

Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media: análisis de los aspectos afectivos de los estudiantes

Teaching quantum mechanic at level school: analysis of students affective aspects

Maria de los Ángeles Fanaro (1)

mfanaro@exa.unicen.edu.ar

María Rita Otero (2)

rotero@exa.unicen.edu.ar,

⁽¹⁾ NIECyT- Departamento de Formación Docente- UNCPBA, Argentina

⁽²⁾ CONICET, Argentina.

RESUMEN

Presenta resultados de una investigación en Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media¹. Desde referenciales didácticos y cognitivos se diseñó e implementó una secuencia de situaciones dirigidas a reconstruir sus conceptos y principios fundamentales, buscando conocer su viabilidad y adaptabilidad. La secuencia no sigue el enfoque tradicional, comienza y termina con la Experiencia de la Doble Rendija, produciendo la emergencia del comportamiento cuántico. La experiencia se analiza con proyectiles cuya masa se va reduciendo sucesivamente hasta llegar a los electrones. Se considera al electrón como el sistema cuántico más simple adaptando el enfoque Caminos Múltiples de Feynman para su estudio, utilizando software de simulación. Ya fueron analizados resultados relativos a la conceptualización. Se describen y analizan aspectos afectivos de los estudiantes, en base a la dinámica emocional del grupo, y sus sentimientos. Se establecen relaciones entre la conceptualización alcanzada y los aspectos afectivos implicados.

Palabras clave: *Mecánica cuántica; escuela media; dinámica emocional; sentimientos; conceptualización*

1 La tesis se realizó en el marco del Doctorado Internacional en Enseñanza de las Ciencias de la Universidad de Burgos, UBU, España, en convenio con la, UFRGS, Brasil bajo la dirección del Dr. Marco Antonio Moreira y la Dra. María Rita Otero

ABSTRACT

Researches on Quantum Mechanic at high school level are presented. From didactic and cognitive referential a sequence of situations was designed and implemented to reconstruct concepts and fundamental principles, looking for to know the viability and adaptability of the sequence. The sequence does not follow the traditional approach, it start and finish with the Double Slit Experience producing the emergence of the quantum behavior. The experience is proposed with projectiles which mass is reduced progressively to electrons. The electron is considered the simplest quantum system, and the approach Feynman's Multiple Paths is adapted using simulation software. The results about conceptualization were analyzed already, and now the affective aspects of the students are described. The analysis is based on the emotional dynamic of the class group and students's feelings. Relationship between the achieved conceptualization and the affective aspects involved are established.

Keys words: *Quantum mechanics; school happens; emotional dynamics; feelings; conceptualization*

INTRODUCCIÓN

Este trabajo forma parte de una investigación sobre la enseñanza de nociones fundamentales de Mecánica Cuántica en la Escuela Media. (Fanaro, 2009). Se elaboró una secuencia didáctica para estudiantes del último año de la escuela secundaria y se implementó en un curso de treinta estudiantes. La propuesta es alternativa a la tradicional que se encuentra en los libros de texto, y no tiene una estructura estrictamente histórica (Fanaro y otros, 2007a). La investigación en su totalidad analiza la viabilidad y adaptabilidad de la propuesta a partir de las acciones de los estudiantes y aporta a la comprensión del proceso de construcción de conocimiento en el aula (Fanaro, 2009).

La secuencia completa comienza y termina con la Experiencia de la Doble Rendija (EDR), porque ésta permite dar sentido a la formulación probabilística que explica los resultados – de otro modo “inexplicables” – de la distribución de electrones. La distinción fundamental entre el comportamiento de las partículas clásicas y de los sistemas cuánticos se

plantea en las situaciones posteriores, cuando se realiza el cálculo de probabilidades para partículas libres y electrones libres utilizando la técnica “Camino Múltiple” de Feynman (Arlego, 2008) en un marco geométrico-vectorial, adaptado al conocimiento de los estudiantes (Fanaro y otros, 2007b). Luego, los resultados se aplican al cálculo de probabilidades de la EDR, y se encuentra la expresión matemática que explica la curva de probabilidad, tanto para electrones como para bolillas. Esto conduce a colocar a la constante de Planck en un lugar privilegiado, pues es la relación entre dicha constante y la masa, lo que decide si se distinguen los efectos cuánticos o no.

En la Figura 1 se presentan los conceptos y principios clave de la secuencia.

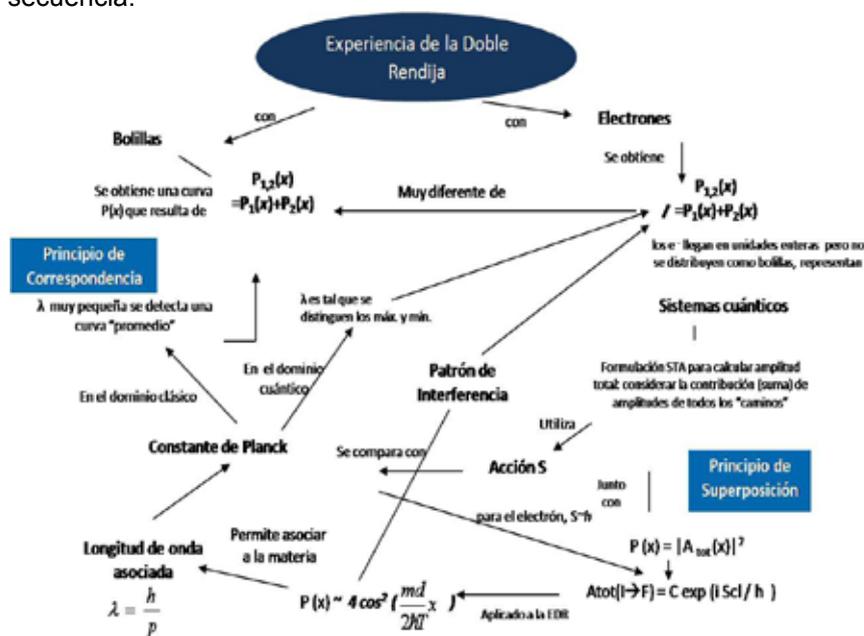


Figura 1. Conceptos y Principios a ser enseñados (Fanaro, 2009)

La viabilidad de la propuesta se analizó a partir del estudio del proceso de conceptualización y de los aspectos afectivos de los estudiantes, utilizando distintos instrumentos durante el desarrollo de las situaciones

y al finalizar la implementación. La conceptualización se analizó a partir de los protocolos de las conversaciones de los estudiantes y de sus producciones escritas durante el desarrollo de las situaciones. Utilizando la teoría de Vergnaud (1990), se identificaron los invariantes operatorios que posiblemente fueron “llamados” en la interacción con cada situación (Fanaro y Otero, 2009b). Al finalizar la implementación, los estudiantes realizaron un test escrito; el análisis de las acciones de los estudiantes en esta instancia, contribuyó a interpretar y comprender la conceptualización. (Fanaro y Otero, 2009a).

Con los mismos protocolos de las conversaciones, se analizaron los aspectos afectivos de los estudiantes al abordar las situaciones. Al finalizar la implementación los estudiantes respondieron un cuestionario diseñado para el grupo, de preguntas cerradas, y una abierta. Esto permitió analizar las opiniones de los estudiantes acerca de sus sentimientos respecto a la naturaleza de los conceptos cuánticos estudiados, a la forma de trabajo propuesta y a las simulaciones utilizadas en la secuencia (Fanaro y Otero, 2008).

En este trabajo se presentan la descripción de la dinámica emocional de los estudiantes a partir de los protocolos de sus conversaciones durante la primera etapa de la implementación, se trianguló con la descripción de los sentimientos de los estudiantes al finalizar la implementación, y con la conceptualización alcanzada. Se busca analizar la vinculación entre la viabilidad de la propuesta, la conceptualización alcanzada y los aspectos emocionales-afectivos de los estudiantes del grupo de clase.

También, se adoptaron los lineamientos de la Didáctica de Base Emocional desarrollada por Otero (2006; 2007; 2008) que adopta e integra referenciales de base biológica-emocional para comprender y analizar los procesos de reconstrucción del conocimiento basada en las ideas de Maturana y de Damasio a partir de una epistemología constructivista.

Es común que los términos emoción y sentimiento sean utilizados indistintamente para referirse a los afectos en general. Sin embargo el

marco teórico los distingue entendiendo las emociones en un sentido biológico, referidas al dominio de acciones en el cual un organismo vivo se mueve. Según Maturana *“las emociones son disposiciones corporales dinámicas que especifican el dominio de acciones de las personas y de los animales”* (Maturana, 2001:16). No hay una acción humana, sin una emoción que la fundamente y la haga posible. Por ejemplo, bajo la emoción del miedo, nuestro dominio -conjunto de posibilidad- de acciones, es congruente con dicha emoción, y entonces las acciones serán huir, o atacar, en acuerdo con la respuesta psicofisiológica de aumento de la frecuencia cardíaca, y facilitación de los reflejos de defensa.

Las emociones son funcionales a un complejo sistema de regulación vital, y están dirigidas a evitar los peligros, a ayudar al organismo a sacar partido de una oportunidad, o indirectamente a facilitar las relaciones sociales. Ellas modifican el estado del cuerpo de una manera que puede o no manifestarse a simple vista; son automáticas aunque en ciertos casos modulables, y no necesariamente se tiene plena conciencia de sus consecuencias una vez que se disparan. Desde un punto de vista biológico, las emociones están al servicio del organismo, de su bienestar y supervivencia.

Los sentimientos, según los define Antonio Damasio, neurobiólogo que destaca el papel de las emociones en el pensamiento humano, *“son la percepción de un determinado estado del cuerpo junto con la percepción de un determinado modo de pensar y de pensamiento con determinados temas”*. Es decir, los sentimientos son entendidos como una representación del cuerpo implicado en un estado reactivo, aunque esta representación no es necesariamente la que estrictamente se está dando al nivel del cuerpo, porque las regiones cerebrales de sensación corporal pueden ser afectadas por otras, de manera tal que nuestro sentimiento conciente, no se corresponda siempre con el estado corporal real (Otero, 2006). Es decir, los sentimientos están precedidos por emociones experimentadas por el organismo (Damasio, 2005:34). Evolutivamente, los mecanismos cerebrales que sustentan las respuestas emocionales se formaron antes que los que sostienen a los sentimientos.

Para tener sentimientos se requiere de un organismo que además de poseer un cuerpo, tenga un medio de representar dicho cuerpo en su interior, es decir, tenga un sistema nervioso. Por ejemplo las plantas, no pueden hacer eso, puesto no tiene un sistema nervioso por que no son capaces de cartografiar los estados corporales en patrones neurales y transformarlos en representaciones mentales. Pero también, se necesita que el sentimiento sea conocido por el organismo, es decir se requiere conciencia, si bien la relación entre sentimiento y conciencia no es directa ni sencilla, parece difícil sentir sin tener conciencia de ello.

Emociones y sentimientos son fundamentales en las relaciones sociales y en la toma de decisiones que requiere la vida social, es decir en el razonamiento. Las emociones positivas o negativas y los sentimientos que de ellas se siguen, están directamente implicados en nuestras experiencias sociales. En la formulación didáctica adoptada aquí, que considera a las emociones, los sentimientos y los razonamientos, se proponen ocho *Principios Didácticos* (Otero, 2008 p. 8-12) entre los cuales en este trabajo interesan los cuatro siguientes:

Principio de aceptación del otro

La constitución de un espacio relacional de convivencia requiere que cada uno de sus miembros acepte la legitimidad del otro como un legítimo otro en la convivencia (Maturana, 1995). Esta aceptación origina acciones contrarias a la negación del otro. Tal dinámica emocional es indispensable para reconstruir un dominio de conocimiento, cuya base es la aceptación de determinadas acciones como válidas. En esta dinámica de aceptación, todos los miembros del grupo necesitan “verse” mutuamente para que ninguno sea negado. De acuerdo con Otero (2008) plantea que:

Se parte de la aceptación de que no se tiene acceso a la verdad ni a la realidad de manera trascendente, el otro es tan legítimo como la propia persona y su realidad es de todos legítima, aún cuando no sea del agrado o se suponga que es peligroso (p. 8).

Principio de la acción del Profesor

Se acepta que la ciencia que se quiere enseñar no trata con la verdad en un sentido trascendente, ni con la realidad. Simplemente, se acepta un criterio de validación acerca de lo que se exige de una explicación científica y a un conjunto de afirmaciones científicas basadas en explicaciones científicas válidas. Así, tampoco se posee ninguna certeza, no se es dueño de ninguna verdad, pero se opera en un espacio de reflexión que permite responsabilizarse por las consecuencias de las acciones. Alumnos y profesores son componentes esenciales en el grupo de clase. El principio anterior destaca la importancia de estar en aceptación. Consecuentemente, se tiene que vigilar de la satisfacción de estos principios en el grupo de clase. Allí, el “saber” está ligado a la aceptación de los alumnos, si ellos no aceptan la invitación a ingresar en un nuevo dominio cognoscitivo, nada se podrá hacer para enseñarles. Mientras las emociones que determinan las acciones científicas son la curiosidad y la pasión por explicar, la emoción que especifica las acciones del profesor es la de comunicar (op cit, p 8)

Principio de la acción del Alumno

Aceptando los principios anteriores se debe aceptar que los alumnos tienen la responsabilidad de aceptar o rechazar la invitación que se les realiza. Si la aceptan, serán responsables junto con el profesor y con los demás miembros del grupo. Los alumnos también tienen que comprometerse con la convivencia del grupo de clase. Esto exige vivir en una dinámica emocional que les permita aceptar al otro como legítimo otro en la convivencia. Aceptar ingresar en un mundo de significados compartidos, pero que los estudiantes no conocen, supone participar y realizar un cierto tipo de acciones que son constitutivas del dominio cognoscitivo que se va a reconstruir. Esto es, el grupo de clase va a construir un dominio de conocimiento, en referencia a otro preexistente, pero estos dominios no serán estrictamente los mismos. Las acciones constitutivas del dominio que se va a reconstruir, a partir de las cuales emergerán los conceptos y las afirmaciones de conocimiento aceptadas como válidas

-en arreglo a la satisfacción de cierto mecanismo explicativo- no serán estrictamente idénticas a las que operan en el dominio de referencia. Esto no implica que no conserven o no procuren conservar, cierta continuidad epistémica con las explicaciones científicas y los mecanismos para su generación en el dominio de origen. Así, mientras los científicos hacen ciencia motivados por la pasión de explicar, los estudiantes que intentan ingresar a ese mundo de significados compartidos, estarán al menos en principio, motivados por la pasión de comprender (Otero, 2008 p. 10).

¿Qué emociones fundamentan las acciones de los alumnos con relación a la reconstrucción de un cierto dominio? La curiosidad de los estudiantes se pone en juego si el conocimiento se propone de manera problemática y desafiante. También la emoción de la sorpresa tendría un papel relevante, sorpresa frente a resultados experimentales, sorpresa cuando lo que predice el sentido común no es lo que predicen los sistemas conceptuales construidos, sorpresa frente a la incertidumbre, tan irreductible en los sistemas físicos -cuánticos- como en cualquier mundo que *traigamos a la mano*. Las dos anteriores también están relacionadas con la emoción de la cautela, y con la emoción social de la humildad, ambas estrictamente relacionadas con actitudes científicas.

En términos generales se espera que las acciones del alumno basadas en las emociones antes mencionadas, consistieran en acciones que de ser posible, nunca negaran al otro como legítimo otro en la convivencia. Las acciones aceptadas como válidas en el dominio de conocimiento que se va a construir deberán surgir del acuerdo, los conceptos emergerán de prácticas compartidas y lo mismo ocurrirá con las afirmaciones de conocimiento. Los alumnos preguntarán, responderán, conversarán, dudarán y expresarán lo que saben y los criterios que se aceptan para especificar que otro sabe. Al igual que el profesor, estarán vigilantes para no caer en la tentación de la certidumbre.

Principio de la Emoción como base de la Razón

La racionalidad, tiene un fundamento emocional. En general todos los sistemas racionales se basan en la aceptación "a priori" de las premisas

que postulan. Es precisamente esta aceptación en la que interviene la emoción. Así, un argumento, una explicación será considerada racional en la medida en que satisface los criterios de racionalidad de quien la acepta. Por esto, se rechaza el dualismo emoción-razón, las emociones son la condición de posibilidad de la razón. Este principio es muy importante para ofrecer una visión de ciencia, en la cual la razón es mucho más que la satisfacción de ciertos principios lógicos, que también son aceptados consensualmente por una cierta comunidad científica. En la escuela, se actúa como si las ideas fueran razonables en un sentido absoluto, como si no hubiesen existido cambios importantes acerca de lo que en una cierta época se aceptó como razonable con relación a otra. Relativizar la noción de razón y racionalidad al sistema explicativo escogido, es también una manera de ejercer el principio de vigilancia ante la tentación de la certidumbre.

Otra forma de pensar la racionalidad es ligarla con la supervivencia y con el conjunto de mecanismos automáticos y adquiridos, que ayudan a decidir, a razonar la mejor opción en una situación dada. A lo largo de la vida se desarrollan mecanismos que merced a de la capacidad mental de generar sentimientos y registros de las consecuencias positivas o negativas de las acciones, que permiten luego anticipar y tomar decisiones. Estos mecanismos, no hubiesen sido posibles sin la precedencia de las emociones. Existe pues una estrecha relación entre emociones, sentimientos y razones, en lugar del pretendido antagonismo que suele adjudicárseles.

En la mayoría de los sistemas educativos del mundo, los seres humanos permanecen al menos dieciséis años, y entonces naturalmente tales sistemas tendrían que operar como ocasiones para desarrollar extensiones de las funciones de autorregulación vital. Sin embargo, dentro de las escuelas se producen cada vez más acciones destructivas que atentan contra la supervivencia de los jóvenes -violencia, negación, malestar, deshumanización, adicción-. Una didáctica que tome en cuenta las bases emocionales de la convivencia como fundamento de la supervivencia y de la generación de conocimiento, podría contribuir al desarrollo de espacios más adecuados con la impronta biológica de la cooperación.

Estos principios son compatibles con la idea de que *el grupo de clase es una comunidad que está aceptando la invitación a ingresar en un mundo de significados compartidos por otra comunidad* (Otero, 2006; 2007). Asumir esta perspectiva, lleva a la necesidad de definir una comunidad o institución llamada de referencia, en la cual se realiza un conocimiento que será “exportado” a otras culturas e instituciones. Este fenómeno consistente en la migración de un conocimiento que “vive” en una cierta institución hacia otra a la cual deberá adaptarse para continuar “vivo”. Esto es lo que Chevallard (1992; 1997; 1999) define como *Transposición Didáctica*. Como consecuencia, la Mecánica Cuántica de los físicos profesionales resultará inevitablemente transformada cuando se intente enseñarla en la escuela.

Con este artículo se pretende analizar las condiciones de posibilidad de la implementación de esta propuesta, a través de la descripción de la dinámica emocional del grupo durante ella, destacando la importancia de estar en aceptación. Según Maturana (1991) la decisión de estar, o no, en un cierto dominio cognoscitivo es el producto de las emociones, y no de la razón; por eso se considera que la aceptación de los estudiantes es el factor clave de la viabilidad de ésta y de cualquier otra propuesta didáctica que se lleve al aula.

MÉTODO

Luego de decidir y analizar los conceptos y principios de Mecánica Cuántica que serían enseñados, se implementó la secuencia diseñada en un curso de Física de treinta (30) estudiantes de 17-18 años de edad. La escuela cuenta con una sala de informática con 10 computadoras, con horarios disponibles para su uso. Los estudiantes formaron seis grupos, que permanecieron fijos durante toda la secuencia. Los encuentros áulicos se plantearon a partir de la consideración de los principios didácticos antes enunciados, adoptando las ideas de Didáctica de la Física de Otero (2006; 2007; 2008) que implicó la siguiente forma de trabajo:

- La entrega del material de estudio impreso a los estudiantes clase a clase, para regular apropiadamente la introducción de novedades y problemas. Al finalizar cada clase los estudiantes entregaban sus producciones al profesor.
- El material impreso contenía preguntas y problemas, para los cuales los estudiantes debían conversar con los integrantes de su grupo, consensuar y formular respuestas escritas a las cuestiones planteadas.
- Los momentos de síntesis y consenso se plantearon con todos los grupos en forma simultánea procurando la formulación por parte de los estudiantes.
- Las preguntas de los estudiantes se respondían con preguntas, para devolver la responsabilidad al alumno.
- Se acordaron fechas para la entrega de sus producciones escritas, y de evaluación final.

Durante el desarrollo de cada una de las situaciones propuestas, se registraron en audio las conversaciones de cada grupo en cada encuentro áulico. También se recogió todo el material completo que se les había ido entregando clase a clase, lo que constituyó su carpeta de estudio; las evaluaciones, los cuestionarios realizados y las notas del profesor. Los registros en audio fueron transcritos, constituyendo los protocolos de análisis. En cada encuentro y para cada grupo se identificaron secuencialmente los turnos de habla correspondientes a cada estudiante.

Como ya se dijo, ingresar a un dominio de conocimiento nuevo, requiere aceptación por parte de los estudiantes. La aceptación no es absoluta, ya que es posible que se de en distintos grados, desde la mínima o umbral por debajo del cual no es posible llevar a cabo ninguna acción didáctica dirigida a la construcción de conceptos, hasta un alto nivel de aceptación. En este último caso los estudiantes logran hacerse cargo de los problemas planteados, con buen nivel de autonomía y resistencia a abandonar la tarea, y se manifiestan interesados por comprender los conceptos nuevos. En nuestro caso, se sabe que la secuencia tuvo el grado de aceptación mínimo, ya que se pudo seguir desde el principio hasta el final como

se había pensado. Todos los estudiantes realizaron la evaluación, y en general con buenos resultados en términos de conceptualización.

Por otro lado, todos los estudiantes respondieron el cuestionario al finalizar la implementación, expresando sus sentimientos relativos a la secuencia. Pero si se desea describir la aceptación de cada situación planteada es necesario analizar en detalle las acciones de los estudiantes al abordarlas. La acción es entendida en el mismo sentido que proponen Piaget, Vergnaud y Maturana, diversos trabajos, como vía de superación de la tensión entre emoción-razón, cuerpo-mente, sujeto-objeto. Vergnaud (1990; 2005; 2008) se refiere a las acciones como a las actividades cognitivas de pensar, decidir, etc. y a las actuativas: dialogar, actuar, elegir, etc. En este caso, las acciones de los estudiantes fueron analizadas a través de sus producciones escritas, y de los registros de sus conversaciones –los protocolos–.

Para describir la dinámica emocional de los estudiantes, y averiguar en que medida hubo aceptación, se construyeron tres categorías:

a) *Empatía*. Comúnmente se entiende a la empatía como “el preocuparse por los demás”, la capacidad de colocarse en el lugar del otro. Las situaciones planteadas necesitan una cooperación de los integrantes del grupo, ya que las preguntas requieren imaginar, predecir y consensuar, para formular y dar respuesta al problema, a las preguntas clave. Con esta categoría se busca analizar en que medida los estudiantes, para cada situación funcionaron genuinamente como un grupo de conversación e intercambio, con todos los integrantes participando de las conversaciones y expresando sus puntos de vista. Si en determinada situación, uno de los estudiantes del grupo toma la palabra y decide lo que se va a responder al problema planteado, y los demás no participan de la conversación, se considera que hay un bajo nivel de empatía por parte de ambos lados: el que decide tomar la palabra no se preocupa por que los demás también expresen sus ideas, y el que decide no participar, no coopera para poder resolver los problemas, que deja en manos del primero, considerado como “el que sabe”.

b) *Autonomía-resiliencia*. Las situaciones propuestas a los alumnos en esta ECPE tienen un carácter problemático, están conformadas por un conjunto de preguntas cuya respuesta sólo se puede construir si los miembros del grupo conversan acerca de ellas, y aceptan enfrentar las situaciones nuevas sin miedo, con confianza en que podrán abordarlas. La secuencia no presupone una autonomía absoluta por parte de los estudiantes en las situaciones, sino que se prevén instancias en las cuales los estudiantes puedan poner en juego sus conocimientos previos, y deban conversar con los demás integrantes del grupo. También se prevén momentos en los cuales se genere un consenso con todo el grupo de clase. Las preguntas y tareas planteadas constituyen una invitación para el alumno a entrar en el ámbito de conocimiento de la Mecánica Cuántica, es su decisión aceptar o no, y hacerse cargo de la elección. Cuando los estudiantes conversan acerca del problema, anticipan, formulan nuevas preguntas y proponen soluciones, se interpreta que están asumiendo responsablemente su papel de alumno, en el sentido de hacerse cargo de su aceptación a ingresar al dominio al cual están siendo invitados. Se entiende que si el alumno asume la responsabilidad, persistirá hasta encontrar respuestas a las preguntas, y no abandonarán la situación hasta poder formular una explicación. También un grupo con un alto grado de autonomía, no sucumbe fácilmente a la “tentación de la certidumbre”, es decir de tener la seguridad de la respuesta correcta, que suponen, viene de la mano de la profesora.

c) *Aceptación de las explicaciones*. Se refiere a si los estudiantes pueden formular y consensuar explicaciones acerca de las preguntas, luego de la conversación con los integrantes del grupo. Esto también indica si fueron aceptadas las preguntas como tales, si las consideran válidas. Los estudiantes pueden intentar abordar el problema, en el sentido de “deber institucional”: leerlo, y conversar acerca del problema, realizar algunas anticipaciones, imaginar e hipotetizar, pero puede ser que sientan insatisfacción al no lograr dar explicación, y esto puede producir un gran desaliento en ellos. Si luego de las anticipaciones y conversaciones acerca de las preguntas planteadas, logran consensuar algún tipo de respuesta, aunque no esté correcta, se considerará que aceptaron el problema como

propio. Este indicador se conforma a partir del análisis de las acciones de los estudiantes en relación a la posibilidad de lograr consenso con sus compañeros, y así formular una posible explicación al problema planteado.

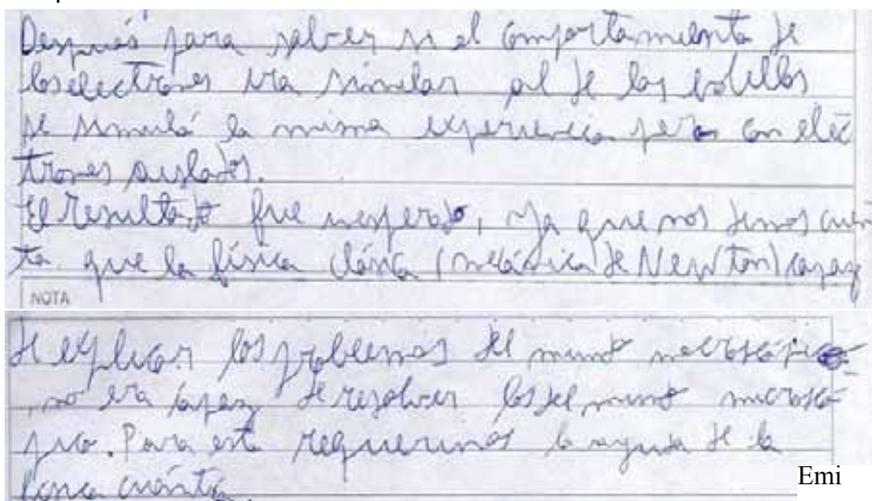
RESULTADOS

La secuencia implementada constituye un instrumento en el cual cada etapa se sostiene en la anterior, por lo cual resulta fundamental que los estudiantes no sean superados por las primeras situaciones, y logren llegar al final. El “buen funcionamiento” de estas situaciones implica una aceptación de los conceptos y principios propuestos, aceptación que tiene que darse tanto en un plano cognitivo como emocional. Es decir, la propuesta fue aceptada si los estudiantes lograron conceptualizar lo que se proponía en la secuencia, y si ellos no se sintieron superados por las situaciones, actuando de la forma requerida por ellas, esforzándose por resolver los problemas planteados.

Los invariantes operatorios – teoremas y conceptos-en-acto – utilizados por los estudiantes al abordar cada una de las seis situaciones ya fueron analizados (Fanaro y Otero, 2009). A partir de los teoremas en acto identificados, se pudieron inferir algunos obstáculos en la conceptualización, como por ejemplo considerar a los electrones como pequeñas bolillas con la propiedad de atravesar paredes, lo cual les impedía notar los efectos de la interferencia en la experiencia de la doble rendija. Sin embargo, a pesar de las dificultades y los obstáculos, la evaluación obtuvo resultados satisfactorios (Fanaro, Otero y Arlego, 2009 a). Pero el resultado de la evaluación constituye tan sólo uno de los instrumentos indicadores de la viabilidad. Como parte de las actividades de síntesis antes de la evaluación, se solicitó a los estudiantes la elaboración de una reformulación personal de los conceptos y principios estudiados. Todos los estudiantes lo hicieron, y sus producciones individuales constituyen un indicador de la aceptación de la propuesta. Formular y escribir una síntesis personal, requiere por parte de los estudiantes un gran esfuerzo, ya que es necesaria una comprensión previa de los conceptos, principios, y simulaciones trabajadas previamente.

Se muestran a continuación algunos ejemplos de estas producciones donde los estudiantes –cuya edad era de 17 años en promedio- logran reformular las experiencias en un lenguaje propio, incluso a veces presentando gráficos elaborados por ellos mismos a partir del uso del software, como se presenta a continuación.

En el fragmento que sigue, del estudiante Emi, de 17 años de edad manifiesta lo inesperado que le resultó el comportamiento del electrón, y destaca la importancia de la mecánica cuántica para explicar el comportamiento de los electrones

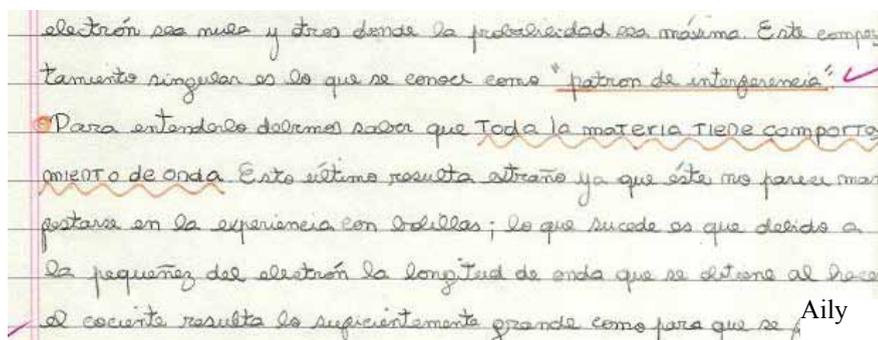


Después para saber es el comportamiento de los electrones ya similar al de los bolillos de Newton la misma experiencia pero con electrones sueltos.
El resultado fue inesperado, ya que nos dimos cuenta que la física clásica (mecánica de Newton) no podía explicar los problemas del mundo microscópico. Para esto necesitamos la ayuda de la física cuántica.

NOTA

Emi

Aily, reflexiona acerca de la necesidad de recurrir a las explicaciones que propone la mecánica cuántica para “entender” la formación del patrón de interferencia.



electrón sea más y otros donde la probabilidad sea máxima. Este comportamiento singular es lo que se conoce como "patrón de interferencia".
Para entenderlo debemos saber que toda la materia tiene comportamiento de onda. Esto último resulta extraño ya que esto nos parece manifestarse en la experiencia con bolillos; lo que sucede es que debido a la pequeñez del electrón la longitud de onda que se define al dividir el cociente resulta lo suficientemente grande como para que se

Aily

El fragmento que se presenta a continuación resulta interesante porque permite apreciar como el estudiante Axy, reformula el procedimiento realizado con el software comentando los resultados obtenidos y las conclusiones que pudieron ser formuladas a través de su uso:

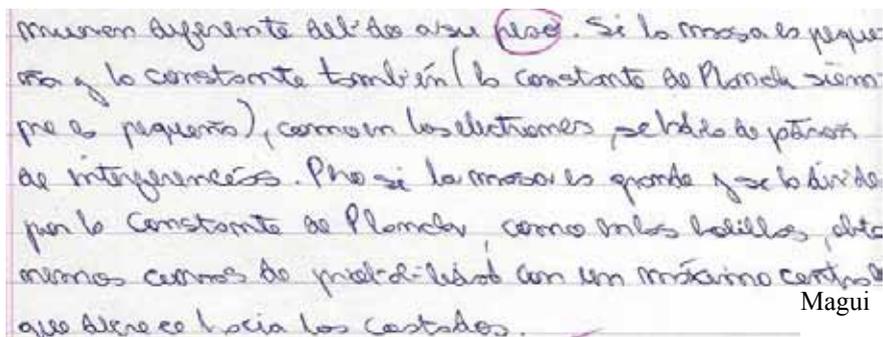
Continuamos utilizando el software "Modelles II" que permite simular con fenómenos físicos a partir de su modelo matemático, en este modelo se muestra una función $X(t)$ que conecta el estado inicial con el final. llamada $X_{class}(t)$. Al comenzar a trabajar con el programa determinamos que realizamos otras posibilidades de unión del estado inicial con el final, es decir que le damos de X_{class} en cualquier dirección S aumenta y el ángulo de amplitud también; luego determinamos que para sumar todos las posibilidades los únicos valores que se pueden sumar son aquellos que se encuentran cercanos a X_{class} ya que los demás se cancelan dando como resultado la suma de 0.

Axy

Rosa prefirió sintetizar conceptos y principios referidos a la transición entre la mecánica clásica y la cuántica realizando gráficos sucesivos de lo que daría la experiencia de la doble rendija si se fuera aumentando sucesivamente la masa de los proyectiles. Cabe destacar que estos gráficos son más fieles de lo que se obtendría en la experiencia, debido a que ella considera los efectos de la difracción que modula la interferencia. Tanto en el material de lectura como en el software, se mostraban sólo la curva de interferencia, con todos los máximos con el mismo valor. Por lo tanto, se infiere una buena transferencia de conocimientos en la reproducción de Rosa, ya que ella fue capaz de considerar los efectos de la difracción que modula la interferencia, que habían sido consensuados en conversaciones con todo el grupo de clase, y levantar los gráficos correspondientes:



Magui de forma muy breve, pero concisa, reformula los efectos de la pequeñez de la constante de Planck en el cociente para determinar si se notarán o no los efectos de interferencia:



Estas y muchas otras producciones de los estudiantes que por cuestiones de espacio no es posible presentar aquí, constituyen indicadores de la buena aceptación por parte de los estudiantes. Sin embargo, es necesario analizar los aspectos afectivos durante y al finalizar la implementación. A continuación se presenta el análisis de la dinámica emocional del grupo de clase para las primeras situaciones de la secuencia a partir de sus acciones. Luego, se triangularon los resultados de esta descripción, con el análisis del cuestionario que respondieron los estudiantes, expresando sus sentimientos respecto a la secuencia.

a) Descripción de la dinámica emocional de los estudiantes

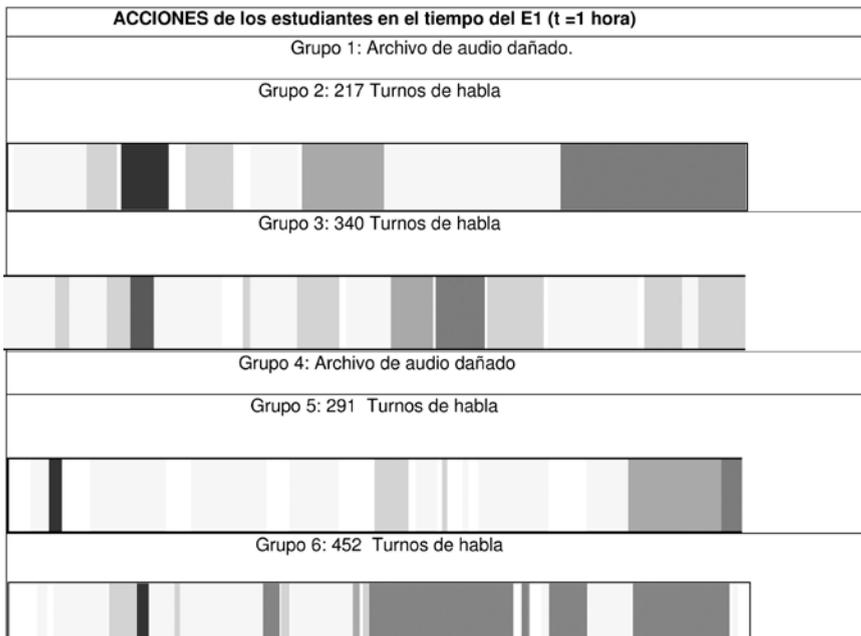
Análisis de la Situación 1

El análisis de la dinámica emocional se realizó para las primeras dos situaciones ya que éstas tienen un impacto importante en la viabilidad; la

forma en que se “viven” las situaciones decide la posibilidad de continuar con la secuencia.

A partir del análisis de los protocolos, se categorizaron las acciones de los estudiantes para cada situación. En la primera situación, se agruparon sus acciones en: predecir, formular una explicación, consensuar con el resto del grupo de clase, dibujar y conversar acerca de ello, graficar curvas y conversar acerca de la construcción, realizar cálculos. En base al desarrollo de las acciones en el tiempo, se construyó una disposición gráfica para cada grupo que se ha denominado “espectro de acciones” (ver grafico 1) como se muestra a continuación. Esto permite tener una mirada global de la dinámica emocional del grupo de clase. En este gráfico, se representan los distintos tipos de acciones con colores, y la extensión de cada color es proporcional a la cantidad de turnos de habla referidos a cada acción:

Grafico 1. Espectro de acciones de cada Grupo en la Situación 1



| Referencias de las Acciones | |
|-------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> | Predecir |
| <input type="checkbox"/> | Formular |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Consenso con el GC |
| <input type="checkbox"/> | Dibujar y conversar acerca de ello |
| <input type="checkbox"/> | Graficar y conversar acerca de la construcción |
| <input type="checkbox"/> | Calcular |
| <input type="checkbox"/> | Leer, o conversar sin aportar |

A partir de estos espectros de acciones y sus protocolos, se construyeron las modalidades media, baja y alta para cada una de las categorías arriba definidas.

Empatía

Dependiendo del número de estudiantes del grupo que participen en las anticipaciones que requiere cada situación, y del tipo de participación en el contexto de la conversación, se considera la empatía del grupo:

BAJA: cuando menos de la mitad los estudiantes se involucran en las discusiones, y el resto, aunque interviene en las conversaciones, lo hace de una forma trivial sin aportar a la conversación.

MEDIA: cuando cerca de la mitad de los estudiantes intervienen en las conversaciones, y éstas tienen que ver directamente con el abordaje de las preguntas y los problemas propuestos.

ALTA: cuando la mayoría de los estudiantes participan de forma activa en las discusiones, aportando a la resolución.

Autonomía-Resiliencia

Se construye a partir de la forma en que los estudiantes logran resolver las situaciones, solicitando ayuda al profesor:

BAJA: cuando demandan a la profesora explicaciones para poder abordar los problemas porque quedan “anclados”, sin avanzar en una formulación.

MEDIA: cuando luego de sostener algunas conversaciones, y formular alguna explicación, demandan algunas explicaciones a la profesora, y lo hacen para poder avanzar en la formulación

ALTA: cuando conversan, y logran formular explicaciones con mínimas intervenciones de la profesora, y cuando lo hacen es para reafirmar o comunicar alguna idea que ya conversaron y consensuaron.

Aceptación de las explicaciones

Según si los estudiantes logran formular algún tipo de respuesta a las preguntas planteadas, aunque no sean las esperadas, o por el contrario no logran consensuar alguna conclusión para escribir como respuesta, adopta las siguientes modalidades:

BAJA: luego de conversar y realizar anticipaciones, no logran formular ninguna explicación, o son escasas.

MEDIA: luego de anticipar respuestas posibles, logran acordar algunas explicaciones, y las formulan por escrito

ALTA: logran formular por escrito todas las explicaciones previamente consensuadas, aunque a veces no sean de la forma esperada.

A partir de las definiciones anteriores, y el análisis del espectro, se nota que, para los grupos de los cuales se cuenta con sus protocolos²:

El Grupo 2 (conformado por cinco estudiantes, pero en el encuentro que se desarrolló esta situación estaban presente cuatro) trabajó con muy buena empatía, ya que todos sus estudiantes participaron en las conversaciones, y se involucraron en las discusiones, expresando su punto de vista al anticipar los resultados. También de las pocas veces que requirieron ayuda de la profesora, y la cantidad de instancias donde los estudiantes intercambiaban ideas, lograron formular una explicación previo consenso. Se puede inferir que este grupo fue autónomo y aceptó las explicaciones.

² Para la Situación 1, contamos con los protocolos de los grupos 2, 3, 5 y 6 ya que los protocolos de los grupos 1 y 4 se dañaron durante la edición.

En el Grupo 3, dos de los siete estudiantes que asistieron a este primer encuentro, no participaron en ningún momento en las conversaciones del grupo. Por ello, se considera que el grupo no se rige bajo la empatía, ya que para el resto de los integrantes, esto no generó ninguna discusión. Los estudiantes que sí se involucraron en la situación propuesta, realizaron sus anticipaciones con autonomía, dedicando gran tiempo del encuentro al intercambio de sus anticipaciones y formulaciones. La buena aceptación de explicaciones se infiere de la cantidad de tiempo dedicado a la formulación y al consenso.

En el Grupo 5, sus tres integrantes se involucraron en las conversaciones, cada uno defendiendo su punto de vista, aunque en muchas ocasiones permanecieron “anclados” en la situación inicial, sin lograr formular explicaciones, por lo cual debían recurrir constantemente a las ayudas de la profesora.

El Grupo 6, estaba integrado por cuatro estudiantes, que a diferencia de los demás grupos, asistieron a todos los encuentros³. De los cuatro integrantes, solamente dos de ellos -alumnos destacados por sus buenas calificaciones- intercambiaban ideas. Ellas eran quienes decidían la forma final de las formulaciones que dejarían escritas en sus carpetas. Se observa en el “espectro de acciones” de este grupo que predominan los momentos en que conversan acerca de los resultados de la experiencia, y en cambio son pocas las instancias donde consiguieron formular explicaciones. Aún así, ellas no desistieron en la tarea, y con pocas demandas a la profesora, dirigieron sus acciones hacia la realización de cálculos aritméticos. Fue el único grupo que decidió esto, aunque la situación en ningún momento lo solicitaba. Podría pensarse que ellas de esta forma, sienten que responden “correctamente” con expresiones matemáticas y consideraciones geométricas, como usualmente abordan los problemas en las clases de física de años anteriores.

3 Se quiere destacar esto, ya que sólo este grupo fue estable, en el sentido que los grupos restantes, aunque estuvieran formados por los mismos integrantes, en cada encuentro no concurrían todos. Esto dificulta el tipo de análisis y la descripción de los aspectos afectivos buscada, y constituye un motivo más por el cual solo se realizó para las primeras dos situaciones.

El cuadro 1 sintetiza los resultados del análisis basado en las categorías anteriores:

Cuadro 1. Descripción de las categorías que describen los aspectos afectivos de cada grupo para la primera situación

| | Empatía | Autonomía-Resiliencia | Aceptación de las explicaciones: |
|---------|----------------|------------------------------|---|
| Grupo 2 | Alta | Alta | Alta |
| Grupo 3 | Media | Alta | Alta |
| Grupo 5 | Alta | Baja | Baja |
| Grupo 6 | Media | Alta | Baja |

En síntesis, la empatía del GC al abordar la situación fue buena, aunque no la deseada, ya que en grupos de cuatro o cinco integrantes, sólo la mitad de los estudiantes eran quienes intentaban dar respuesta a las preguntas de la situación, y el resto de sus compañeros solamente escuchaban y copiaban las formulaciones en sus carpetas. Tanto la decisión de no participar involucrándose en el problema, ni tomarlo como “suyo”, como la de quien “tiene la palabra” y realiza la formulación, indica la poca empatía de los grupos.

Sin embargo, en relación a la autonomía, casi todos los grupos afrontaron el problema sin temor ante la situación nueva, anticipando y conversando con sus compañeros. Las pocas recurrencias a la profesora eran solicitando orientación acerca de la nueva notación, o las definiciones, que resultaban nuevas. Aún en las instancias en los estudiantes parecían “anclados” sin poder formular respuestas, no abandonaron la tarea de imaginar y predecir lo que sucedía en esta experiencia nueva. Solamente uno de los grupos (Grupo 5) se caracterizó por la baja autonomía, reclamando explicaciones a la profesora y manifestando su desinterés en varias ocasiones. Este grupo no consiguió abordar la situación, a pesar de las conversaciones e interacciones con la profesora, resultando en una poca aceptación de las explicaciones al problema planteado.

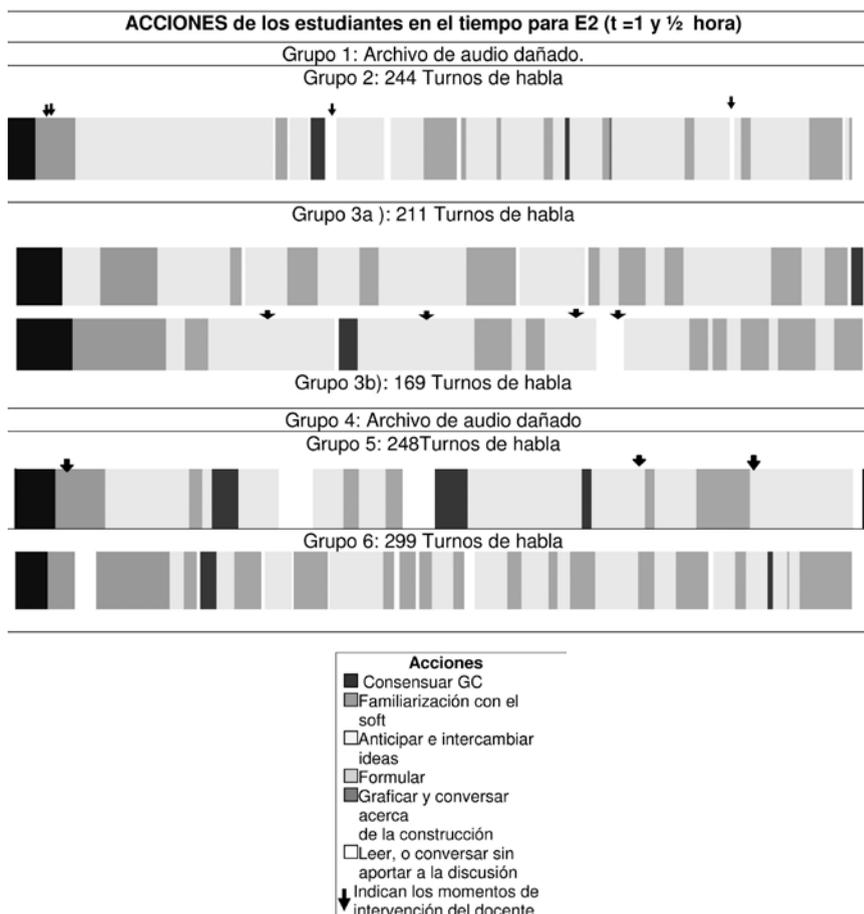
Por el contrario, es notable que los estudiantes que mantuvieron una buena interacción con sus compañeros de grupo y tuvieron gran

persistencia, fueran los que más lejos pudieron ir en términos de conceptualización. Lograr conceptualizar lo planteado en esta primera situación, era condición imprescindible para poder abordar la situación que le sucedía en la secuencia.

Análisis de la Situación 2

A continuación se presenta el “espectro de acciones” para la segunda situación, (ver gráfico 2). desarrollada en el aula e informática de la escuela:

Gráfico 2. Espectro de acciones de cada Grupo en la Situación 2



Para analizar la dinámica en relación a esta situación se contó con los archivos de audio de los grupos 2, 3 (formado por dos subgrupos) 5 y 6, ya que los archivos correspondientes a los grupos 1 y 2 no pudieron obtenerse correctamente.

Como se puede inferir a partir de los espectros de acción de los grupos, casi todos los estudiantes se familiarizaron fácilmente con el software de la Experiencia de la Doble Rendija.

Con relación al Grupo 2, la interacción de dos de los estudiantes en el aula de informática fue menor que en la Situación 1, por lo cual la empatía podría considerarse menor respecto a la Situación 1. Posiblemente estar en un aula y en un tiempo que no es habitual para las clases de Física hizo que estos estudiantes se “dispersaran” y no se involucraran en las conversaciones acerca de la situación. De la buena interacción entre los propios integrantes y las pocas llamadas de ayuda a la profesora, se puede inferir que los estudiantes de este grupo pudieron abordar la situación con gran autonomía, y casi todas las conversaciones finalizaron con la formulación de explicaciones y respuestas a las preguntas planteadas.

El Grupo 3, por una cuestión de trabajo más cómodo con las computadoras, se decidió subdividirse en dos subgrupos de tres integrantes cada uno, cuyos protocolos fueron identificados para el análisis como Grupo 3 a) y Grupo 3b). Los dos integrantes que en la situación anterior habían participado muy poco, en esta instancia se mostraron más interesados, y participaron en las conversaciones. Esta situación fue abordada con mucha autonomía por parte del grupo y casi todas las conversaciones y discusiones finalmente terminaron en formulaciones, mostrando así una buena aceptación de las explicaciones.

El Grupo 5 estuvo conformado por los mismos tres integrantes que habían estado en la situación anterior. Dos de ellas fueron las que sostuvieron la mayor parte de la conversación, aunque la mayoría de las conversaciones no derivaron en ninguna formulación. Las preguntas a la profesora fueron pocas, pero esto no lleva a considerar que sostuvieron

autonomía en la realización de las actividades, ya que notando que ellas se quedaban “ancladas” sin poder abordar la situación, la profesora se acercó en varias instancias al grupo, para orientarlas.

Las integrantes del Grupo 6, eran las mismas estudiantes que en la situación anterior, pero esta vez todas conversaron y realizaron aportes a la resolución. Este grupo se caracterizó por tener los protocolos más extensos, formularon nuevas preguntas y reflexiones. En este encuentro, lograron realizar gran cantidad de formulaciones, y lo hicieron con gran autonomía.

En el cuadro 2. se sintetiza los resultados del análisis basado en las categorías anteriores:

Cuadro 2. Descripción de las categorías que describen los aspectos afectivos de cada grupo para la segunda situación

| | Empatía | Autonomía- Resiliencia | Aceptación de las explicaciones: |
|---------|----------------|-----------------------------------|---|
| Grupo 2 | Media | Alta | Alta |
| Grupo 3 | Alta | Alta | Alta |
| Grupo 5 | Media | Baja | Baja |
| Grupo 6 | Media | Alta | Baja |

En síntesis, de esta descripción se infiere que los estudiantes aceptaron el software como parte necesaria de la secuencia, familiarizándose rápidamente y con buena interacción con él. También se mostraron más participativos y con empatía hacia sus compañeros de grupo, comparado con la Situación 1. El trabajo con el software también animó a los estudiantes a realizar un trabajo más autónomo, como si ellos se sintieran “más a gusto” con este tipo de actividad. Al igual que en la situación anterior, es notable que los estudiantes que mantuvieron una buena interacción con sus compañeros de grupo y sostuvieron alta persistencia, fueron los que más lejos pudieron ir en términos de conceptualización.

Es necesario aclarar que este análisis se realizó solamente para los dos primeros encuentros de la implementación, de un total de quince. En

primer lugar, porque este tipo de análisis se requiere un gran tiempo debido a su complejidad y al gran volumen de datos generados (se generaron 57 transcripciones, con un promedio de 200 turnos de habla cada uno). Resultaría muy interesante contar con indicadores de la evolución de la afectividad del grupo de clases, pero para esto se debe contar con otras formas de registros (por ejemplo videos que registren lo gestual, etc.) y realizar el seguimiento durante un tiempo mucho mayor al que se empleó aquí. El análisis se realizó para los dos primeros encuentros, donde se presentaron las dos primeras situaciones porque se consideró que éstas tienen un impacto importante en la viabilidad; la forma en que se “viven” decide la posibilidad de continuar con las situaciones de la secuencia. De esta forma, queda abierta una vía para futuras investigaciones que aborden la descripción y comprensión de la evolución del estado emocional del grupo

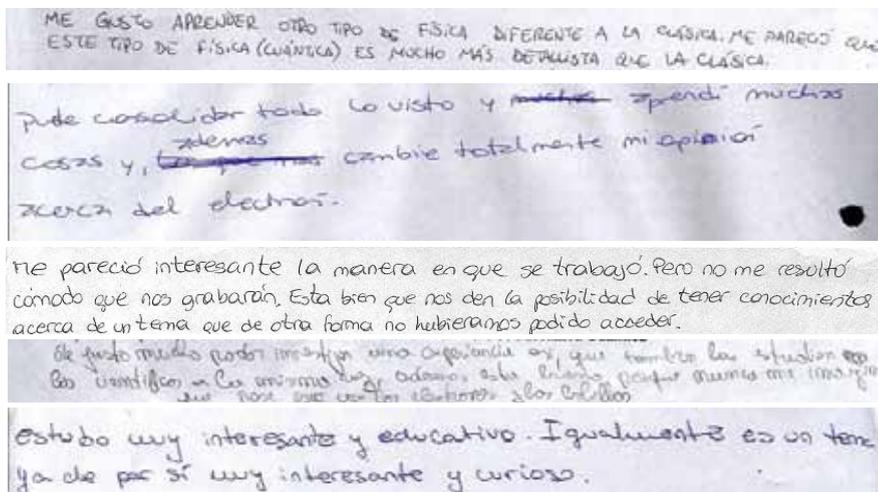
b) Los sentimientos de los estudiantes

Luego de la evaluación, los estudiantes respondieron un cuestionario diseñado para este grupo, con veintisiete preguntas cerradas, más una pregunta abierta, dirigido a conocer la opinión de los estudiantes con respecto a los conceptos y principios cuánticos, a la forma de trabajo propuesta, y a la utilización de las simulaciones informáticas. El análisis de las preguntas cerradas se encuentra publicado (Fanaro y Otero, 2008). Se Completa este análisis, incluyendo aquí algunos de los comentarios que los estudiantes realizaron al final del cuestionario, donde se ofrecía un espacio para expresar su opinión respecto del estudio de la Mecánica Cuántica:

Con relación a los conceptos de Mecánica Cuántica

Para la mayoría de los estudiantes los aspectos matemáticos resultaron accesibles y acordes a sus conocimientos previos. En general los estudiantes se manifestaron sorprendidos por el comportamiento extraño de los electrones, reconociendo, como es esperable, que el carácter probabilístico les genera incomodidad, aunque reconocen si bien los

principios cuánticos son novedosos y sorprendentes, también explican los resultados clásicos, que ya conocían antes. La mitad de los estudiantes manifestó que sintió interés por comprender ideas de física actual, y la mayoría expresa haberse sentido satisfecho por haber estudiado nociones de física actuales, que en general no se enseñan en la escuela. Se detalla a continuación algunas expresiones que apoyan estas conclusiones:



Con relación a la dinámica de las clases

La construcción de los conceptos cuánticos involucrados requiere que los estudiantes sean capaces de realizar el esfuerzo cognitivo y afectivo necesario. Sin embargo, el análisis indica que frente a la abstracción que conllevan los conceptos y a las dificultades que supone resolver las situaciones, los estudiantes vencieron la tentación de abandonar. Esto se relaciona con el tipo de emociones implicadas en el diseño de la secuencia. Por ejemplo, la primera etapa acepta las ideas corpusculares de los estudiantes acerca de los electrones, antes de perturbarlas. En los comentarios que siguen de los estudiantes, se puede notar como ellos son conscientes del esfuerzo que les demandó la secuencia, pero a su vez, valoran y aprecian tanto la secuencia, como las acciones de la profesora:

② Fue una experiencia nueva, y por consiguiente, hubo que prestar mucha atención para entender los conceptos y los fenómenos. De todas maneras, me gustó porque fue una propuesta diferente que requirió de mucho tiempo y esfuerzo, tanto de parte nuestra parte como del profesor y vale la pena mucho el hecho de buscar otras alternativas que no sean las de enseñanza tradicional.

La experiencia fue distinta, había que recordar muchas cosas de los años anteriores y creo que otros chicos les hubiera costado más que a nosotros, ya que nosotros tenemos buena base. Me gustó mucho el video y las simulaciones porque me ayudaron a entender más la física cuántica. La síntesis también me ayudo para ordenar las ideas, al igual que la puesta en común. De las actividades me gustó que primero teníamos que pensar las nosotras y después veíamos la simulación. El video es mejor verlo antes, despertó el interés. En general los puntos en común se dieron muchos, así como también el poder llamar a los profesores de otra cualquier duda ya que siempre están disponibles y ayudan a entre los grupos.

Me pareció interesante la manera en que se trabajó. Pero no me resultó cómodo que nos grabaran. Está bien que nos den la posibilidad de tener conocimientos acerca de un tema que de otra forma no hubiéramos podido acceder.

Con relación al software de simulación utilizado

Si bien las herramientas elegidas y diseñadas buscaban aliviar ciertos aspectos desalentadores como el cálculo, no suponen una utilización pasiva. Ellas son parte de situaciones indisolubles de la conceptualización y por lo tanto están ligadas a problemas y preguntas. En este aspecto es importante destacar que la pertinencia, cantidad y calidad de las simulaciones, fueron aspectos muy analizados y cuidados en esta secuencia. Se usaron estas herramientas porque evitaban cálculos y sostenían un lenguaje geométrico, que aunque abstracto, permitía relacionar los aspectos matemáticos con el significado físico. Casi todos los estudiantes reconocen la utilidad de las simulaciones, aún admitiendo que no son visualmente atractivas, consideran que ellas colaboran en la comprensión y reducen la abstracción. Los estudiantes tienen una clara percepción de su esfuerzo, en todas las actividades propuestas, como se puede apreciar según sus propias palabras:

Personalmente lo que más me gustó fue trabajar con la compu, es decir con las simulaciones, porque era más fácil para entender las cosas.

Por otro lado la dinámica personal no me costó mucho hacerla, pero me ayudó para estudiar para la prueba y repasar.

AL PRINCIPIO NO ME SENTÍA COMODO CON EL ESTUDIO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA PERO CUANDO ENTRENAMOS A IR A LA SALA DE INFORMÁTICA Y ENTRENAMOS A REALIZAR LOS TRABAJOS EN LA COMPUTADORA ME RESULTÓ MUY INTERESANTE.

TAMBIÉN ME SIRVIÓ PARA DARSE CUENTA DE TODO LO QUE INCLUYE EL MUNDO TECNOLÓGICO, TERMINAR DE DEFINIR CONCEPTOS QUE NO LOS TENÍA CLAROS.

FUE UN TRABAJO MUY BUENO MUY BUENO LO QUE LO HIZO MUY INTERESANTE.

Particularmente el trabajo ha sido intenso, y rescato mucho la posibilidad de haber trabajado con programas de software, que a decir verdad, nunca lo habíamos hecho en otra materia.

Respecto a este último comentario, parece extraño que dado que se trata de alumnos que asisten a un colegio que tiene un aula de informática a disposición, no se incorporen estas herramientas en las clases. Las expresiones anteriores reflejan la satisfacción por parte de los estudiantes, de poder darles la posibilidad de trabajar con software de simulación.

Se interpreta que sus opiniones constituyen buenos indicadores del alto grado de aceptación de los estudiantes, que está correlacionado con el nivel de conceptualización logrado por el grupo de clase. Esta aceptación resulta indispensable para la implementación de ésta, y cualquier otra secuencia de situaciones que se implemente en la escuela, si se pretende que los estudiantes aprendan de forma significativa.

CONCLUSIONES

El análisis realizado en este trabajo permite concluir que los aspectos afectivos puestos en juego en el diseño y en la implementación de la secuencia, inciden notablemente en la viabilidad de la misma. Por consiguiente, se quiere enfatizar la importancia de dedicar especial atención a la consideración de los aspectos afectivos desde el diseño mismo de la secuencia, además de la decisión acerca de qué conceptos

y principios son los que se pretenden enseñar. En este estudio, estas consideraciones se plasmaron intentando hacer de las clases de Física un ámbito de aceptación y convivencia, para lo cual:

- En todas y cada una de las preguntas que componen las situaciones se intentó considerar las ideas previas de los estudiantes, aceptarlas, y luego se perturbaron, tratando de que ellos mismos las cuestionen.
- La curiosidad de los estudiantes se trató de poner en juego proponiendo el conocimiento de manera problemática y desafiante. También se intentó que la emoción de la sorpresa tuviera un papel relevante, sorpresa frente a resultados experimentales, sorpresa cuando lo que predice el sentido común no es lo que predicen los sistemas conceptuales construidos, sorpresa frente a la incertidumbre, etc.
- Todas las situaciones partían del supuesto que los estudiantes serían capaces de resolver las preguntas y problemas, aunque para ello fuera necesario un gran esfuerzo, tanto por parte de los estudiantes, quienes debían considerar la opinión de los demás integrantes del grupo - por ejemplo cuando se les requería predecir los resultados de una experiencia que nunca habían realizado- como por parte del profesor para no caer en la tentación de la certeza, y responder en el lugar de hacerlo los estudiantes. Por eso, cuando los estudiantes preguntaban al profesor, éste intentaba contestar con nuevas preguntas que orienten la búsqueda de su respuesta. Esto también exige contar con un profesor que, además de estar muy intrincado en la secuencia, está dispuesto a realizar el esfuerzo por llevarla a cabo, respetando los principios didácticos, en particular el Principio de Acción del Profesor.

La enseñanza de la Mecánica Cuántica en la escuela media constituye un campo de investigación actual y relevante; desde diversos ámbitos se reconoce y se recomienda el tratamiento escolar de sus conceptos y principios, pero son escasas las propuestas didácticas para hacerlo sin evitar que se produzca un notable fracaso y desaliento para profesores y alumnos.

La investigación permitió formular y fundamentar didácticamente una propuesta dirigida a enseñar los aspectos fundamentales de la Mecánica Cuántica, -adoptando el Método de Feynman. El análisis de la primera implementación y de las dos replicaciones que se realizaron posteriormente indica que la secuencia es viable en el último año de la escuela secundaria. Hay que reconocer que esta viabilidad de la secuencia, se logra no sólo con el diseño de la secuencia en mano, sino como fruto del esfuerzo que requiere implementar la secuencia, tanto por parte de profesor como de los estudiantes. Sólo así es posible abordar aspectos fundamentales de Mecánica Cuántica.

Aunque el estado actual de la investigación proporciona conocimiento acerca de la viabilidad de la propuesta, referida a los aspectos fundamentales de Mecánica Cuántica, se sabe que debe ser mejorada y ampliada, para incluir el tratamiento de los fotones. Actualmente se trabaja en esa dirección, con los mismos sustratos didácticos.

Finalmente, es necesario destacar la relevancia y la necesidad de complementar la mirada didáctica y cognitiva cuando se trata de investigar la viabilidad y adaptabilidad de propuestas didácticas.

REFERENCIAS

- Chevallard Y. (1992) Concepts fondamentaux de la didactique: Perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 12(1), pp. 73-112
- Chevallard, Y. (1997) Familière et problématique, la figure du professeur. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 17 (3), pp. 17-54
- Chevallard, Y. (1999) L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol. 19 (2) pp. 221-265
- Damasio, A. (2005) *En busca de Espinosa. Neurobiología de la Emoción y los Sentimientos*. Editorial Crítica. Barcelona
- Fanaro, M., Otero, M. R; Moreira, M (2007a). *Estructura Conceptual Propuesta para Enseñar los fundamentos de la Mecánica Cuántica*

- en la escuela. Actas del V Encuentro Internacional de Aprendizaje Significativo-* Febrero de 2006 Centro Universitario la Salle. Universidad autónoma de Madrid. ESPAÑA Indivisa, Boletín de Estudios e Investigación, Monografía VIII, pp. 189-201 ISSN: 1579-3141
- Fanaro, M., Otero, M. R Arlego, M. (2007b). El método de caminos múltiples de Feynman para enseñar los conceptos fundamentales de la Mecánica Cuántica en la escuela secundaria, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* 22, 233-260
- Fanaro, M., Otero, M. R Arlego, M. (2007c) Software de simulación y reconstrucción de fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología (TE&ET)*. Universidad Nacional de La Plata N° 2, pp. 4-12. Disponible en <http://teyet-revista.info.unlp.edu.ar/files/No2/TEYET2-invitedpaper.pdf>
- Fanaro, M., Otero, M. R (2008) Basics Quantum Mechanics teaching in Secondary School: One Conceptual Structure based on Paths Integrals Method *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 2(2), 103-112. ISSN 1870-9095 Disponible en <http://journal.lapen.org.mx/may08/LAJPE%20149F-Fanaro%20Otero.pdf>
- Fanaro, M., Otero, M. R (2009a) Arlego. *Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure* Investigações em Ensino de Ciências – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BRASIL.- ISSN 1518-8795 V14(1), pp. 37-64
- Fanaro, M., Otero, M. R (2009b) *Teoremas en acto y situaciones de Mecánica Cuántica en la Escuela Media* *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 3(2) pp. 307-323,
- Fanaro, M. (2009) *La enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media*, Tesis Doctoral leída el 23 de Julio de 2009 en la Universidad de Burgos
- Maturana, H. R. (1991). *El Sentido de lo Humano*. Editorial Dolmen, España
- Maturana, H. R. (1995). *La realidad ¿objetiva o construida? I y II. Fundamentos biológicos de la realidad*. Ed. Anthoropos/Universidad Iberoamericano/ Iteso. México

- Maturana, H. R. (2001) *Cognição, Ciência e Vida Cotidiana*. Editorial UFMG, Brasil. Moreira M. A. A (2002). Teoría dos Campos Conceituais de Vergnaud, o Ensino de Ciências e a pesquisa nesta área. *Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, (7), 7-29*
- Otero, M. R. (2006) Emociones, sentimientos y razonamientos en Didáctica de las Ciencias, *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias, 1(1) 24-53* [En línea] Obtenido de http://www.exa.unicen.edu.ar/reiec/files/anio1/num1/REIEC_anio1_num1_art3.pdf
- Otero M R (2007) Emociones, sentimientos y razonamientos en Educación Matemática *Acta I Encuentro Nacional de Enseñanza de la Matemática: perspectiva Cognitiva, Didáctica y Epistemológica*. (Acta I ENEM. pp. LXXXII-CV). Tandil, Buenos Aires, Argentina
- Otero, M. R., (2008). Enseñanza de las Ciencias: Aspectos Didácticos, Cognitivos y Afectivos *Actas del V Semana de Investigación Programa Internacional De Doctorado En Enseñanza De Las Ciencias UBU/ UFRGS Puerto Alegre*. (En prensa)
- Vergnaud, G. (1990) La teoría de los campos conceptuales. *Recherches en Didactique des Mathematiques, Vol. 10, 2, 3*. Traducido por Juan D. Godino.
- Vergnaud, G (2005) en *Sur la théorie des situations didactiques*. Hommage a Guy Brousseau. La Pensée Sauvage, Edition
- Vergnaud, G. (2008) *Functions, concepts and schemes*. A reply to Rita Otero. (Comunicación personal)

