

# OBSTÁCULOS REPRESENTACIONALES MENTALES EN EL APRENDIZAJE DE CONCEPTOS CUÁNTICOS<sup>1,2</sup>.

(Mental representational obstacles in the learning of quantum concepts.)

*Marco Antonio Moreira*

*Ileana María Greca*

Instituto de Física da UFRGS

Caixa Postal 15051, Campus

91501-970. Porto Alegre, RS, Brasil

moreira@if.ufrgs.br

ileana@if.ufrgs.br

## Resumen

En este trabajo argumentaremos que a pesar de que el conocimiento previo, o la percepción previa, es el principal factor facilitador de nuevos aprendizajes, o nuevas percepciones, hay casos en que este factor se torna indeseable porque obstaculiza mentalmente la percepción de nuevos significados. Nuestro argumento es ejemplificado a través del aprendizaje de la Mecánica Cuántica, donde los significados de los conceptos cuánticos pueden no ser percibidos por los alumnos debido a la fuerte influencia de los significados de los conceptos clásicos ya arraigados en su estructura cognitiva, los que actúan como obstáculos representacionales mentales.

**Palabras clave:** *obstáculos representacionales mentales; aprendizaje significativo subordinado; conceptos cuánticos; asimilación y formación de conceptos.*

## Abstract

In this paper we argue that although previous knowledge, or previous perception, is the main facilitating factor of new learning, or new perceptions, in some cases this factor might be undesirable because it mentally precludes the perception of new meanings. Our argument is illustrated with the learning of quantum mechanics in which the meaning of the quantum concepts might not be perceived by the students due to the strong influence of the classical concepts already deeply rooted in their cognitive structure, which work as mental representational obstacles.

**Key-words:** *mental representational obstacles; subordinate meaningful learning; quantum concepts; concept assimilation and formation.*

## Introducción

Es bien conocida, y aceptada, la afirmación ausubeliana (Ausubel, 1968, 1980, 2000) de que si fuese posible aislar un único factor como lo que más influencia el aprendizaje este sería aquello que el aprendiz ya sabe. En otras palabras, sólo se puede aprender a partir de aquello que ya se sabe. A excepción del caso de los niños pequeños, cuando predomina el proceso de formación de conceptos, el mecanismo humano, por excelencia, para aprender es

---

<sup>1</sup> Una versión preliminar de este trabajo fue presentada en el III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, Peniche, Portugal, 11-15 de septiembre de 2000, bajo el título "Introdução à Mecânica Quântica: seria o caso de evitar a aprendizagem subordinada?". Revisado en 2003.

<sup>2</sup> Publicado en MOREIRA, M.A.; GRECA, I.M. *Sobre cambio conceptual, obstáculos representacionales, modelos mentales, esquemas de asimilación y campos conceptuales*. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

la asimilación de conceptos. Dentro de la asimilación de conceptos, el caso más típico es el del aprendizaje subordinado, en el cual la nueva información adquiere significados por interacción con algún subsumidor específicamente relevante. Es decir, el aprendiz acciona su conocimiento previo para dar significado a la nueva información y esta, de cierta forma, se ancla (interactuando) con aquello que el aprendiz ya sabe. Es el caso más común, y eficaz, de aprendizaje por asimilación. Sin embargo, no siempre es el más ventajoso. En el caso del aprendizaje de los conceptos básicos de la Mecánica Cuántica, por ejemplo, encontramos evidencias que el uso de subsumidores de la Mecánica Clásica no parece ser adecuado para dar significados a conceptos cuánticos -- como no localidad, superposición de estados, dualidad onda-partícula y distribución de probabilidades. La tendencia natural del alumno, estimulada por el enfoque histórico de los libros de texto introductorios de la Mecánica Cuántica, es hacer un puente con los conceptos clásicos. Del punto de vista cognitivo puede ser natural, pero desde la perspectiva de la Física parece no ser la manera más adecuada pues los alumnos no consiguen captar los significados científicamente aceptados de tales conceptos. Posiblemente, el aprendizaje significativo subordinado debería ser evitado o, por lo menos, no incentivado en ese caso. Podríamos entonces pensar en facilitar el aprendizaje significativo superordenado o el combinatorio? Creemos que no; nuestros resultados con estudiantes de ingeniería apuntan más en la dirección de la formación de conceptos, un proceso común en las primeras edades pero no exclusivo de ellas. Sin embargo, la formación de conceptos en jóvenes adultos, o adultos, debe enfrentar *conceptos-obstáculo* (Bachelard, 1991, p. 23), o *nociones-obstáculo* (Bachelard, 1971, p. 72), o, aún, *obstáculos representacionales mentales* o, simplemente, *obstáculos mentales* no enfrentados, o enfrentados con menos intensidad, por los niños que, a través de la formación de conceptos, construyen los primeros subsumidores, los cuales, a su vez, facilitan la adquisición y retención de otros conceptos en un proceso interactivo. De esta forma se constituye, dinámicamente, la estructura cognitiva del aprendiz, en la óptica de Ausubel. Tal estructura, en una cierta área de conocimiento, pasa a ser la más importante variable *independiente* (facilitando, inhibiendo o limitando) en su capacidad de adquirir y retener *nuevos* conocimientos en esa misma área.

Esa será nuestra línea de argumentación para sugerir que el aprendizaje significativo subordinado debe ser evitado en el caso del aprendizaje de los conceptos básicos de la Mecánica Cuántica.

### **Aprendizaje significativo subordinado**

El aprendizaje significativo se caracteriza fundamentalmente por una interacción entre el nuevo conocimiento y algún aspecto, específicamente relevante, del conocimiento previo del aprendiz. En esa interacción la nueva información adquiere significado para el sujeto y el subsumidor puede tornarse más rico, más elaborado o, simplemente, ser corroborado.

Cuando el significado del nuevo material de aprendizaje, resultante de la interacción con el conocimiento previo relevante (i.e., lo que Ausubel llama de subsumidores), refleja una relación de subordinación relativamente a la estructura cognitiva preexistente, el aprendizaje significativo es llamado *subordinado*.

Es posible distinguir dos tipos de aprendizaje significativo subordinado: derivativo y correlativo. El aprendizaje subordinado *derivativo* es aquel que ocurre cuando el material aprendido es entendido como un ejemplo específico de un concepto ya establecido en la estructura cognitiva, o apenas corrobora o ilustra una proposición general, previamente aprendida. En los dos casos, el significado del nuevo material emerge, rápida y relativamente sin esfuerzo pues es directamente derivable de, o está implícito en, un concepto o proposición más inclusivo ya existente en la estructura cognitiva (Ausubel et al., 1980, p. 58). Por otro

lado, el significado así adquirido sufre también, más fácilmente, los efectos de la asimilación obliteradora.

El aprendizaje subordinado *correlativo*, a su vez, es aquel en que el nuevo material es aprendido como una extensión, elaboración, modificación o calificación de conceptos o proposiciones previamente aprendidos. El material es incorporado a la estructura cognitiva por interacción con subsumidores más inclusivos, sin embargo, su significado no está implícito y no puede ser adecuadamente representado por esos subsumidores. Ese es el proceso mediante el cual, de forma más típica, un nuevo contenido es aprendido.

Por ejemplo, si el aprendiz ya tiene con estabilidad y claridad la idea de "conservación de energía", cada vez que resuelve problemas de Física o de Química en los cuales se verifica que, de hecho, la energía se conservó, mismo tratándose de distintas formas de energía, eso apenas corroborará, reforzará el subsumidor "conservación de energía", caracterizando, así, su aprendizaje significativo derivativo. Sin embargo, si en otra ocasión aprende que la Primera Ley de la Termodinámica es un caso particular del Principio de Conservación de la Energía, eso probablemente implicará un aprendizaje significativo correlativo, pues el subsumidor "conservación de energía" quedará más rico, más elaborado, más inclusivo. (Moreira, 1999)

Otro ejemplo, para un niño que ya tiene el concepto de mamífero, aprender que además de los gatitos, los terneros, los perritos, etc., también maman, es, probablemente, un caso de aprendizaje subordinado derivativo. Sin embargo, aprender que el murciélago y la ballena son igualmente mamíferos por cierto implicará en aprendizaje significativo correlativo.

Ausubel habla también en dos otros tipos de aprendizaje significativo, el *superordenado* y el *combinatorio*, las cuales no abordaremos aquí porque nuestra argumentación enfoca solamente el aprendizaje *subordinado*.

Consideremos un último ejemplo: el caso de los mapas conceptuales (Moreira y Buchweitz, 1993; Novak y Gowin, 1996). Normalmente, las personas encaran los mapas conceptuales como diagramas de flujo, organigramas o cuadros sinópticos. Muchos dicen: yo ya usaba mapas conceptuales hace mucho tiempo y no sabía. Ocurre que esas personas ya tienen en su estructura cognitiva un subsumidor correspondiente al *diagrama* que incluye diagramas de flujo, cuadros sinópticos, organigramas y otros tipos de diagramas. Cuando escuchan alguien decir, o leen, que mapa conceptual es un diagrama jerárquico de conceptos y relaciones entre conceptos, inmediatamente "accionan" su subsumidor *diagrama* y clasifican el mapa conceptual como un ejemplo de organigrama, diagrama de flujo o cuadro sinóptico. Las primeras tentativas de trazar un mapa conceptual resultan, casi que invariablemente, en clasificaciones de conceptos como cuadros sinópticos (algunas se asemejan a una pirámide), o diagramas de flujo. Lleva tiempo hasta que las personas perciben que se está hablando de otra cosa, con otro potencial como estrategia de aprendizaje. Algunos talvez nunca lleguen a darse cuenta esa potencialidad y continuarán entendiendo mapas conceptuales como un caso de aprendizaje subordinado derivativo de diagrama.

Con este ejemplo queremos sugerir que, aunque el aprendizaje significativo subordinado, sea, en general, tremendamente facilitador de la adquisición de nuevos significados, hay casos en que, al contrario, dificulta o impide la adquisición de nuevos significados, o el aprendizaje de nuevos materiales que impliquen la construcción de nuevos significados. Nos parece que el aprendizaje de los conceptos de la Mecánica Cuántica es uno de esos casos.

Ausubel, como ya dijimos, considera el conocimiento previo la variable independiente más importante influyendo el aprendizaje, pero no sólo facilitando, o sea, el conocimiento previo puede también inhibir o limitar nuevos aprendizajes. Según él (2000, p. 153), "en ciertas instancias del aprendizaje significativo, el desaprendizaje de pre-concepciones puede bien ser el factor aislado más determinante de la adquisición y retención de nuevos conocimientos".

## Obstáculos representacionales mentales

Usaremos aquí la epistemología de Bachelard (1971) y la idea de representación mental tomada de la Psicología Cognitiva para introducir el concepto de *obstáculo representacional mental*.

*Nociones-obstáculo* son, para Bachelard (1971, p. 72), nociones que frenan la cultura y contra las cuales debemos preveniros. Por ejemplo, la noción de corpúsculo como “un pequeño pedazo de espacio”, la noción de interacción corpuscular como “un choque de dos cuerpos” son, precisamente, *nociones-obstáculo*.

Según Bachelard, en la Física Contemporánea, un *corpúsculo no es un cuerpo pequeño*. Un corpúsculo no es un fragmento de sustancia. No tiene propiedades propiamente substanciales (op. cit., p. 62). El corpúsculo eléctrico no es un cuerpo pequeño cargado de electricidad. Un análisis lingüístico sería engañoso. El análisis filosófico usual debería ser abandonado (p. 64). No se puede atribuir dimensiones absolutas a un corpúsculo, solamente un orden de grandeza que determina más una zona de influencia de que de existencia. O, más exactamente, el corpúsculo sólo existe en el espacio en que actúa (ibid.). Correlativamente, si no se puede atribuir dimensiones al corpúsculo tampoco le podemos atribuir una forma, lo que, dicho de otra manera, significa que el corpúsculo no tiene geometría (p. 65). Pero si no podemos atribuirle una forma determinada, tampoco podemos atribuirle un lugar muy preciso.

De hecho, todo esto está de acuerdo con el principio de Incertidumbre de Heisenberg. ¿Pero cómo entenderlo? ¿Cómo entender que en la microfísica la existencia situada no tiene sentido, sin dejar de representar un corpúsculo como un cuerpo muy pequeño?. Esta representación “cosifica” el corpúsculo, o sea, le da el carácter de “cosa” con toda la carga, o exceso, de imagen que una “cosa” tiene. En el caso del corpúsculo, habría que quitar de la “cosa”, en particular, sus propiedades espaciales (p. 69).

Pero la Física Contemporánea admite que el corpúsculo pueda anularse lo que, según Bachelard, consagra la derrota del “cosismo” (p. 68). Paralelamente, otra “filosofía” que no tiene sentido en la microfísica es la del “choquismo”. La idea de choque del sentido común, también con exceso de imagen, no se aplica en el dominio atómico, por ejemplo, pues implica nociones geométricas y materialistas que no tienen sentido en ese dominio. Tratándose de partículas como los electrones, por ejemplo, la noción de “choque” no implica que haya contacto, pues sería imposible representarlas espacialmente. Es más adecuado hablar en interacción de que en choque porque hace intervenir imágenes menos definidas y es menos inexacto (p. 71).

Así, el “cosismo” y el “choquismo”, se presentan como “filosofías” poco apropiadas para describir fenómenos de la ciencia contemporánea. Son filosofías que, para Bachelard, nos esclavizan a nuestras intuiciones primarias referentes al espacio y a la fuerza (p. 72). Ideas simples como choque, reacción, reflexión material o luminosa, corpúsculo como cuerpo muy pequeño, masa como cantidad de materia deben ser revisadas. Para Bachelard, es como decir que las ideas simples deben ser complicadas para poder explicar los microfenómenos.

Bachelard considera tales ideas como *nociones-obstáculo*, pero llevando en consideración que dichas nociones están pegadas a “filosofías” como el “cosismo” y el “choquismo” o a obstáculos epistemológicos (op. cit., p. 187) como el “substancialismo” y el “animismo” tal vez sea mejor hablar en *obstáculos representacionales*. Es decir, son representaciones (internas o externas) que obstaculizan la construcción de nuevas representaciones (principalmente internas).

Representación es un concepto bastante usado tanto en el lenguaje cotidiano como en determinadas áreas de conocimiento, con significados específicos. Es el caso de la Psicología Cognitiva, particularmente la de la mente representacional computacional (Thagard, 1996). La idea es que el ser humano no capta el mundo directamente, sino que lo representa. O sea, la mente humana computa la información recibida del mundo exterior y de ese proceso resultan

representaciones de ese mundo. Análogamente a la postura de Ausubel con relación al papel del conocimiento previo en la adquisición y retención de nuevos conocimientos, argumentaremos aquí que las representaciones previas tienen un papel determinante—facilitador, inhibidor o limitador—en la construcción de nuevas representaciones.

Estamos hablando de representaciones mentales, i. e., internas, pero desde el punto de vista de la Psicología Cognitiva es usual dividir las representaciones en internas y externas, siendo estas de naturaleza pictórica o lingüística. En cualquier caso, la representación es algo que representa algo, que *está en lugar de*, que *re-presenta*, o sea, presenta otra vez alguna cosa para el sujeto.

Evidentemente nuestro concepto de *obstáculo representacional* resulta de los conceptos bachelarianos de *noción-obstáculo* o *concepto-obstáculo* y *obstáculo epistemológico* pero creemos que tales conceptos pueden pasar la idea de algo externo al sujeto, mientras que el problema parece ser, fundamentalmente, de naturaleza interna. Es decir, se trata de un obstáculo interno, o sea, mental. Esto nos lleva al concepto de *obstáculo representacional mental* o, simplemente, *obstáculo mental* que sería esa representación interna altamente estable cognitivamente, cosificada, excesivamente imagística, incuestionable semánticamente por el sujeto y presente en otros constructos mentales, estables o episódicos, del sujeto. Posiblemente esas representaciones sean los remanecientes de los orígenes perceptuales en la formación de conceptos. Como indican Goldstone y Barsalou (1998, p. 244) es posible encontrar estos vestigios para la vasta mayoría de los conceptos, aún para los conceptos abstractos. O sea, aún tratándose de conceptos que puedan ser caracterizados por abstracciones, esas abstracciones deben su existencia o su origen a la similitud perceptual a partir de la cual fueron formados.

Es el caso del corpúsculo como un cuerpo muy pequeño: que más podría ser un corpúsculo sino un cuerpo muy pequeño? O de la reflexión como choque: que más podría ser sino un choque de alguna cosa, un corpúsculo tal vez, con una superficie reflectora? Debe ser también el caso de la superposición: que más podría ser sino la yuxtaposición de dos cosas?

Es eso que significa “semánticamente incuestionable por el sujeto”; el sujeto no cuestiona el significado del obstáculo mental que construyó, aún cuando enfrenta situaciones de conflicto cognitivo. No cuestiona porque esa idea se encuentra en el origen de sus conceptos, esa información vino de su percepción y es, en ese sentido, incuestionable.

Pero no serían esos obstáculos lo mismo que los esquemas de asimilación? O serían modelos mentales? O invariantes operatorios (Vergnaud, 1990)?

Creemos que no. Posiblemente lo que llamamos de obstáculos representacionales mentales tengan identidad representacional mental – esos remanecientes perceptuales --y pueden integrar otros constructos representacionales. Es decir, esquemas de asimilación pueden contener obstáculos representacionales, así como pueden estar en los teoremas-en-acción de Vergnaud (1998) que son componentes de los esquemas de asimilación y pueden también serlo de los modelos mentales (Greca y Moreira, 2002).

Teoremas-en-acción son proposiciones consideradas como verdaderas sobre lo real (Vergnaud, 1998) y contienen conceptos que pueden ser obstáculos representacionales mentales. Imagínese, entonces, cuantas proposiciones envolviendo el obstáculo mental “corpúsculo como cuerpo muy pequeño” pueden ser consideradas válidas por un alumno sobre la realidad microscópica. Modelos mentales, en la óptica de Johnson-Laird (1983) son análogos estructurales de estados de cosas del mundo. Son modelos que el sujeto construye en la memoria de trabajo para dar cuenta de situaciones nuevas, pero pueden modificar los esquemas de asimilación o evolucionar para esquemas de asimilación (Greca y Moreira, 2002). Imagínese, entonces, cuantos modelos puede un individuo construir para determinada clase de situaciones nuevas siempre envolviendo o aplicando un cierto obstáculo representacional mental. Obviamente, tales modelos no darían cuenta de esas situaciones, en términos científicos. Además, un determinado obstáculo representacional mental podría

funcionar como núcleo de una familia de modelos mentales (Greca, 2000). El mismo obstáculo podría estar en la base de distintos modelos que el sujeto construye para diferentes situaciones nuevas. Eso significaría todas ellas mal representadas mentalmente desde el punto de vista científico.

Repitiendo, *obstáculos representacionles mentales serían representaciones mentales muy estables cognitivamente, cosificadas y excesivamente imagísticas, (posiblemente también muy antiguas en el proceso de formación de conceptos)* cuyo significado no es cuestionado, integrantes naturales de representaciones mentales más abarcadoras como los esquemas de asimilación y los modelos mentales. Creemos que siendo así, tales obstáculos son más que nociones-obstáculo o obstáculos epistemológicos, pues están en la base de la estructura representacional del sujeto.

Veamos ahora como tales ideas se aplican al aprendizaje de la Mecánica Cuántica. Aclaremos, antes, que no pretendemos probar nada. Usaremos ejemplos sacados de un estudio sobre la enseñanza y el aprendizaje de la Mecánica Cuántica introductoria en clase (Greca, 2000) sólo para apoyar, o ilustrar, nuestra argumentación sobre el papel de los obstáculos representacionales mentales en el aprendizaje de cualquier asunto; en este caso, la Mecánica Cuántica. Nuestro trabajo aquí es mucho más teórico que empírico.

## **El aprendizaje de la Mecánica Cuántica**

Creemos que muchos alumnos pasan por varios cursos de Mecánica Cuántica sin captar verdaderamente los significados de los conceptos básicos de esa área porque siempre usan los conceptos de la Mecánica Clásica como subsumidores para dar significados a los nuevos conceptos. O sea, los conocimientos de la Mecánica Clásica fuertemente arraigados en la estructura cognitiva del alumno funcionan como obstáculos representacionales mentales y hacen con que él, naturalmente, intente dar significados a los conceptos cuánticos como derivaciones o correlaciones, de los conceptos clásicos. Probablemente, este es un caso en que el aprendizaje significativo subordinado debería ser evitado. El tema es polémico dentro de la enseñanza de la Mecánica Cuántica: usar o no usar la Mecánica Clásica como apoyo? Hacer o no hacer el "puente clásico"? Veamos algunas opiniones:

### 1) Establecimiento de ligaciones con la Física Clásica

En estos trabajos se considera que parte de la dificultad para la introducción de los conceptos cuánticos deriva del hecho de que, además de ser presentada tardíamente, se tiende a enfatizar las diferencias y los contrastes con la Física Clásica, sucediendo, muchas veces, que el alumno ignore los conceptos clásicos correspondientes. Por eso, la propuesta consiste en comenzar destacando aspectos comunes entre la Física Clásica y la Moderna. Cuppari, Rinaudo, Robutti y Violino (1997), por ejemplo, consideran que es posible introducir algunos aspectos de la Mecánica Cuántica utilizando la idea de granularidad intrínseca en el espacio de fase, llegando a una acción elemental  $h$ . La idea es que los estudiantes puedan adquirir familiaridad con los límites de la Mecánica Clásica, desarrollándose los gráficos del espacio de fase hasta incluir la idea del Principio de Incertidumbre. Una evaluación parcial de esa propuesta, en un curso de nivel medio en Torino, mostró que los estudiantes no presentan dificultades para entender el movimiento en el espacio de fase y en aceptar, a escala cualitativa, la idea de granularidad. Jones (1991), que propone usar la lógica y no la historia, sugiere comenzar a partir de la teoría clásica ondulatoria, de la discusión de los modos de oscilación y de las ondas estacionarias, para introducir la noción de difracción de electrones.

## 2) Presentación de la Mecánica Cuántica sin ligaciones con los conceptos clásicos

Según esta propuesta, defendida, por ejemplo, por el grupo de la Universidad Libre de Berlín (Fischler & Lichtfeldt, 1991, 1992), es necesario evitar que los estudiantes interpreten los fenómenos cuánticos a partir de conceptos clásicos, rompiendo explícitamente con ideas anteriores y enfatizando los aspectos singulares de la descripción cuántica. Para eso se debería (Fischler & Lichtfeldt, 1992, p. 183) :

- a) evitar referencias a la Física Clásica;
- b) comenzar la unidad con electrones (y no con fotones) cuando se presenta el efecto fotoeléctrico;
- c) explicar los fenómenos observados a partir de la interpretación estadística y evitar las descripciones dualísticas;
- d) introducir el Principio de Incertidumbre lo antes posible, formulado para “ensembles” de objetos cuánticos;
- e) evitar el modelo atómico de Bohr.

Esta propuesta fue implementada en varios cursos (N = 150 alumnos). Los investigadores indican que este tipo de abordaje favorece la aparición de conflictos cognitivos que llevarán al estudiante a revisar conscientemente sus posiciones anteriores y, así, a reconstruir su conocimiento. En contraposición, los resultados de un grupo tomado como control apuntan a la incorporación de las nuevas ideas en las viejas concepciones mecanicistas.

El abordaje tradicional para la enseñanza de la Mecánica Cuántica en los cursos introductorios se caracteriza justamente por una posición semejante a la destacada en primero lugar. Con la intención de que los estudiantes adquieran familiaridad con los pocos intuitivos conceptos cuánticos, la vieja teoría cuántica -- básicamente el modelo de átomo de Bohr -- y algunos de los primeros experimentos reveladores de la estructura cuántica de los sistemas microscópicos ocupan una parte importante del tiempo destinado al asunto. Así, este abordaje hace uso (y abuso) de analogías y modelos clásicos. Aunque su finalidad sea la de permitir que los estudiantes anclen los nuevos conceptos en aquello que ya saben y, con eso, facilitar el aprendizaje, los resultados de la misma son insatisfactorios. En una investigación desarrollada por nosotros (Greca y Moreira, 1999) con estudiantes universitarios de cursos de Ingeniería que tuvieron clases con ese abordaje durante una asignatura de Física General fue posible recoger evidencias que los mismos atribuyen a los conceptos cuánticos significaciones derivadas de la Física Clásica, impidiéndoles aprender significativamente los nuevos contenidos. Por ejemplo, al final de la disciplina, la mayoría de los estudiantes continuaba pensando el electrón como una pequeña bolita que recorría trayectorias definidas (en algunos casos, expresaban que la trayectoria recorrida era la función de onda asociada). Esta idea de electrón como “cosa”, que coincide con la consideración del electrón como partícula del tipo clásico y que es reforzada por el modelo atómico de Bohr, les impidió aprender conceptos centrales de la Mecánica Cuántica como la dualidad onda-partícula y el Principio de Incertidumbre, funcionando, por lo tanto, como obstáculo representacional mental. Así, ninguno de los estudiantes consiguió utilizar o explicar el Principio de Incertidumbre de forma adecuada, aparentemente limitándose el aprendizaje del mismo a una memorización de su expresión matemática. Es interesante destacar que resultados semejantes, o sea, una lectura clásica de los conceptos cuánticos, fueron también obtenidos con estudiantes de un curso de Física que habían cursado asignaturas más avanzadas sobre estos tópicos. O sea, parecería que asignaturas posteriores, más técnicas, no consiguen modificar los significados atribuidos en los cursos introductorios. Resultados de otras investigaciones desarrolladas en diferentes

partes del mundo apuntan en el mismo sentido (p. ej., Niedderer et al., 1990; Johnston et al., 1998; Ambrose et al., 1999).

Dado que el establecimiento de ligaciones con los conceptos que los estudiantes ya poseen no parece ser una buena alternativa, consideramos que una estrategia viable es la de intentar que los estudiantes adquieran los nuevos conceptos utilizando las mismas estrategias que son usadas en los primeros años de vida, o sea, la formación de conceptos. Para eso, desenvolvimos un abordaje, que denominamos de fenomenológico - conceptual, enfatizando las características cuánticas de los sistemas en vez de buscar analogías clásicas (Greca y Herscovitz, 2002). El núcleo de la propuesta es la presentación de numerosos fenómenos, que deben ser suficientemente simples, y dirigidos de forma tal que la esencia de los conceptos fundamentales que diferencian la fenomenología cuántica de la clásica sea evidente. O sea, la propuesta visa presentar de forma directa los conceptos cuánticos más relevantes, sin la pavimentación del camino con los abordajes semi-clásicos. Con esto, se pretendió que los estudiantes aprendiesen a percibir los fenómenos a partir de la lectura que la Mecánica Cuántica hace de ellos, de forma semejante a como se enseña a los niños a percibir las propiedades de los objetos según nuestra cultura, intentando de esta forma evitar la confrontación con los obstáculos representacionales mentales antes señalados.

Con esta perspectiva, implementamos durante 1999, una experiencia en tres grupos de la asignatura de Física General del 4º semestre de curso de Ingeniería de la UFRGS (N=95), con la colaboración de los profesores regulares de esos grupos. El proyecto, desarrollado en el tiempo típico destinado a esta parte de la asignatura en estos cursos (24 horas-aula), incluyó los siguientes temas: computación cuántica, experiencia de interferencia de Young para sistemas cuánticos, principio de incertidumbre, experiencia de Stern-Gerlach y sistemas de dos estados, superposición lineal de estados, resultados de mediciones, distribución de probabilidades, ecuación de Schrödinger, problemas simples de autovalores (pozos y barreras de potencial), tunelamiento y microscopio electrónico de barradura, átomo de hidrógeno, espectros y saltos cuánticos, paradoja del gato de Schrödinger, mediciones sin interacción con el objeto, teleportación y pasaje al mundo macroscópico (teoría de la descoerencia). La estructuración del curso fue del tipo espiral: luego de la tercer clase todos los conceptos fundamentales seleccionados (estado -- función de onda --, principio de incertidumbre, superposición lineal de estados, resultados de mediciones, distribución de probabilidades) ya habían sido presentados a los alumnos, siendo en cada nueva clase retomados en la "lectura" de los nuevos fenómenos. Por ejemplo, en el caso de la experiencia de Stern-Gerlach (seleccionada porque permite describir sistemas de dos estados fácilmente) fue utilizada no sólo para presentar el concepto de spin, como lo es generalmente, sino que con base en ella discutimos el principio de superposición, observables incompatibles y el problema de la medida. Los otros temas fueron tratados, siempre que fuese posible, de la misma forma.

Para conseguir una interacción significativa, durante todo el período, la metodología de clase fue la del trabajo en pequeños grupos (cada grupo siendo formado por tres o cuatro alumnos), que se mantuvieron más o menos los mismos a lo largo del proyecto. Al inicio de cada periodo de dos horas-aula cada alumno recibía un texto especialmente elaborado sobre el tema de la clase (Greca, 2000). Estos textos contenían, además, una relación de preguntas conceptuales y de pequeños problemas con los cuales los alumnos debían trabajar en clase. Los profesores responsables por las clases respondían las preguntas de los alumnos y hacían preguntas dirigidas para mejorar la comprensión de los temas desarrollados. Los ejercicios resueltos eran recogidos al final de cada clase y constituyeron el principal instrumento de evaluación formal de los estudiantes en esta área de la asignatura.

En las notas de clase y durante las discusiones con los estudiantes se evitó hacer referencias que pudiesen ser interpretadas como énfasis a los modelos clásicos de partícula u ondulatorio. Por el contrario, fue enfatizada la idea de tratar los sistemas cuánticos como



"objetos cuánticos"<sup>3</sup> (siendo esta la terminología utilizada en los textos), como propuesto en varias obras, como la de Braginsky & Khalili (1992), mostrando las diferencias de comportamiento de estos objetos en relación con los conocidos del mundo macroscópico. Siempre que fue posible, se habló de objetos cuánticos en general, sin discriminar entre los distintos objetos. Con el mismo espíritu de "generalización" fueron introducidos en la discusión otros observables además de la energía. En resumen, la preocupación dominante en las clases fue la de presentar los fenómenos, incentivando a los estudiantes, a través de las preguntas propuestas y de las discusiones, a (re)crear su percepción.

A modo de ejemplo, presentamos uno de los textos utilizados (Ver Apéndice). Este texto sobre el tema de la computación cuántica fue usado como elemento motivador para el inicio de las clases: además de su actualidad las posibles ventajas que traería este tipo de computación pueden ser percibidas rápidamente por los estudiantes, bastante acostumbrados con la computación clásica. Pero, sobre todo, es un tema en que están en juego los principios fundamentales que fueron el eje de nuestra propuesta y donde claramente el mundo microscópico se muestra diferente del clásico. El texto introduce, ya en la primera clase, la cuestión de la superposición lineal de estados y el carácter probabilístico de los resultados de las mediciones efectuadas sobre sistemas microscópicos. Es, por lo tanto, un ejemplo marcante, que resalta, de modo relativamente simple de ser explicado, todo el "exotismo" del tratamiento cuántico de los fenómenos.

Los resultados obtenidos al final de la implementación (Greca, Moreira y Herscovitz, 2001; Greca y Herscovitz, 2002; Greca y Freire Jr., 2003) indican que más del 60% de los estudiantes participantes parecieron conseguir atribuir los significados científicamente aceptados, para este nivel de instrucción, para la mayoría de los conceptos cuánticos presentados (dualidad onda-partícula, Principio de Incertidumbre, carácter probabilístico de los resultados de medida y superposición lineal de estados). Estos estudiantes consiguieron presentar explicaciones razonables para fenómenos microscópicos a partir de conceptos cuánticos fundamentales y establecer asociaciones significativas entre estos conceptos. También consiguieron medias superiores, estadísticamente significativas, en relación con otros grupos tomados de control<sup>4</sup>, que recibieron instrucción en el abordaje tradicional, en tres preguntas propuestas que envuelven los principios cuánticos fundamentales.

## Conclusión

La intención de este trabajo fue la de sugerir que, aunque como adultos aprendamos esencialmente por asimilación de conceptos, en el sentido ausubeliano, hay casos en que la asimilación puede impedir la adquisición de nuevos significados. Es decir, dificulta la percepción de lo que hay de nuevo en los materiales de aprendizaje. En estos casos parece necesario que la estrategia didáctica conduzca directamente a los estudiantes a tornar significativos los nuevos conceptos. Caravita (2001, p. 425) comentando resultados de algunas estrategias didácticas para el cambio conceptual enfatiza justamente que muchas de las estrategias resultan exitosas porque *"los estudiantes toman de la intervención didáctica información sobre la cual no eran conscientes antes de ella, y la aceptan y creen en ella. La revolución puede ser vista en las consecuencias de esta aceptación: el nuevo conocimiento da a los estudiantes nuevas perspectivas sobre hechos que potencialmente les permiten nuevas*

---

<sup>3</sup> La noción de "objeto cuántico" que utilizamos no se identifica con la noción de "cuanton" defendida por algunos autores como M. Bunge (d'Espagnat, 1990). Para una discusión de la interpretación de la Mecánica Cuántica utilizada en la propuesta aquí reseñada ver Greca y Freire Jr. (2003).

<sup>4</sup> Los grupos de control fueron un grupo de estudiantes de la misma asignatura y otro de la asignatura Introducción a la Mecánica Cuántica, del curso de Física, que trata temas introductorios durante un período de tiempo tres veces superior.

*formas de procesar la información, o de tomar la información del medio*". El caso de la Mecánica Cuántica parece ser un buen ejemplo de que los adultos no sólo son capaces de formar conceptos, como es típico de los niños, sino que también en algunos casos *deben* formar (y no asimilar) conceptos para captar los significados correctos de los nuevos conocimientos. Eso significa que en tales casos el aprendizaje significativo subordinado debería ser evitado. Debería haber un desaprendizaje, en el sentido de no usar el conocimiento previo.

Además del referencial ausubeliano nos apoyamos también en la epistemología de Bachelard, en particular en la idea de noción-obstáculo, y en la Psicología Cognitiva contemporánea para introducir el concepto de *obstáculo representacional mental*. Argumentamos, entonces, que algunos conocimientos previos funcionan como obstáculos de esa naturaleza y al integrar modelos mentales y esquemas de asimilación que el sujeto construye para dar cuenta de situaciones nuevas o conocidas, impiden, casi que definitivamente, captar significados que permitan el aprendizaje significativo de determinados conceptos o situaciones como, por ejemplo, las de la Mecánica Cuántica que usamos para apoyar nuestra argumentación.

## **Bibliografía**

Ambrose, B., Shaffer, P. Steinberg, R., McDermott, L. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67(2): 146-155.

Ausubel, D.P. (1968). *Educational psychology - a cognitive view*. New York: Holt, Rinehart and Winston, Inc.

Ausubel, D.P. (2000). *The acquisition and retention of knowledge. A cognitive view*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Ausubel, D.P., Novak, J.D. E Hanesian, H. (1980). *Psicologia educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana.

Bachelard, G. (1971). *Epistemología*. Barcelona: Editorial Anagrama.

Bachelard, G. (1991). *A filosofia do não*. Lisboa: Editorial Presença.

Braginsky, V. B., Khalili, F. Y. (1992) *Quantum measurement*. Cambridge: Cambridge University Press.

Cuppari, A.; Rinaudo, G.; Robutti, O., Violino, P. (1997). Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. *Physics Education*. 32(5): 302-308.

Espagnat, B. D' (1990) *Penser la science ou les enjeux du savoir*. Paris: Gauthier-Villars.

Fischler, H. Lichtfeldt, M. (1991). Learning Quantum Mechanics. In: International Workshop In Research In Physics Learning Theoretical Issues And Empirical Studies, Bremen, p. 240-258.

Fischler, H. Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2): 181-190.

Goldstone, R. L., Barsalou, L. W (1998). Reuniting perception and conception. *Cognition*, 65:231-262.

Greca, I. M. (2000) *Construindo significados em Mecânica Quântica : resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de Física Geral*. Tese de doutoramento. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS.

Greca, I. M., Freire Jr, O. (2003) Does the emphases in the concept of quantum states enhance students understanding of quantum mechanics?. *Science & Education*, In press.

Greca, I. M., Herscovitz, V. E. (2002) Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(2): 327-338.

Greca, I., Moreira, M.A. (1999). O que estão entendendo estudantes universitários nas aulas de Mecânica Quântica? Atas (CDROM) do II ENPEC. Moreira, M.A. (Org.), Valinhos, SP.

Greca, I. M., Moreira, M. A. (2002). Além da detecção de modelos mentais dos estudantes: uma proposta representacional integradora. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(1). <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>

Greca, I. M., Moreira, M. A., Herscovitz, V. E. (2001) Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 1(23): 444-457.

Johnston, I., Crawford, K., Fletcher, P. (1998). Students' difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*. 20(4): 427-440.

Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental Models*. Cambridge, M. A.: Harvard University Press.

Jones, D. (1991). Teaching modern physics - misconceptions of the photon can damage understanding. *Physics Education*, 26: 93-98.

McDermott, L. C., Shaffer, P. S., Rosenquist, M. L. (1996) *Physics by inquiry*. v.1. New York: John Wiley,

Moreira, M.A., Buchweitz, B. (1993). *Novas estratégias de ensino e aprendizagem: os mapas conceituais e o Vê epistemológico*. Lisboa: Plátano Edições Técnicas.

Moreira, M.A. (1999). *Aprendizagem significativa*. Brasília: Editora da UnB.

Niedderer, H. Alternative framework of students in mechanics and atomic physics; methods of research and results. In: 2nd International Seminar On Misconceptions And Educational Strategies In Science And Mathematics, 1987, Cornell. NOVAK, J. (Ed.) *Proceedings...* Cornell, Cornell University Press, 1987. CD-ROM.

Novak, J.D., Gowin, D.B. (1996). *Aprender a aprender*. Lisboa: Plátano Edições Técnicas.

Thagard, P. (1996). *Mind: Introduction to Cognitive Science*. Cambridge, Mass., MIT Press.

Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10 (23):133-170.

Vergnaud, G. (1998). A comprehensive theory of representation for mathematics education. *Journal of Mathematical Behavior*, 17(2):167-181.

## ANEXO

### COMPUTACIÓN CUÁNTICA

#### 1.1 Introducción a la computación cuántica

Las computadoras que existen actualmente parecen estar llegando a sus límites de eficiencia. Por un lado, algunas razones tecnológicas no permiten que sus *chips* sean disminuidos de tamaño indefinidamente<sup>5</sup> y, por otro lado, debido a motivos prácticos, fabricar *microchips* más poderosos puede tornarse inconvenientemente caro. Por estas y otras razones es importante encontrar salidas alternativas. Una de las halladas es la denominada computación cuántica<sup>6</sup>, uno de los temas de gran impacto científico de los últimos tiempos<sup>7</sup>.

A pesar de que todavía no se sabe con certeza si un computador cuántico podría ser construido, es importante discutir sus posibilidades ya que las mismas están estrechamente enlazadas con los principios fundamentales de la mecánica cuántica.

#### 1.2 Computación clásica versus computación cuántica

En general, estamos acostumbrados a pensar en la computación en términos de operaciones matemáticas y no en términos físicos. No obstante, efectuar una operación de computación es esencialmente un proceso físico. Piénsese, por ejemplo, cómo es hecha, en un computador, una cuenta simple como la suma de  $2 + 5$ . Los registros 2 y 5 son, en principio, abstractos y, antes de efectuar cualquier operación con ellos, deben ser codificados en un sistema físico concreto. Tal operación puede ser hecha de muchas maneras, dependiendo del dispositivo de computación escogido: diferencias de potenciales en las puertas de un transistor de un *microchip* de silicio, cuentas en las columnas de un ábaco, impulsos nerviosos en las sinapsis de una neurona, etc.

La computación en sí consiste en un conjunto de instrucciones (o algoritmos) que son desarrollados por medio de un proceso físico. La ejecución del algoritmo lleva a un resultado<sup>8</sup> que interpretamos, en nuestro ejemplo, como el número 7. Entonces, mientras  $2 + 5 = 7$  puede ser definido de manera abstracta, el proceso práctico que nos lleva a concluir que dos más cinco es igual a siete, es físico. Todos los tipos de computadoras con las cuales el hombre está acostumbrado a trabajar, desde el ábaco hasta las supercomputadoras, están organizadas según las leyes de la física clásica. No obstante, bien podemos decir que vivimos en un mundo cuántico y los *objetos cuánticos* se comportan de forma bastante diferente de los *objetos clásicos* en múltiples aspectos. Por ejemplo, un sistema cuántico puede existir en una combinación de múltiples estados físicos con características bien definidas simultáneamente, la que es llamada superposición de estados. Esto podría permitir un escenario en que cada estado siguiese un proceso de computación diferente y que los mismos confluyesen para producir el resultado final. Este "paralelismo cuántico", que podría ser alcanzado en una sola

---

<sup>5</sup> Por ejemplo, no tiene sentido pretender fabricar transistores más delgados que los átomos que los constituyen.

<sup>6</sup> Este texto está basado en los siguientes artículos, los cuales Usted puede consultar para adquirir más información sobre computación cuántica: (a) "Quantum physics and computers", de Adriano Barenco, *Contemporary Physics*, de 1996 [volumen 37, n. 5, pp. 375-389]; (b) "Quantum computing with molecules", de Neil Gershenfeld y Isaac Chuang, *Scientific American*, de 1998, pp. 50-55; (c) "Quantum computing", de Valerio Scarani, *American Journal of Physics*, de 1998 [volumen 66, n. 11, pp. 956-960].

<sup>7</sup> El primer trabajo completo sobre la posibilidad de usar la computación cuántica en vez de la clásica fue publicado por David Detusch en 1985, pero recién en 1994 el físico Peter Shor mostró que la idea podría funcionar.

<sup>8</sup> Un resultado que podemos observar, por ejemplo, en la pantalla de una computadora.

pieza del *hardware* podría darles a las computadoras, en hipótesis, una velocidad mucho mayor que las alcanzadas por los computadores actuales.

Algunos problemas actuales, como el de la factorización de números<sup>9</sup> con decenas y hasta centenas de dígitos, ante el cual hoy, las supercomputadoras más veloces demorarían millones de años<sup>10</sup>, podrían, en principio, ser resueltos en períodos del orden de un año. Para ilustrar esos tiempos, piénsese que una computadora hipotética que alcanzase a resolver  $10^{10}$  divisiones por segundo tardaría: 1 segundo para factorizar un número de 20 dígitos, 1 año para factorizar un número de 34 dígitos y, si se le diera un número de 60 dígitos, ese computador demoraría  $10^{17}$  segundos, un lapso superior a la edad del universo. Con esto, en contrapartida, disminuiría la seguridad de las llaves actuales de los *criptosistemas*, los cuales dependen en gran medida de esas operaciones de factorización.

### 1.3 La célula de la computación cuántica (CUBIT)

En la computación clásica, el estado de una unidad de información, el *bit*, está determinado por un número: 1 o 0. Cualquier símbolo (sea un número o una palabra), en la computación clásica, es representado por una cadena de algoritmos de 1 y 0. En cambio, el “*bit* cuántico” o *cubit*, puede ser representado, por ejemplo, por un átomo en uno de sus posibles autoestados de energía. Podemos llamar como 1 y 0 a cada uno de esos estados. Así, dos cubits pueden estar en cuatro estados bien definidos, a saber

(0,0), (0,1), (1,0) y (1,1),

como cualquiera dos bits clásicos. No obstante, a diferencia de los bits clásicos, cada cubit puede existir también en estados que comprenden simultáneamente aquel que llamamos 0 y aquel que llamamos 1. Este es un fenómeno intrínsecamente cuántico denominado superposición de estados. En otras palabras, mientras clásicamente un bit existe como 1 o 0, cuánticamente un cubit puede existir como 1 y 0.

Lo presentado es en cuanto a los estados posibles de un cubit, ahora veamos qué podemos decir en términos de las operaciones posibles. En cuanto al resultado de una determinada operación de computación cuántica, en el momento en que procuremos saber cuál es ese resultado, obligaremos al cubit a responder en un estado definido de energía. Conocer el resultado del cómputo es hacer una medición, sobre una unidad de procesamiento. La probabilidad de que, hecha esa medición, el cubit se encuentre en el estado 1 o en el estado 0, está dada por un coeficiente numérico. Es decir, en cuanto no es hecha una medición, el cubit puede estar en una superposición de estados 1 y 0, pero en el momento en que se busca saber el resultado del proceso de computación, en el momento en que se efectúa la medición, el cubit responde apenas en uno de aquellos estados. Allí reside la potencia de la computación cuántica: un cubit puede existir en varios estados al mismo tiempo e informar sobre todos ellos. Con esto es posible, en principio, realizar muchas operaciones en paralelo, usando solamente una unidad de procesamiento. Además de lo dicho, en la computación clásica, el procesamiento de la información es hecho a través de operaciones lógicas. Una de ellas es la operación NO, que niega el estado del sistema, es decir, si el sistema estaba en el estado 1 pasa al estado 0 y, si estaba en el estado 0 pasa al estado 1. En la computación cuántica, además de esta operación se pueden tener otras que tienen contrapartida clásica, como aquella

<sup>9</sup> Se trata de la transformación de un número en un producto de sus factores primos.

<sup>10</sup> Incluso están uniéndose supercomputadoras en forma cooperativa en diversas partes del mundo, para encarar este desafío.

que permite transformar un estado 0 en una superposición de estados 0 y 1. El estado de un cubit puede ser denotado de la siguiente manera:

$$|cubit\rangle$$

que evoca la notación característica de la mecánica cuántica. De esta manera, el estado de un cubit puede escribirse, según hemos dicho más arriba, como

$$|cubit\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle,$$

una ecuación en la que  $|cubit\rangle$  significa “el estado de la unidad de procesamiento”, mientras que  $C_0$  y  $C_1$  son dos coeficientes que originan las probabilidades<sup>11</sup> de, una vez efectuada una medición, el cubit indicado se halle en el estado  $|0\rangle$  o en el estado  $|1\rangle$ . El estado del cubit, luego de la medición, será

$$|cubit\rangle = |0\rangle$$

o bien

$$|cubit\rangle = |1\rangle$$

y no más

$$|cubit\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle.$$

La cuestión de que antes de efectuar una medición el cubit (es decir, la unidad de procesamiento) pueda estar en una superposición de dos estados y que luego, después de la medición, el cubit esté en un sólo estado de energía resulta lo que en mecánica cuántica se denomina el problema de la medida.

*¿Por qué se dice que es un problema?* Clásicamente, al medir una cierta propiedad de un sistema, por ejemplo, el momento lineal del sistema, el valor obtenido es el del estado en el cual el sistema se encontraba antes de la medición. En la mecánica cuántica, la frecuencia del resultado de la medida de una propiedad del sistema está probabilísticamente relacionada con el estado en el cual el sistema se encuentra antes de la medición. Veamos un ejemplo para un sistema de dos cubits. Supongamos que ese sistema se halle en un estado denotado como

$$|?\rangle$$

y que puede escribirse de la siguiente manera:

$$|?\rangle = (1/2)^{1/2} [|0\rangle + |3\rangle],$$

siendo  $|0\rangle$  y  $|3\rangle$  son denominados los autoestados del sistema. Además, en este ejemplo, los coeficientes  $C_0$  y  $C_1$  son idénticos, es decir,  $C_0 = C_1 = (1/2)^{1/2}$ .

Si se expresa  $|0\rangle$  y  $|3\rangle$  en código binario, esto es

$$|0\rangle = |0\rangle|0\rangle$$

$$|3\rangle = |1\rangle|1\rangle$$

entonces el estado del sistema,  $|?\rangle$ , puede escribirse de la siguiente manera:

$$|?\rangle = (1/2)^{1/2} (|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle).$$

---

<sup>11</sup> Es decir  $C_0^2$  y  $C_1^2$ .

donde  $(1/2)^{1/2}$  es el valor de uno de los dos coeficientes  $C_0$  y  $C_1$  que conducen, ambos, a la probabilidad  $(1/2)$  de que el sistema esté en uno de sus dos autoestados.

Supongamos también que nuestra forma de medir sea escuchar los “clics” de los detectores; más específicamente:

- un detector, digamos, superior, que suena para el estado  $|1\rangle$
- un detector, inferior, que suena para el estado  $|0\rangle$

Para el estado considerado “arriba”, el resultado de la medición será, con igual probabilidad, escuchar dos “clics” en el detector superior o dos “clics” en el detector inferior. No escucharemos un “clic” en el detector superior o un “clic” en el detector inferior, o viceversa.

Combinando la propiedad de superposición de estados con otras, es posible demostrar que un computador cuántico podría resolver el problema de la factorización, o sea, hallar los factores primos de un número, de forma mucho más rápida que cualquier otro computador clásico. A pesar de todas sus posibilidades, la realización experimental de un computador cuántico todavía no es factible. De hecho, para ejecutar un cómputo, es preciso mantener la superposición de estados a lo largo de todo el proceso de cálculo. El problema es que esto no es una tarea fácil. Por una propiedad llamada descoherencia<sup>12</sup>, la superposición de los estados cuánticos se desvanece muy fácilmente, ya que cualquier interacción del sistema físico con el medio, por ejemplo, una colisión de un átomo con otro átomo, puede llevar al sistema a “optar” por uno sólo de los estados inicialmente superpuestos. Para lograr la computación cuántica, los científicos deberán luchar contra ese fenómeno, entre otros problemas. Entonces, hemos visto que propiedades muy diferentes a las clásicas (para nosotros absolutamente nuevas) acontecen en el mundo microscópico descrito por la mecánica cuántica y que esas propiedades pueden ser tecnológicamente muy importantes<sup>13</sup>. Es útil resaltar que todavía no se sabe bien cómo construir un computador cuántico, las ideas de computación cuántica muestran que hay una fuerte ligación entre computación y física cuántica. Esto puede ayudar a los científicos e ingenieros del área, a resolver algunos problemas con los que se encuentran al proyectar *microchips* convencionales de reducido tamaño, ya que adentrarse en el mundo microscópico es introducirse en el régimen de la mecánica cuántica.

### Actividades sugeridas:

- (a) Escriba en código binario los autoestados  $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle$  y  $|3\rangle$ , relativos a conjuntos de dos cubits.
- (b) En el ejemplo del texto, ¿por qué no es posible escuchar un “clic” en el detector superior y un “clic” en el detector inferior, o viceversa?
- (c) De un ejemplo, en código binario, de los estados de dos cubits en que es posible escuchar un “clic” en el detector superior y un “clic” en el inferior. En su ejemplo: ¿cuál es la probabilidad de que el sistema esté en el estado  $|2\rangle$ ?
- (d) Muestre que tres cubits pueden estar en ocho ( $2^3$ ) estados bien definidos. Consecuentemente,  $n$ -cubits pueden estar en  $2^n$  estados, es decir,  $n$ -operaciones elementales pueden generar  $2^n$  situaciones distintas. ¿Cuál es la importancia de esto para la factorización?
- (e) Relacione y discuta las propiedades cuánticas citadas en el texto y en qué son diferentes a las que Usted conoce de la física clásica.

<sup>12</sup> Esta propiedad, además, impide que se pueda observar la superposición de estados en una escala macroscópica.

<sup>13</sup> En el caso ejemplificado, para mejorar nuestros actuales sistemas de procesamiento.