización es menor, pero la incertidumbre en su momento es grande, siendo la contribución de la energía cinética también grande.»

Problema 2: «*No podemos determinar con exactitud el lugar en que cada electrón va a llegar a la pantalla. Podemos conocer, a partir de su función de onda, la densidad de probabilidad de localización y, con eso, los puntos más probables adonde llegue. El patrón de interferencia que se observará en la pantalla será como el patrón de interferencia para las ondas electromagnéticas.*»

Problema 3: «*El hecho de obtener distintos valores de energía para sistemas que están preparados de la misma forma significa que, antes de la medida, los dos estados E_1 y E_2 coexistían en el mismo sistema.*»

Otro representante de esta categoría es el estudiante 1A, que respondió de la siguiente forma a los problemas planteados:

Problema 1: «*La posición del electrón no es fija, como tampoco su momento. En pocas palabras, esto es consecuencia del principio de incertidumbre, uno de los pilares de la mecánica cuántica.*»

Problema 2: «*Como conocemos el momento del electrón, no podemos determinar su exacta localización. Luego, sabemos que va a llegar a la pantalla, pero no sabemos donde ocurrirá la colisión. Esta localización (de la colisión) está relacionada con una densidad de probabilidades, y otros electrones, con el mismo momento que el primero no llegarán a la pantalla necesariamente en el mismo punto (¡probablemente el punto será otro!). Con bastante seguridad habrá regiones en la pantalla en que la probabilidad de que el electrón llegue hasta ellas sea mayor que en otras regiones.*»

Problema 3: «*Los resultados obtenidos indican que antes de la medición los sistemas atómicos se encontraban en una superposición lineal de estados, del tipo:*

$|\text{estado}\rangle = C_1 |\text{autoestado}_1\rangle + C_2 |\text{autoestado}_2\rangle + \dots + C_n |\text{autoestado}_n\rangle$, donde $C_{1..n}$ es la raíz cuadrada de la probabilidad de que el resultado de la medición sea el autoestado $1..n$.»

– **Categoría 2:** Núcleo de objeto cuántico incipiente (N = 28)

En esta categoría ubicamos los estudiantes que parecen haber comprendido las implicaciones de la dualidad onda-partícula, del principio de incertidumbre y del carácter probabilístico de los resultados de medición, pero no consiguieron incorporar, o por lo menos no en forma clara, la superposición lineal de estados. Esto lleva a que, cuando son confrontados con situaciones en que este concepto está en juego, responden en forma incorrecta. De cualquier manera, el núcleo a partir del cual los fenómenos habrían sido visualizados parece ser

cuántico; o sea, los estudiantes parecen haber abandonado una visualización clásica, por lo menos para algunos de los fenómenos. La incorporación de los conceptos de dualidad, principio de incertidumbre y probabilidades les permite dejar de considerar los objetos cuánticos o como partículas clásicas o como ondas. Para ellos la función de onda describe el comportamiento de los objetos del mundo microscópico, siendo posible extraer de la misma informaciones como la de los autovalores (que relacionan bien con el concepto de *cuantización*) y la probabilidad de determinados resultados. En general, el concepto de *probabilidad* está asociado a la probabilidad de localizar los electrones. Esto, además del principio de incertidumbre, les permite explicar razonablemente bien la imposibilidad de que en general los objetos cuánticos tengan trayectorias bien definidas. Sin embargo, aunque sepan que las mediciones (experiencias) afectan al resultado de la medida (esto puesto en evidencia en el adecuado uso tanto del principio de incertidumbre cuanto de la dualidad onda-partícula) no pueden explicar correctamente lo que supone suceder antes y después de la medida de una propiedad de un sistema cuántico. Así, aún consiguiendo definir o utilizar ejemplos apropiados para la superposición lineal de estados, la mayoría de estos alumnos no puede resolver de forma correcta el tercer problema, que supone la comprensión de este punto en particular. Podríamos decir que los estudiantes de esta categoría parecen abandonar una matriz de explicación clásica no consiguiendo, sin embargo, la articulación adecuada entre los conceptos fundamentales que es característica de la primera categoría. Como consecuencia, sus explicaciones son más restrictivas, lo que podría ser indicativo de modelos mentales más sencillos.

En los siguientes ejemplos de dos alumnos de esta categoría (11A y 32B) puede observarse que, en las dos primeras cuestiones, las respuestas apuntan en la dirección correcta (aunque no sean completamente correctas), dando indicios de la incorporación de los conceptos de *principio de incertidumbre* y *distribución de probabilidades*. Sin embargo, las respuestas a la tercera cuestión están definitivamente erradas: para los dos estudiantes, los diferentes valores obtenidos presuponen diferentes estados iniciales.

Problema 1: «*Lo que conocemos es el área en que la energía total del electrón es menor, no el punto de menor energía y, si tenemos una pequeña incertidumbre sobre la posición, tenemos una incertidumbre inmensa sobre el momento, y no conseguimos determinar los dos al mismo tiempo.*» (Estudiante 11A)

«Es imposible asociar una posición a una partícula de éstas. Podemos asociar al electrón una densidad de probabilidad de donde pueda encontrarse, cuando es sometido a un potencial. Además, si no sabemos las posiciones iniciales ni finales, no tenemos la trayectoria, y sin esta última no encontramos la velocidad. En conjunto, no conocer la posición ni el momento es lo que se expresa en el principio de incertidumbre.» (Estudiante 32B)

Problema 2: «*En este caso, tengo una gran incertidumbre sobre la trayectoria, dado que sé exactamente el valor del momento. Así, no sé si irá a chocar con la pantalla (si es infinita, sí), lo que puedo saber son las regiones donde es más probable que llegue.*» (Estudiante 11A)

«El electrón puede llegar a la pantalla en cualquier punto, no existe un punto preciso. Podemos tener una probabilidad mayor en determinada región, y una casi nula en otra, pero son probabilidades.» (Estudiante 32B)

Problema 3: «*Este conjunto de sistemas atómicos está sometido a diferentes potenciales. No es necesario saber el estado del sistema antes de la medida, pues fueron preparados todos del mismo modo.*» (Estudiante 11A)

«Obtenemos diferentes valores de energía porque está cuantizada, o sea, sólo asume determinados valores de energía. Cada sistema tiene sus propios autovalores.» (Estudiante 32B)

– **Categoría 3:** Núcleo clásico con elementos cuánticos (N = 13)

Los estudiantes de esta categoría parecen visualizar los fenómenos cuánticos a partir de núcleos clásicos, de forma que los conceptos incorporados tienen su significado distorsionado. Así, por ejemplo, cuando intentan dar significado a los conceptos de *dualidad* y *superposición*, la superposición resulta ser entendida como suma de los efectos de partícula y de onda. El concepto de *trayectoria*, en particular, es interesante de analizar para observar en qué medida la incorporación de determinados conceptos de la fenomenología cuántica cambia el significado dado al mismo. Este concepto, que para los estudiantes de otras categorías era descartado (desde el punto de vista de conceptos que describen el mundo microscópico), pasa a tener, para los estudiantes de la categoría 3 una importancia fundamental, mostrando los intentos de incorporar «vino nuevo en odres viejos». Así, cuando el concepto de *dualidad* es incorporado al núcleo de partícula clásica, la trayectoria se confunde con la función de onda, o sea, la onda se convierte en la materialización de la trayectoria que la partícula recorre; cuando incluyen en la matriz clásica el concepto de *probabilidad*, la trayectoria pasa a ser aleatoria o probabilística, de tal forma que la probabilidad de esta trayectoria es dada por la función de onda al cuadrado. Los conceptos que no son integrados de esta forma, o sea, a partir de «visualizaciones» clásicas, pasan a recibir definiciones aisladas (en general, repiten textualmente definiciones dadas) o definiciones clásicas. La mayoría de los estudiantes de esta categoría no parece darse cuenta de la diferencia entre las mediciones en sistemas clásicos y cuánticos: para ellos el resultado de una medida siempre caracteriza el estado del sistema, como ocurre clásicamente. Por lo tanto, si se obtienen diferentes valores de un observable después de la medición, esto significa que estaban en estados diferentes de ese observable antes de dicha medición. Ninguno de los estudiantes de este grupo utiliza ejemplos fenomenológicos como lo hacían los de las categorías anteriores: las pocas

oportunidades en que aparecen ejemplos son apenas enunciados, sin ser ni explicados, ni dando sustentación a cualquier explicación.

De esta forma, la mayoría de las respuestas a los problemas finales son predicciones o explicaciones clásicas, o intentos de utilizar alguna terminología cuántica en explicaciones clásicas. En las respuestas siguientes de alumnos de esta categoría podemos observar estos aspectos.

Problema 1: «*La posición del electrón no es determinada, está girando alrededor del núcleo, pero su momento sí lo es.*» (Estudiante 15A)

Problema 2: «*El electrón debe llegar a la pantalla en la posición central. Si otros electrones siguen el primero, vamos a poder observar una superposición de efectos.*» (Estudiante 15A)

«Si el electrón no «tunela» en la pantalla, él y todos los otros electrones llegarán al centro de la pantalla.» (Estudiante 5B)

Problema 3: «*Los electrones están recibiendo y cediendo energía, por eso están cambiando las medidas de energía entre los sistemas E_1 y E_2 . Podemos decir que los sistemas estaban en estados inestables antes de las medidas.*» (Estudiante 15A)

«Este resultado se puede interpretar si consideramos que probabilísticamente algunos valores son asignados al sistema S_1 y otros a S_2 . Antes de la medida no nos interesa.» (Estudiante 2B)

– **Categoría 4** : Indeterminado (N = 11)

En esta categoría se encuentran los estudiantes para los cuales no fue posible determinar cualquier patrón de respuesta. Muchos de estos alumnos no presentan explicaciones para los conceptos (en general, no responden las cuestiones de los tests) y, cuando lo hacen, no es posible encontrar una línea de argumentación que se mantenga en varias oportunidades. A veces estos estudiantes presentan definiciones clásicas para los conceptos que lo permiten (como *trayectoria* y *probabilidad*, por ejemplo), pero en la mayor parte de los casos confunden los términos y utilizan de forma incorrecta los ejemplos. En resumen, estos estudiantes revelan no comprender los conceptos cuánticos que les fueron presentados, y tampoco parecen intentar comprenderlos a partir de núcleos clásicos, como los del grupo anterior.

Presentamos a continuación algunos ejemplos de estudiantes de esta categoría a las cuestiones planteadas:

Problema 1: «*La posición del electrón en el estado fundamental es fija y su momento también, porque en el estado de menor energía no tiene fuerza para salir de este nivel, está fijo en este nivel.*» (Estudiante 22A)

Problema 2: «*Los electrones libres vienen y encuentran la pantalla, pero sólo van a chocar con la pantalla los*

que tienen menor energía, y después de chocar volverán.» (Estudiante 22A)

Problema 3: «*La diferencia de energía entre los sistemas se debe a que no todos los sistemas que son preparados del mismo modo poseen la misma energía, pues unos sufren más interacciones con el sistema que otros.*» (Estudiante 22A)

«Con base en la energía cinética y en la energía potencial calculada por las ecuaciones correspondientes, se revelarán gráficos de informaciones descriptivos del estado del sistema.» (Estudiante 6B)

CONCLUSIONES

Los resultados de varias investigaciones enseñan que la forma en que tradicionalmente son introducidos los conceptos cuánticos no logra buenos resultados en el aprendizaje de los estudiantes, probablemente, en parte, porque continúan visualizándolos o intentándolos comprender desde modelos mentales «clásicos». Nuestro abordaje buscó facilitar el proceso de formación de modelos mentales que incorporen los conceptos cuánticos que determinan una nueva forma de percepción de los fenómenos microscópicos. Para ello consideramos que el énfasis de la primera presentación de estos conceptos debe estar en la discusión conceptual a partir de fenómenos simples, intentando no establecer analogías ni ligaduras con los conceptos clásicos, para no reforzar las ideas clásicas que los estudiantes poseen desde hace tiempo. Los resultados obtenidos parecen indicar que la propuesta apunta en un sentido correcto. La categorización presentada, que fue triangulada con los resultados obtenidos de análisis cuantitativos (Greca y Herscovitz, 2000a, 2000b, 2000c) indica que un porcentaje elevado de los estudiantes (categorías 1 y 2, [65,2% de los estudiantes]) parece que conseguirá construir núcleos que incorporará conceptos cuánticos considerados fundamentales, exhibiendo una razonable comprensión de los mismos para este nivel de instrucción, lo cual permite a los estudiantes realizar lecturas cuánticas adecuadas de los fenómenos del mundo microscópico.

Es importante destacar también que la propuesta didáctica no sólo parece haber tenido éxito en la promoción de un cambio en la forma de percepción de una parte significativa de los estudiantes, sino que también logró que muchos de ellos se interesasen en el asunto. Al final de la unidad, los alumnos respondieron un cuestionario de actitudes para evaluarla, construido con afirmaciones de tipo Lickert (1976) acerca de diferentes aspectos de las clases y de la importancia del estudio de la mecánica cuántica (coeficiente de fiabilidad del cuestionario: 0,82). Según los resultados obtenidos, el 88% de los alumnos evaluaron positivamente la propuesta didáctica, lo que indica que el curso fue muy bien recibido por los estudiantes. Estos resultados parecen mostrar que la vinculación del modelo físico (asociado al mundo microscópico) a algunas de las aplicaciones tecnológicas recientes

e interesantes motivaron a los estudiantes y les permitieron asociar «elementos de realidad» a la física cuántica, que de esa forma conquistó un espacio propio entre las ciencias físicas.

No abordamos en este estudio la cuestión relacionada con la estabilidad de los núcleos encontrados, sobre todo los referidos a los objetos cuánticos. Sin embargo, según los profesores de las disciplinas en que trabajamos, los estudiantes estuvieron más motivados y formularon preguntas más interesantes de las que habitualmente presentan en la unidad siguiente de la disciplina –Estado Sólido–, aparentando una mayor comprensión de los conceptos cuánticos. Sin embargo esto no fue investigado sistemáticamente. Consideramos que estudiar en qué medida las nuevas formas de visualización logran mantenerse después del curso es una cuestión interesante e importante que deseamos desarrollar en futuros trabajos.

Al par de esta cuestión también merece más estudio la referida a no establecer explícitamente conexiones con los conceptos clásicos que los estudiantes ya poseen. Es por demás conocida, y aceptada, la afirmación ausubeliana de que, si fuese posible aislar un único factor como el que más influye en el aprendizaje, éste sería aquello que el aprendiz ya sabe. En otras palabras, sólo se puede aprender a partir de aquello que ya se sabe. Sin embargo parece que, en este caso, partir de aquello que se conoce para otra «realidad» puede dificultar la percepción de lo nuevo en los conceptos que se intenta enseñar, siendo ésta la base sobre la cual fue proyectada nuestra estrategia didáctica. Los resultados obtenidos con nuestro abordaje parecerían dar apoyo a esta hipótesis (Moreira y Greca, 2000).

Aunque nuestra propuesta estuvo centrada en estudiantes de cursos de ingeniería, puede perfectamente servir de base para estudiantes de los profesorado en física y química. De hecho, hoy es relativamente fácil encontrar muchos fenómenos y aplicaciones nuevas que resultan de los fundamentos de la mecánica cuántica en revistas y libros de divulgación científica. Sin embargo, como indica D'Espagnat, al intentar simplificar una idea compleja, estos textos terminan pasando ideas truncadas, por ejemplo, de que los electrones, protones, fotones son bolitas que chocan entre sí, reforzando imágenes clásicas, concepciones éstas «falsas, no en detalle, sino de una manera esencial» (D'Espagnat, 1990, p. 263). Son justamente los profesores que actúan en el nivel medio los que inicialmente deben intentar cambiar este tipo de imagen. Claro está que, para alcanzar este objetivo, deben tener una idea clara sobre los conceptos fundamentales. Sin embargo, esto parece no ocurrir muchas veces. En una experiencia piloto con profesores de nivel medio constatamos que, aunque motivados para incorporar temas de mecánica cuántica en sus clases y reconociendo la importancia de esta cuestión, muchas veces no lo hacen porque no se sientan preparados para una discusión conceptual sobre estos asuntos. De hecho, los cursos de formación de profesores en Brasil incluyen, en general, sólo una disciplina específica sobre los conceptos cuánticos fundamentales, usualmente presentada de forma tradicional. Aunque seguramente una formación más completa de los profesores sea un elemento fundamental para introducir los conceptos cuánticos en la realidad de la escuela brasileña, cómo hacerlo exige más estudio. Ahora bien, maneras más ágiles de aprender, «yendo directamente al punto», parecen acelerar la formación de una «intuición» cuántica.

NOTAS

¹ Hemos tomado como base los cursos típicos para las carreras de ciencias exactas que se dictan en Brasil.

² Excepciones a esa «regla» son, por ejemplo, las propuestas de las «Feynman's Lectures» (1966) y el «Berkeley Physics Course» (1971). Ambas son derivadas de la de Dirac (1956) y parten de la idea de la necesidad de la discusión de los conceptos cuánticos a partir de la propia cuántica. Estas propuestas, sin embargo, no son generalmente utilizadas en estas asignaturas.

³ Esta presentación induce, además, una visión puramente «empirista» de la ciencia.

⁴ Cuando los hay. En general, para los estudiantes de ingenierías, estas disciplinas son la única oportunidad para comprender los fundamentos de la teoría cuántica.

⁵ Cabe aclarar que utilizamos de forma indistinta los términos *visualización* y *percepción*, los dos entendidos de manera figurada. O sea, cuando nos expresemos de esta forma, en el contexto de la mecánica cuántica, no nos estaremos refiriendo a visualizaciones que se encuentren «pegadas» a objetos concretos. Las imágenes utilizadas deben ser más sofisticadas. La teoría de los modelos mentales de Johnson-Laird admite la existencia de modelos mentales sin componentes imagísticos, como aquéllos

que permiten entender conceptos que trascienden lo que es directamente perceptible, como justicia o verdad (Johnson-Laird, 1996, p. 114). Conteniendo o no imágenes, los modelos mentales construidos por un sujeto determinan cómo el mismo percibe situaciones en el mundo.

⁶ Los que siguen no son exactamente conceptos, sino ideas que deberían ser aprehendidas por los estudiantes para poder entender el mundo descrito por la mecánica cuántica.

⁷ Aunque los modelos mentales sean representaciones internas e individuales, que no pueden ser directamente compartidas, los modelos defectuosos e incompletos de los estudiantes

pueden ser expresados y representados en un nivel interpsicológico. Como indica Sorzio (1995, p. 22), «el proceso de representación recursiva de representaciones, al nivel intermental, permite a los seres humanos compartir perspectivas de nivel más alto, siendo esencial para la adquisición de conocimiento, pues permite dudar y descreer».

⁸ Esta categorización no puede ser pensada de forma rígida. Algunos de los materiales producidos por los estudiantes no pueden ser encuadrados perfectamente bajo los aspectos principales con los cuales caracterizamos el grupo al cual consideramos que pertenecen.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBROSE, B.S., SHAFFER, P.S., STEINBERG, R.N. y McDERMOTT, L.C. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67(2), pp. 146-155.
- BAO, L., JOLLY, P. y REDISH, E. (1996). Student difficulties with quantum mechanics, en *AAPT Summer Meeting*, Phoenix. Oral communication. www.physics.umd.edu/perg/cpt.html.
- BORGES, A.T. y GILBERT, J. (1998). Models of magnetism. *International Journal of Science Education*, 20(3), pp. 361-378.
- D'ESPAGNAT, B. (1990). *Penser la science ou les enjeux du savoir*. París: Gauthier-Villars.
- DIRAC, P. (1956) *Principios de mecánica cuántica*. Barcelona: Ariel.
- EULER, M., HANSELMANN, M., MÜLLER, A. y ZOLLMAN, D. (1999) Students' views of models and concepts in modern physics, en *Annual Meeting National Association For Research In Science Teaching*, 1999, Boston. *Collection of papers presented*. www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst.
- FISCHLER, H. y LICHTFELDT, M. (1992) Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), pp. 181-190.
- FLETCHER, P. y JOHNSTON, I. (1999) Quantum mechanics: exploring conceptual change, en *Annual Meeting National Association For Research In Science Teaching*, Boston. *Collection of papers presented*. www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst.
- GIL, D. y SOLBES, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15 (3), pp. 255-260.
- GRECA, I.M. (2000). «Construindo significados em Mecânica Quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de física general». Tesis doctoral. Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- GRECA, I.M. y HERSCOVITZ, V.E. (2001) Mecânica Quântica e Intuição. En *Fundamentos da Física 2*. Simpósio David Bohm, v. 2. São Paulo: Livraria da Física.
- GRECA, I. M. y HERSCOVITZ, V. E. (2000) Construindo intuição em Mecânica Quântica, en *Proceedings of the VI Interamerican Conference On Physics Education*. Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS.
- GRECA, I.M. y HERSCOVITZ, V. E. (2000). Mecânica Quântica para não físicos: avaliação de uma proposta didática, en *Atas do VII Encontro De Pesquisa Em Ensino De Física*. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Física.
- GRECA, I.M. y HERSCOVITZ, V. E. (2000). Teaching quantum mechanics at an introductory level to science undergraduate students, en *Proceedings of the International Conference Physics Teacher Education Beyond 2000*. Barcelona.
- GRECA, I.M. y MOREIRA, M.A. (1997). The kinds of mental representations: models, propositions and images - used by college physics students regarding the concept of field. *International Journal of Science Education*, 19(6), pp. 711-724.
- GRECA, I.M. y MOREIRA, M.A. (1998). Modelos mentales y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(2), pp. 289-303.
- GRECA, I.M., y MOREIRA, M.A. (1998). Modelos mentais e modelos físicos no ensino e na aprendizagem da Física, en *Atas do VI Encontro De Pesquisadores em Ensino de Física*. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Física.
- GRECA, I.M. y MOREIRA, M.A. (1999) O quê estão entendendo alunos universitários nas aulas de Mecânica Quântica?, en *Atas do II Encontro Nacional De Pesquisa Em Educação Em Ciências*. Valinhos. São Paulo. Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS.
- HOBSON, A. (1996). Teaching quantum theory in the introductory course. *The Physics Teacher*, 34(4), pp. 202-210.
- HOOD, C.G. (1993). Teaching about quantum theory. *The Physics Teacher*, 31(5), pp. 290-293.
- HUGHES, R.I. (1989). *The structure and interpretation of quantum mechanics*. Cambridge: Harvard University Press.
- JAMMER, M. (1974). *The philosophy of quantum mechanics*. Nueva York: John Wiley.
- JOHNSON-LAIRD, P. (1983) *Mental models*. Cambridge: Harvard University Press.

- JOHNSTON, I.D., CRAWFORD, K. y FLETCHER, P.R. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, 20(4), pp. 427-446.
- KRAGH, H. (1992) A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science and Education*, 1, pp. 349-363.
- LICKERT, R. (1976) Una técnica para medir actitudes, en Summers, G. F. (ed.). *Medición de actitudes*. México: Trillas, pp. 182-191.
- MASSHADI, A. (1996). Students' conceptions of quantum physics, en Welford, G. et al. (eds.). *Research in science education in Europe*. Londres: The Falmer Press, pp. 254-265.
- MOREIRA, M.A. y GRECA, I.M. (2000). Introdução à Mecânica Quântica: seria o caso de evitar a aprendizagem significativa (subordinada)?, en *Atas do III Encontro Internacional Sobre Aprendizagem Significativo*. Peniche. Lisboa: Universidade de Lisboa.
- NIEDDERER, H. y DEYLITZ, S. (1999). Evaluation of a new approach in quantum atomic physics in high school, en *Annual Meeting National Association For Research In Science Teaching*, 1999. Boston. *Collection of papers presented*. www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst.
- REBELLO, N.S. y ZOLLMAN, D. (1999). Conceptual understanding of quantum mechanics after using hands on experiments and visualization instructional materials, en *Annual Meeting National Association For Research In Science Teaching*, 1999. Boston. *Collection of papers presented*. www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst .
- RIVIÈRE, A. (1985). *La psicología de Vygotski*. Madrid: Aprendizaje Visor.
- STYER, D. (1996). Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 64(1), pp. 31-34.
- SCHRÖDINGER, E. (1983) «Die gegenwertige situation in der quantum mechanik», en Wheeler, J. y Zurek, W. (orgs.) *Quantum theory and measurement*, pp. 152-167. Princeton: Princeton University Press.
- SORZIO, P. (1995). Cultural representation and individual understanding. *Journal of Russian and East European Psychology*, pp. 16-23.
- ZEILINGER, A. (1999). In retrospect: Albert Einstein: philosopher-scientist. *Nature*, 398(6724), pp. 210-211.

[Artículo recibido en abril de 2001 y aceptado en septiembre de 2001.]