

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**Enseñanza de la dualidad onda-partícula a través de Clases Interactivas  
Demostrativas en contextos de aprendizaje activo.**

**Estrella María Escobar Salamanca**

**Profesores Guías:**

**Carla Hernández Silva**

**Fernando Méndez Ferrada**

Tesis para optar al Grado de Licenciado en  
Educación en Física y Matemática.

**Santiago – Chile**

**2016**



Enseñanza de la dualidad onda-partícula a través de Clases Interactivas  
Demostrativas en contextos de aprendizaje activo.

Estrella María Escobar Salamanca

Este trabajo de titulación fue elaborado bajo la supervisión de los profesores Carla Hernández Silva y Fernando Méndez Ferrada del Departamento de Física y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora, Sr. Joaquim Barbé Farre y Sr. Jorge Gamboa Ríos.

---

Sr. Joaquim Barbé Farre

Profesor Corrector

---

Sr. Jorge Gamboa Ríos

Profesor Corrector

---

Sr. Enrique Cerda Villablanca

Director

---

Sra. Carla Hernández Silva

Profesora guía

---

Sr. Fernando Méndez Ferrada

Profesor guía

## RESUMEN

En este trabajo de titulación se diseñó una propuesta didáctica para la enseñanza de la dualidad onda-partícula basada en la metodología de enseñanza Clases Interactivas Demostrativas (CID) para favorecer el aprendizaje activo de los estudiantes.

La metodología CID está basada en el ciclo de aprendizaje: Predicción, Observación, Discusión y Síntesis – PODS – y se caracteriza por un procedimiento de 8 pasos propuestos por Sokoloff y Thornton (2004), los cuales permitieron diseñar una propuesta enfocada en los estudiantes a través de la observación directa de fenómenos físicos y de simulaciones.

Para la elección de la temática de la propuesta se realizó un análisis de contenido a los textos escolares de Física de cuarto año medio en la unidad “el átomo y su núcleo”, unidad inevitablemente cuántica, y ciertamente, el tema dualidad onda-partícula es una primera aproximación a la mecánica cuántica.

De este modo, se diseñaron recursos y preguntas que orientan el aprendizaje de los estudiantes en torno al tema dualidad onda-partícula y se elaboró una guía de orientaciones al docente que facilita la ejecución de las actividades que conforman dicha propuesta didáctica.

Para validar la propuesta se utilizó el método de evaluación por pares. En ella participaron 5 profesores de aula secundaria y 2 profesores de aula universitaria a través de una rúbrica diseñada en este trabajo de titulación, haciendo valiosas sugerencias. Dicha evaluación obtuvo un 86% de aprobación.

Palabras claves: Propuesta didáctica, Clases Interactivas Demostrativas, Aprendizaje activo, dualidad onda-partícula.

## **ABSTRACT**

In this thesis, a didactical proposal was designed for the teaching of the wave-particle concept; based in the Interactive Lecture Demonstrations method (ILDs) in order to favor an active learning by the students.

The ILD method is based in the following learning cycle: Prediction, Observation, Discussion and Synthesis – PODS – and is characterized by an eight step procedure, proposed by Sokoloff and Thornton (2004), which allowed us to design a proposal focused in the students, through direct observation of physical phenomena and simulations.

In order to select the topic of this proposal, a content analysis was performed on the physics class books of the 4th year level; in the “el átomo y su núcleo” (the atom and its nucleus) chapter. An inevitably quantum chapter; certainly, the wave-particle duality concept is a first approximation to quantum mechanics.

This way, resources and questions were designed in order to guide the learning of the students around wave-particle duality and a guidebook that eases the execution of activities that make said proposal was made for the teacher.

In order to validate this proposal, the peer evaluation method was used. In it, 5 high school teachers and 2 college teachers took part in the form of a rubric designed in this very document, making valuable suggestions. Said evaluation got an 86% of approval.

**Keywords:** Didactic proposal, Interactive Lecture Demonstrations, Active Learning, Wave-Particle Duality.

## DEDICATORIA

*“La Historia es la ciencia más fundamental porque todo conocimiento humano pierde su carácter científico cuando los hombres olvidan las condiciones en las que se originó, las preguntas que venía a contestar y las funciones al servicio de las cuales se creó”.*

*Erwin Schrödinger, 1983.*

A aquellos que se forjan en la resistencia de la crisis capitalista, aquellos que quieren llevar adelante la gran tarea de transformar la sociedad por una que no permita la explotación del hombre por el hombre, ni de la tierra ni de las estrellas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Pienso que los agradecimientos de este trabajo, en primer lugar, son para la vida entera, para las decisiones que tomé y que me hicieron llegar hasta aquí, para aquellas personas con las cuales me aventure a conocer una amistad y un compañerismo mutuo que asertivamente aún perduran.

En segundo lugar, un agradecimiento a la familia que me cuidó cuando era una niña y veló en lo posible por mi bienestar y auspiciaron económicamente mi carrera universitaria. En especial a mis dos madres, Margarita y Elsa.

También agradecer enormemente a los profesores guías, a la profesora Carla Hernández y al profesor Fernando Méndez, quienes me apoyaron y enseñaron importantes cuestiones, no sólo en la disciplina si no para lo que queda de vida. De ellos esta tesis se enriqueció de una potente expresión de enseñanza y aprendizaje, y de una superación de obstáculos que sólo con el trabajo en equipo es posible.

Por último agradecer a mis amigas y amigos, a mis compañeras y compañeros, a la murga querida! y a Feñito por su apoyo y cuidado incondicional.

Gracias por la humanidad que podemos compartir día a día a pesar de este sistema que sólo busca eliminarla, gracias por ser una/os sobrevivientes y permitirme acompañarlos en este viaje.

Estrella María Escobar Salamanca.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
TABLA DE CONTENIDOS .....	V
ÍNDICE DE CUADROS Y/O TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VIII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
CONTEXTO Y PROBLEMÁTICA .....	3
1.1. JUSTIFICACIÓN .....	7
1.2. OBJETIVOS.....	8
CAPÍTULO 2 .....	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. ALFABETIZACIÓN CIENTÍFICA .....	9
2.2. MODELOS EDUCATIVOS CENTRADOS EN EL ESTUDIANTE.....	13
2.2.1. CLASES INTERACTIVAS DEMOSTRATIVAS: UNA METODOLOGÍA DEL APRENDIZAJE ACTIVO PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA.....	15
2.3. MECÁNICA CUÁNTICA Y FENÓMENOS DE INTERFERENCIA .....	17
2.3.1. PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN .....	23
2.3.2. INTERFERENCIA DE ELECTRONES.....	24
2.3.3. DIFICULTADES EN LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA MECÁNICA CUÁNTICA .....	27
2.3.4. PROPUESTAS EDUCATIVAS PARA LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA EN LA ESCUELA .....	29
CAPÍTULO 3 .....	31
MARCO METODOLÓGICO .....	31



3.1. DIAGNÓSTICO Y ANTECEDENTES PARA LA PROPUESTA.....	31
3.1.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CONTENIDO .....	33
3.2. DISEÑO Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA .....	39
3.2.2. OBSERVACIONES.....	46
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>52</b>
<b>PROPUESTA DIDÁCTICA .....</b>	<b>52</b>
GUÍA PARA EL ESTUDIANTE – ACTIVIDAD I.....	53
GUÍA PARA EL ESTUDIANTE – ACTIVIDAD II.....	61
GUÍA DE ORIENTACIONES PARA EL DOCENTE - AI .....	68
GUÍA DE ORIENTACIONES PARA EL DOCENTE - AII .....	75
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>84</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>93</b>
ANEXO I.....	93
ANEXO 2 .....	100

## ÍNDICE DE CUADROS Y/O TABLAS

Tabla 1: <i>Contenidos mínimos obligatorios</i> .....	3
Tabla 2: <i>Objetivos fundamentales</i> .....	4
Tabla 3: <i>Relación de contenidos y aprendizajes esperados e indicadores de evaluación.</i> .....	5
Tabla 4: <i>Conocimientos previos y conceptos claves</i> .....	6
Tabla 5: <i>Competencias relacionadas a las habilidades según la alfabetización científica</i> .....	10
Tabla 6: <i>Procedimiento de 8 pasos para las Clases Interactivas Demostrativas.</i> .....	17
Tabla 7: <i>Selección de conceptos exclusivamente cuánticos incluidos en los textos escolares analizados.</i> .....	34
Tabla 8: <i>Tabla de resumen de la propuesta didáctica según el ciclo PODS</i> .....	40
Tabla 9: <i>Tabla de resumen de promedios por ítem de la rúbrica de evaluación.</i> .....	45
Tabla 10: <i>Promedios de aprobación de la propuesta de cada docente.</i> .....	46
Tabla 11: <i>Observaciones de profesor de colegio 1.</i> .....	46
Tabla 12: <i>Observaciones de profesor de colegio 2.</i> .....	47
Tabla 13: <i>Observaciones de profesor de colegio 3.</i> .....	47
Tabla 14: <i>Observación de profesor universitario 6.</i> .....	49
Tabla 15: <i>Observaciones de profesor universitario 7.</i> .....	50

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Imagen 1 : <i>Relación de los elementos que caracterizan la alfabetización científica. ....</i>	12
Imagen 2 : <i>Secuencia de resultados del experimento de Tonomura en Hitachi, 1989, con electrones lanzados uno a uno.....</i>	19
Imagen 3 : <i>Esquema de una fuente lineal coherente. ....</i>	21
Imagen 4 : <i>Patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija. ....</i>	22
Imagen 5 : <i>Patrón de interferencia de una doble rendija. ....</i>	23
Imagen 6 : <i>Superposición de dos perturbaciones. ....</i>	24
Imagen 7 : <i>Patrón que se observa en una pantalla cuando electrones individuales pasan por una rendija. ....</i>	25
Imagen 8 : <i>Patrón esperable de electrones individuales pasando por una rendija doble. ....</i>	26
Imagen 9 : <i>Patrón que se observa en una pantalla cuando los electrones individuales pasan por una rendija doble.....</i>	26
Imagen 10 : <i>Concepto Spin T.1. ....</i>	37
Imagen 11 : <i>Concepto Spin T.2. ....</i>	37

Imagen 12 : <i>Concepto Spin T.3.</i> .....	38
Imagen 13 : <i>Extracto de T.2</i> .....	26
Gráfico 1 : <i>Cantidad de conceptos incluidos en la unidad el átomo y su núcleo para tres textos escolares analizados.</i> .....	33
Gráfico 2 : <i>Conceptos de mayor frecuencia en cada uno de los textos escolares.</i> .....	34
Gráfico 3 : <i>Tabla comparativa entre cantidad de conceptos totales versus conceptos cuánticos en los textos escolares.</i> .....	36

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este apartado es presentar a modo de introducción la estructura del presente trabajo de titulación.

La problemática que se aborda en las páginas siguientes, refiere a la enseñanza de la Mecánica Cuántica en el nivel de cuarto año medio a través de los textos escolares existentes en los establecimientos municipales, particulares y subvencionados del año 2015-2016. El contenido de los textos escolares obedecen a lo expuesto en el marco curricular y el programa de estudio establecidos por MINEDUC. De este modo se desarrolla una propuesta didáctica para la enseñanza de la dualidad onda-partícula a estudiantes de cuarto año medio en física común.

La propuesta didáctica se basa en la estrategia de Aprendizaje Activo de enseñanza y aprendizaje. En particular la metodología desarrollada para esta estrategia es Clases Interactivas Demostrativas – CID – la cual está propuesta por 8 pasos claramente definidos según el ciclo de enseñanza: Predicción, Observación, Discusión y Síntesis (PODS). En esta metodología “los estudiantes son guiados para que construyan su conocimiento, por medio de observaciones directas del mundo físico” (Mora, 2008); es decir que el logro del aprendizaje de los propios estudiantes está relacionado a su intervención directa, involucrando habilidad y competencias de los propios estudiantes.

Sobre el ciclo PODS Sokoloff (2006) comenta “Los estudiantes construyen su conocimiento, comparan predicciones, sus creencias cambian, el profesor es un guía, se fomenta el trabajo colaborativo, los resultados de los experimentos reales son observados en formas comprensibles, las herramientas tecnológicas permiten a los alumnos dirigir su práctica, pasan gran parte del tiempo observando, interpretando, discutiendo y analizando datos.”

El desarrollo de este documento contiene el contexto y la problemática que motivan la propuesta didáctica de la dualidad onda-partícula. Luego se presentan los distintos ejes que sustentan la elaboración en cuanto a la metodología y su vigencia hoy en la enseñanza de la Física en escuelas secundarias.

También se desarrollan los principales problemas Físicos involucrados a una de las características más influyentes de la Mecánica Cuántica, la dualidad onda-partícula. Así como sus principales dificultades en la enseñanza y aprendizaje de esta particularidad en estudiantes de enseñanza media e iniciales de bachillerato, así como en que se sustentan las propuestas

relacionadas a la Mecánica Cuántica en la escuela existentes a nivel Latinoamericano y Europeo. En este sentido, este trabajo de titulación es uno de los primeros que desarrolla la dualidad onda-partícula en contextos de aprendizaje activo para estudiantes de enseñanza media.

En un capítulo posterior se esclarece el cómo se obtuvo dicha propuesta y su evaluación por rubrica. Dicha propuesta contiene dos actividades en la “guía para el estudiante” y consta de “guía de orientaciones para el docente” para su ejecución.

Finalmente, se presentan los logros en base a los objetivos planteados y sus conclusiones según las sugerencias dadas por los pares evaluadores.

## CAPÍTULO 1

### CONTEXTO Y PROBLEMÁTICA

Actualmente, la vida cotidiana de los estudiantes está rodeada de tecnología cuyo funcionamiento se basa en principios físicos contemporáneos, tales como los provenientes de la nanotecnología o de la Mecánica Cuántica (QM), por ejemplo: el vestuario y pinturas a prueba de agua, los conocidos protectores de pantalla de celulares o los microprocesadores.

Los nuevos enfoques y paradigmas de enseñanza de las ciencias reconocen la importancia de las “concepciones alternativas” que tienen los estudiantes como condicionante de lo que pueden aprender, por lo que sugieren que el aprendizaje de los estudiantes en la escuela sea útil para la vida (Otero y Caldeira, 2005). En esta línea, diversas corrientes que promueven la llamada “Alfabetización científica” (Sabariego y Manzanares, 2006), sugieren que el aprendizaje debe ser contextualizado para que adquiera significado.

Dentro del panorama educativo nacional, encontramos en el marco curricular vigente de Física para 4º año de enseñanza media (MINEDUC, 2009) los contenidos relacionados con la física del átomo, y que por ende, podrían estar vinculados a la QM:

**Tabla 1:** *Contenidos mínimos obligatorios*

Contenidos Mínimos Obligatorios (CMO):
Fuerza y Movimiento
13. Descripción elemental de las fuerzas nucleares y electromagnéticas que mantienen unidos los protones y neutrones en el núcleo atómico para explicar la estabilidad de la materia y otros fenómenos.

*Fuente:* Elaboración propia.

Para el logro de estos CMO, se proponen los siguientes objetivos fundamentales:

**Tabla 2:** *Objetivos fundamentales*

Objetivos Fundamentales (OF):
1. Analizar y argumentar sobre controversias científicas contemporáneas relacionadas con conocimientos del nivel, identificando las razones posibles de resultados e interpretaciones contradictorios.
3. Evaluar las implicancias sociales, económicas, éticas y ambientales en controversias públicas que involucran ciencia y tecnología, utilizando un lenguaje científico pertinente.
4. Reconocer que cuando una observación no coincide con alguna teoría científica aceptada la observación es errónea o fraudulenta, o la teoría es incorrecta.
6. Comprender la importancia de las fuerzas nucleares y electromagnéticas a nivel del núcleo atómico para explicar diversos fenómenos.

*Fuente:* Elaboración propia.

En coherencia, el programa de estudio<sup>1</sup> propuesto por el MINEDUC para lograr los Objetivos Fundamentales y Contenidos Mínimos Obligatorios, sugiere para la Unidad: “El átomo y su núcleo” (página 80) los siguientes contenidos, aprendizajes esperados e indicadores de evaluación:

---

<sup>1</sup> [http://www.curriculumenlineamineduc.cl/605/articles-34460\\_programa.pdf](http://www.curriculumenlineamineduc.cl/605/articles-34460_programa.pdf)



**Tabla 3:** Relación de contenidos y aprendizajes esperados e indicadores de evaluación.

Aprendizajes Esperados	Contenidos	Indicadores de evaluación
<p>&gt; Describir el núcleo atómico y algunas de sus propiedades.</p> <p>&gt; Describir las fuerzas al interior del núcleo atómico y algunas consecuencias, como la estabilidad de la materia.</p>	<p>&gt; Las partículas del modelo estándar</p> <p>&gt; El núcleo atómico</p> <p>&gt; Espín y momento magnético nuclear</p> <p>&gt; Modelos del núcleo atómico</p> <p>&gt; Las fuerzas fundamentales</p> <p>&gt; Energía de enlace</p> <p>&gt; Fisión y fusión nuclear</p>	<p>&gt; Describen el desarrollo histórico que han tenido los modelos atómicos, destacando las ventajas y limitaciones que ha tenido cada uno</p> <p>&gt; Identifican la estructura y tamaño del núcleo atómico y los relacionan con su densidad</p> <p>&gt; Describen, cualitativamente, el espín y el momento magnético nuclear de un núcleo atómico</p> <p>&gt; Describen modelos del núcleo atómico, como el de la gota líquida y el de capas.</p> <p>&gt; Identifican las fuerzas fundamentales de la naturaleza (gravitacional, electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte) y señalan las situaciones en que predomina cada una.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Vemos además, que en el mismo documento (página 81) también se sugieren los siguientes conocimientos previos y conceptos claves para la unidad:

**Tabla 4:** *Conocimientos previos y conceptos claves.*

Conocimientos previos	Conceptos claves
Fuerza, energía, espectros de emisión, momento angular, modelos atómicos, órbitas electrónicas.	Átomo, partícula elemental, electrón, protón, neutrón, quarks, fuerzas nucleares fuertes, fuerzas nucleares débiles, modelos nucleares, espín, momento magnético nuclear, energía de enlace.

*Fuente:* Elaboración propia.

En base a lo propuesto por el programa de estudio podemos observar que la unidad 3: “El átomo y su núcleo” considera contenidos que están directamente vinculados a la QM. Sin embargo, los contenidos de nanotecnología antes mencionados están ausentes en el currículum escolar dificultando la contextualización del aprendizaje, y dejando en manos del profesor el desafío y responsabilidad de incorporar estos contenidos en el aula.

En este sentido, nos encontramos con escasos trabajos relacionados a la enseñanza de la QM para en nivel secundario nacional. Por ejemplo los datos recogidos de las tesis publicadas entre los años 2010-2014 de la carrera licenciatura/pedagogía en física y matemáticas<sup>2</sup>, arrojan que sólo un trabajo de titulación de 44 en total se centran en esta unidad, por lo que se considera apropiado y necesario desarrollar nuevas propuestas didácticas en torno al tema.

Uno de los posibles desafíos de enseñar QM en las escuelas radica en el hecho de que no existen experiencias *a priori* con el mundo cuántico, por ejemplo no podemos manipular un electrón y hacerlo chocar con otro como si fueran canicas. Esto por su parte, además, no le son familiares a quien intenta explicarlas. Por lo tanto, un conocimiento profundo por parte de quien las explica se hace imprescindible (Rosenfeld, 1973). Pues comprender los procesos que ocurren a nivel cuántico es sin duda algo complejo, ya que “... comprender las escalas no visibles al ojo humano implica la superación de obstáculos epistemológicos” (Reviglio, A; 2014).

---

<sup>2</sup> <http://fisica.usach.cl/carreras/pedagogia-en-fisica-y-matematica-licenciatura-en-educacion-de-fisica-y-matematica>

Contrario al mundo clásico, y sus variantes, que ofrecen un universo de ejemplos en la vida cotidiana y así, un sinfín de analogías para acercar aquello que se desea explicar a la persona que intenta comprenderlo.

Ciertamente, siempre es posible reducir la QM a un asunto operacional y a un conjunto de axiomas cuya comprensión usualmente ocurre cuando ya, quien lo estudia, ha logrado algún grado de comprensión del objeto que estudia. Parafraseando a Richard Feynman, diríamos que uno nunca entiende la mecánica cuántica, sino que se acostumbra a ella.

Dada la presencia innegable de ciertos tópicos de Mecánica Cuántica en el currículum escolar, y la alta complejidad que su comprensión supone, se hace necesario reflexionar sobre su enseñanza en la escuela.

### **1.1. JUSTIFICACIÓN**

La Mecánica Cuántica nos ofrece, junto con la relatividad especial, uno de los ejemplos históricos del cómo fue necesario cambiar de forma radical el modo de pensar de una época.

Desde el punto de vista histórico, ofrece sin duda uno de los ejemplos más notables de cómo una generación de jóvenes científicos fue capaz de pensar con audacia y navegar en lo desconocido (Navarro, 2012). Memorable es la fotografía tomada en el congreso Solvay en Octubre de 1933, que reunía desde principios del siglo XX en Bruselas a los más grandes físicos de la época (Schaposnik, 2014).

Un nuevo mundo, con nuevas formas de trabajo que han aumentado la productividad se ha instalado por la relevancia de los proyectos científicos y tecnológicos, a raíz de la rapidez de las nuevas revoluciones científicas al alero de la I y II guerra mundial; nuevos materiales, nanotecnología, digitalización de la información, telefonía móvil, nuevos dispositivos de almacenamiento, televisión digital, internet, etc. están presentes en nuestra vida cotidiana (Marco-Stiefel, 2002).

Uno de los cambios que contribuyeron al cambio de pensamiento, contenido en la teoría cuántica, es la dualidad onda-partícula. La enseñanza de la dualidad onda-partícula implica un cambio paradigmático implícito, ya que los objetos microscópicos no son ni ondas ni partículas puesto que la dualidad onda-partícula ilustra fenómenos que se explican mejor desde el punto

de vista ondulatorio mientras otros se explican mejor desde el punto de vista corpuscular (Angarita y Pino, 2016; Segura, Nieto y Segura, 2012).

Poder reconstruir uno de los pensamientos que ayudaron al inicio a la Mecánica Cuántica, tanto en su contexto histórico como en su significado físico es uno de los desafíos que requieren estrategias de enseñanza y aprendizaje centrados en los estudiantes, según los nuevos parámetros educativos que incorporan la alfabetización científica, que postulan que los conocimientos han de ser contextualizados según la realidad de los estudiantes y no de contenidos “vacíos” como las estrategias basadas en un modelo discípulo - maestro.

## 1.2. OBJETIVOS

En base a los antecedentes del contexto y la justificación, el presente trabajo tiene por objetivo general:

- Diseñar una propuesta didáctica basada en la metodología *Clases Interactivas Demostrativas* que permita desarrollar colaborativamente el aprendizaje de la dualidad onda-partícula.

Para alcanzar dicho objetivo se plantean como objetivos específicos:

- a) Caracterizar la enseñanza de tópicos de mecánica cuántica en libros de texto de físicas para el nivel 4° medio, en la unidad “El átomo y su núcleo”.
- b) Diseñar recursos y preguntas que orienten el aprendizaje de los estudiantes en torno a la dualidad onda-partícula.
- c) Elaborar una guía de orientaciones al docente que facilite la ejecución de la propuesta didáctica.
- d) Construir una propuesta didáctica que permita desarrollar colaborativamente el aprendizaje de la dualidad onda-partícula, apoyado de actividades experimentales y preguntas sugeridas; y recursos digitales.
- e) Validar la propuesta didáctica para su futura implementación.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

A continuación se presentan conceptos básicos necesarios para comprender la elaboración de la propuesta didáctica de la dualidad onda-partícula basada en la metodología Clases Interactivas Demostrativas (CID).

#### **2.1. ALFABETIZACIÓN CIENTÍFICA**

La alfabetización científica se refiere a la “apropiación de conocimientos, habilidades y actitudes básicos respecto de la ciencia, la tecnología y sus relaciones con la sociedad” (Losada, 2010).

Según la OCDE a través de su proyecto PISA 2006 “la alfabetización científica tiene su origen en la consideración de lo que los estudiantes de 15 años deberían saber, valorar y ser capaces de hacer a modo de una “preparación para la vida” en la sociedad moderna. Son centrales para esta definición y la evaluación de la alfabetización científica, las competencias que son características de la ciencia y del quehacer científico” (traducido de *Draft PISA 2015 Science Framework*, 2013).

Por competencias, según el Instituto Nacional para la Evaluación de la educación (INEE), nos referimos a “un sistema de acción complejo que abarca las habilidades intelectuales, las actitudes y otros elementos no cognitivos, como motivación, valores y emociones, que son adquiridos y desarrollados por los individuos a lo largo de su vida y son indispensables para participar eficazmente en diferentes contextos sociales” (OCDE, s.f).

Las competencias, según OCDE (2015), para la alfabetización científica son:

1. Explicar fenómenos científicamente: Reconocer, ofrecer y evaluar explicaciones para un rango de fenómenos naturales y tecnológicos.
2. Evaluar y diseñar la investigación científica: Describir y evaluar investigaciones científicas y proponer formas de abordar preguntas científicamente.
3. Interpretar los datos y la evidencia científicamente: Analizar y evaluar datos, justificaciones y argumentos en una variedad de representaciones y obtener conclusiones científicas apropiadas.

Para lograr aplicar estas competencias, se necesita aprender tres tipos de conocimiento científico. Primero, se necesita saber del contenido de la ciencia (conceptos, ideas y teorías de la ciencia), a esto se le denomina **conocimiento de contenido**. Segundo, se necesita estar familiarizado con los procedimientos y estrategias usados en todas las formas de la indagación científica, en otras palabras, **conocimiento procedimental**. Finalmente, se debe entender cómo se justifican y garantizan las ideas científicas (Preguntas, observaciones, teorías, hipótesis, modelos, y argumentos), es decir, **conocimiento epistémico** (OCDE, 2015).

Ahora bien, para lograr personas alfabetizadas científicamente es necesario también atender dos aspectos relacionados a una efectiva internalización de las competencias. Por un lado, el **contexto**, que se refiere a que todo conocimiento científico (de contenido, procedimental o epistémico) tiene que ser debidamente contextualizado según la realidad personal, local, nacional y global de cada estudiante. Por otra parte, la **actitud** que tome cada estudiante al momento de aproximarse a la ciencia va “a determinar su nivel de interés, mantener su compromiso y motivarlo a tomar acción” (Schibeci, 1984), siendo una parte esencial de su proceso de aprendizaje. Es decir, alfabetizar científicamente es contrario a implementar un recetario de procedimientos mecánicos, se debe atender a la realidad de cada estudiante, tal como lo advierte el marco de evaluación de OCDE 2015:

A continuación, la tabla 1.0 distingue las habilidades de cada competencia:

**Tabla 5:** Competencias relacionadas a las habilidades según la alfabetización científica.

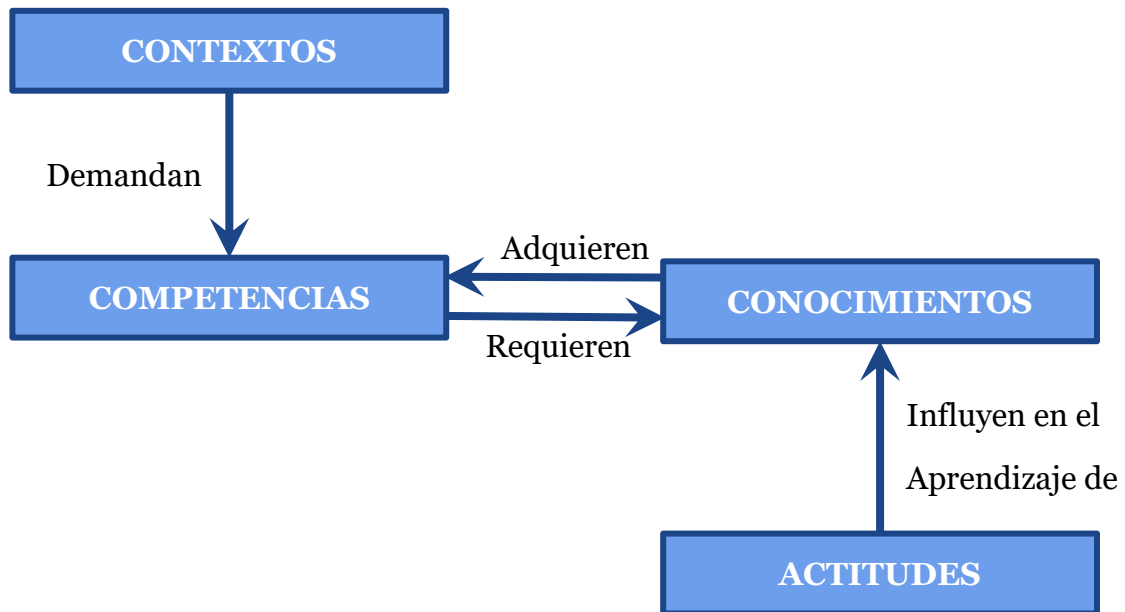
Competencia	Habilidades
Explicar fenómenos científicamente	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Recordar y aplicar conocimientos científicos adecuados</li> <li>● Identificar, utilizar y generar modelos explicativos y representaciones</li> <li>● Hacer y justificar predicciones adecuadas</li> <li>● Proponer hipótesis explicativas</li> <li>● Explicar las implicancias potenciales del conocimiento para la sociedad</li> </ul>
Evaluar y diseñar la investigación científica	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Identificar la pregunta analizada en</li> </ul>

	<p>un estudio científico dado</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Distinguir preguntas que son posibles de investigar científicamente</li> <li>● Proponer una forma de explorar una pregunta dada científicamente</li> <li>● Evaluar maneras de explorar una pregunta dada científicamente</li> <li>● Describir y evaluar una gama de formas que los científicos usan para asegurar la confiabilidad de datos y la objetividad y generalización de explicaciones</li> </ul>
<p>Interpretar los datos y la evidencia científicamente</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Transformar datos de una representación a otra</li> <li>● Analizar e interpretar datos y obtener conclusiones adecuadas</li> <li>● Identificar los supuestos, evidencias y razonamientos en textos relativos a la ciencia</li> <li>● Distinguir entre argumentos que están basados en evidencia científica y teoría; y los que están basados en otras consideraciones</li> <li>● Evaluar argumentos científicos y evidencia de distintas fuentes</li> </ul>

Fuente: Extraído de *Draft PISA 2015 Science Framework*, 2013, p.15-16.

Así, la alfabetización científica puede ser caracterizada en base a cuatro aspectos interrelacionados: competencias, conocimiento, contexto y actitudes. En la siguiente imagen se representa esta relación:

Imagen 1 1: Relación de los elementos que caracterizan la alfabetización científica.



Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior, se infiere entonces “que la ciencia puede modificar profundamente a la sociedad y a los individuos”(OCDE, s.f, p.17) que la componen, mostrando la necesidad de una formación de competencias hacia la cultura científica a través de la educación. Esto fue un promotor, en principio, de la alfabetización científica como objetivo fundamental en la enseñanza de las ciencias (Porlán, 1998; Unesco-ICSU, 1999). *“Si bien la adquisición de conocimientos específicos es importante en el aprendizaje escolar, la aplicación de esos conocimientos en la vida adulta depende rigurosamente de la adquisición de conceptos y habilidades más amplios”* OCDE (2006).

Alfabetizar científicamente se ha transformado en una necesidad y en una herramienta primordial a la hora de enseñar ciencias en las escuelas. Este asentimiento lo han llevado adelante distintos autores del trabajo de la didáctica de las ciencias a nivel mundial, gobiernos asociados a la OCDE y diversas organizaciones gubernamentales (Acevedo, Vázquez y Manassero, 2003; Gil y Vilches, 2001; Maiztegui, 2002; National Science Education Standards, 1996; OEI).



De este modo, la alfabetización científica equivale a la “formación de ciudadanos responsables que posean capacidad crítica, es decir que puedan evaluar la información... y que sean capaces de mantener opiniones argumentadas, por ejemplo a la hora de tomar decisiones” (Jiménez, Álvarez y Lagos, 2005). Es decir, la educación en la actualidad requiere formar personas con habilidades y competencias que requieren modelos educativos centrados en los estudiantes y la interacción entre ellos.

## **2.2. MODELOS EDUCATIVOS CENTRADOS EN EL ESTUDIANTE**

Los enfoques alternativos a la enseñanza tradicional de las ciencias descartan los modelos tradicionales de aprendizaje por transmisión (magistral, expositivo, centrado en el contenido) que unánimemente es y han sido combatidos por los especialistas e investigadores en enseñanza de las ciencias por modelos centrados en el estudiante que propician el aprendizaje colaborativo: por descubrimiento, basada en el uso de problemas y constructivista (Campanario y Moya, 1999).

Actualmente, se considera como “aprendizaje activo” aquel caracterizado por estar centrado en el estudiante y sus procesos de aprendizaje, que se consigue con la motivación, implicación, atención y trabajo constante (Esteba, 2013).

El Center for Research on Learning and Teaching de la Universidad de Michigan, define el aprendizaje activo como un proceso en el cual los estudiantes realizan actividades tales como: lectura, discusión o resolución de problemas que promueven el análisis, síntesis y evaluación del contenido de la clase.

Otros autores plantean considerar el aprendizaje activo de la física “como el conjunto de estrategias y metodologías para la enseñanza-aprendizaje de la física, en donde los alumnos son guiados a construir su conocimiento de los conceptos físicos mediante observaciones directas del mundo físico.” (Mora, 2008; Orozco, 2012).

Para promover este tipo de aprendizajes han surgido diversas estrategias para enseñanza de la física tales como: instrucción por pares, aprendizaje basado en problemas, clases interactivas demostrativas, entre otras (Hernández, Tecpan y Osorio, 2015). Todas ellas se inscriben en lo que se pretende que los estudiantes realicen: Actividades que los mantengan intelectual y físicamente comprometidos con su aprendizaje (Benegas y Villegas, 2013).

Algunas características del aprendizaje activo, definidas por Sokoloff y Thornton (2004) son:

- Enseña a aprender
- El profesor es una guía del proceso de aprendizaje
- El laboratorio se usa para aprender conceptos
- Estimula la colaboración entre estudiantes
- Los estudiantes tienden a cambiar sus creencias cuando ven las diferencias entre ellas y sus propias observaciones
- Los estudiantes construyen su conocimiento realizando actividades. La observación del mundo real es la autoridad y la principal fuente de conocimiento
- Utiliza un ciclo de aprendizaje que desafía a los estudiantes a comparar sus predicciones y creencias con el resultado de experimentos y con sus razonamientos.

Como vemos, las estrategias de aprendizaje activo en algunas de sus formulaciones intentan reproducir el proceso científico en el aula, desarrollando habilidades de razonamiento útiles en la física, de manera tal que promover el aprendizaje activo en los estudiantes es variada.

Por último, para la ejecución del aprendizaje activo se debe tomar en cuenta los siguientes elementos (Serrano, 2013):

a.- El aprendizaje activo es aquel aprendizaje que precisa, como prerrequisito fundamental, la implicación, atención, participación y esfuerzo del estudiante.

b.- El profesor cambia alguna de sus funciones con la incorporación de este tipo de aprendizaje, pero su importancia en el proceso educativo sigue siendo de total relevancia. Algunas de las funciones que deberá desempeñar son: orientar, ayudar, proponer nuevas actividades, guiar el aprendizaje, planificar las sesiones de forma diferente, clarificar dudas, exponer información, acompañar al estudiante en la adquisición de nuevos aprendizajes, capacidades y habilidades.

c.- El aprendizaje activo supone un aprendizaje significativo. El estudiante establece una relación lógica entre sus conocimientos previos y el nuevo aprendizaje, asimilando e incorporando el nuevo conocimiento a sus esquemas cognitivos y teniendo la capacidad de generalizar a otros contextos. Además, puede llegar a suponer un aprendizaje relevante que produzca en el estudiante la reestructuración de sus esquemas mentales y la adquisición de nuevos y más complejos conocimientos y habilidades alejadas de su realidad más cercana, entre otros aspectos.

d.- El aprendizaje activo debe incorporarse paulatinamente en el aula. No podemos cambiar nuestra forma de enseñar si el grupo no está acostumbrado a esta forma de trabajar, puesto que podríamos crear bloqueos, rechazos, frustración y obstáculos por parte de los estudiantes.

e.- El aprendizaje activo requiere una planificación por parte del profesor, y una coherencia en su desarrollo. Los objetivos, actividades y posterior evaluación deberán seguir una misma línea. No podemos evaluar como “conocimientos”, objetivos que se han trabajado y alcanzado a través de actividades de síntesis.

f.- Es importante alternar y utilizar diferentes actividades a lo largo del curso. Clases expositivas, aprendizaje cooperativo, aprendizaje activo. Cada una de ellas son instrumentos que utilizamos según el período y/o contexto ya que el propósito es ayudar a los estudiantes a adquirir los diferentes conocimientos a través de diversas vías o alternativas.

### **2.2.1. CLASES INTERACTIVAS DEMOSTRATIVAS: UNA METODOLOGÍA DEL APRENDIZAJE ACTIVO PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA.**

Una de las metodologías de enseñanza para el aprendizaje activo es *Clases Interactivas Demostrativas* – ILDs por sus siglas en inglés - (Sokoloff & Thornton, 2004; Huber, 2008) que propone “guiar al estudiante en la construcción de su propio conocimiento a través de la observación directa del mundo real” (Benegas y Villegas, 2013) transformando las clásicas clases expositivas de estudiantes pasivos a estudiantes activos.

Esta es una estrategia que ha logrado demostrar efectividad en el entendimiento conceptual (Hake, 1998) aplicable al aprendizaje de la física. El ciclo de aprendizaje de CID, llamado PODS, se puede representar en los siguientes pasos: Predicción, Observación, Discusión y Síntesis. Donde cada CID tiene un procedimiento a seguir.

La elección de experimentos que conforman una CID debe tener los siguientes aspectos básicos. La secuencia debe comenzar con algo que los estudiantes sepan, ya que sirve de base para los sucesivos aprendizajes y, en segundo lugar, las secuencias se deben presentar de manera que los estudiantes comprendan la experiencia y los aparatos utilizados para obtener sus resultados.

La CID tiene sus bases teóricas en la construcción del conocimiento de los principios de la enseñanza de la física: constructivista, contextual, de cambio, de la función de distribución y del aprendizaje social. Todos ellos enfocados en las necesidades de los estudiantes, en sus procesos de aprendizaje. Todos estos principios son sustento también en la estrategia de aprendizaje activo.

De lo anterior, McDermott (2001) plantea los siguientes lineamientos para guiar el proceso de enseñanza:

- a.- Para evaluar el aprendizaje son esenciales preguntas que requieran de un razonamiento cualitativo y de explicaciones verbales. Este tipo de preguntas constituyen a su vez una estrategia efectiva para el aprendizaje.
- b.- Los estudiantes necesitan una práctica sostenida para interpretar el formalismo físico y relacionarlo con el mundo real.
- c.- Las dificultades conceptuales persistentes deben ser atacadas explícitamente en múltiples contextos.
- d.- Los estudiantes deben participar en el proceso de construcción de modelos cualitativos y en la aplicación de estos modelos para predecir y explicar los fenómenos del mundo real.
- e.- El razonamiento científico debe ser cultivado expresamente.
- f.- Los estudiantes deben estar intelectualmente activos en el proceso de aprendizaje para desarrollar una comprensión funcional.

Por último, para lograr el objetivo de transformar las clases de un ambiente pasivo a un ambiente con estudiantes involucrados activamente en su proceso de aprendizaje, Sokoloff & Thornton (2004) proponen seguir el siguiente procedimiento para desarrollar la CID.

**Tabla 6:** Procedimiento de 8 pasos para las Clases Interactivas Demostrativas.

<ol style="list-style-type: none"><li>1° El docente describe el experimento y lo realiza sin tomar los datos ni proporcionar el resultado del mismo.</li><li>2° Los estudiantes registran su predicción individual en la hoja de predicciones.</li><li>3° Los estudiantes discuten sus predicciones con sus 2 ó 3 compañeros más cercanos.</li><li>4° El docente obtienen las predicciones más comunes de toda la clase.</li><li>5° Los estudiantes registran la predicción final en la hoja de predicciones.</li><li>6° El docente realiza la demostración mostrando claramente los resultados, en general ayudado por el equipo de toma de datos en tiempo real, analiza y proyecta los mismos a toda la clase con el equipamiento audiovisual.</li><li>7° Se pide a algunos estudiantes que describan los resultados y los discutan en el contexto de la demostración. Los estudiantes registran estos resultados en la hoja de resultados.</li><li>8° Los estudiantes (o el docente) discuten situaciones físicas análogas con diferentes características superficiales, pero que responden al mismo concepto.</li></ol>
--

Fuente: Sokoloff & Thornton, 2004.

El procedimiento anteriormente descrito fue utilizado para diseñar la propuesta didáctica que en este trabajo de titulación se propone. Es importante destacar que dentro de este procedimiento se encuentra implícito el ciclo de aprendizaje PODS. A continuación se abre el capítulo correspondiente a la temática en particular de la propuesta.

### **2.3. MECÁNICA CUÁNTICA Y FENÓMENOS DE INTERFERENCIA**

*“Los fotones, los electrones, etc., están todos locos, pero afortunadamente para los físicos todos comparten la misma locura: la dualidad onda-partícula.” - Richard Feynman.*

La observación de fenómenos físicos en un sistema cualquiera, requiere poder describir “las interacciones mutuas y los movimientos de los objetos materiales en el espacio y tiempo” (Gamow, 1958, p.100). Es decir, implica poder formular las leyes, reglas y conocer los principios físicos que obedecen dichas interacciones y movimientos de estos objetos.

La mecánica cuántica es la base para la comprensión del mundo subatómico y ha contribuido enormemente y con éxito a la descripción de la naturaleza durante el siglo XX (Tipler y Mosca, 2005).

La Mecánica Cuántica nos permite describir los fenómenos físicos a una escala del orden del nanómetro esto es:  $1[nm] = 10^{-9}[m] = 10^{-7}[cm]$ <sup>3</sup>, unas 10 millonésimas partes de 1 centímetro, lo que equivale a un objeto mil veces más pequeño que, por ejemplo, el tamaño de las bacterias. Los objetos que observamos en el mundo subatómico difieren enormemente no sólo en tamaño, sino que en su comportamiento y propiedades en relación con los objetos que observamos en el mundo cotidiano.

Experimentos como el efecto fotoeléctrico en 1887, los rayos catódicos de G. P. Thomson en 1897, la dispersión de Compton en 1923, la observación de la difracción y de la interferencia de los electrones en los experimentos de C.J Davisson y L. H. Germer en 1927 (en el primer cuarto del siglo XX, período denominado física moderna), fueron parte de los primeros impulsos del desarrollo de la mecánica cuántica (Heisenberg, 1930; Tipler y Mosca, 2005).

Pero, ¿Qué mostraban estos experimentos, que comprometió a los científicos de la época a desarrollar una nueva teoría física con leyes y principios distintos a la física clásica?

El mundo cotidiano que nos provee de las experiencias más directas está bien descrito por la física Newtoniana. Sin embargo los electrones, por ejemplo, mostraron que al pasar a través de un obstáculo con dos rendijas exhiben un patrón de interferencia (1929) -- al incidir sobre una pantalla -- como los que se producen en experiencias con ondas. De esta manera, se observó que los electrones manifiestan un comportamiento dual: corpuscular u ondulatorio según sea el experimento que se realice con ellos. La extensión de esta idea a todos los objetos materiales fue postulada por De Broglie en el año 1924.

Hasta entonces este fenómeno de interferencia sólo se observaba con la luz, cuya naturaleza corpuscular, por otro lado, fue rescatada por Einstein en 1905 para explicar el efecto fotoeléctrico. Esta hipótesis -- comprobada experimentalmente -- le valió el Premio Nobel en 1921.

El efecto túnel -- otro experimento "paradojal" que sustentó la nueva teoría -- que consiste en dirigir un electrón hacia una barrera de potencial, donde existe la probabilidad no nula de

---

<sup>3</sup> Y más pequeños aún, tal vez hasta objetos del orden de la llamada escala de Planck.

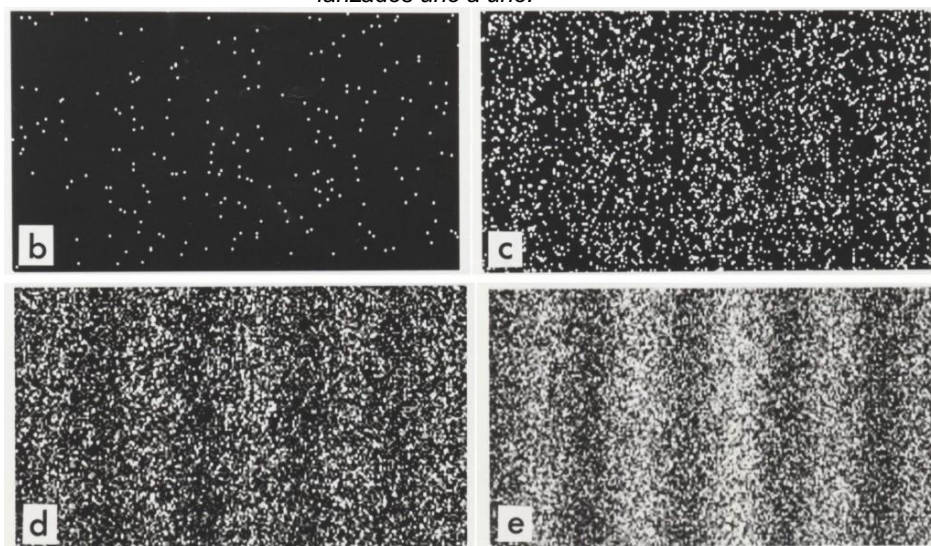
encontrar al electrón al otro lado de la barrera de potencial (cuando la energía del electrón es menor que la altura de la barrera) fue descubierto por Friedrich Hund en 1926 y aplicado matemáticamente para la desintegración alfa por George Gamow en 1928.

Estas observaciones de, por ejemplo, el comportamiento dual de “pequeñas” partículas, necesitaban de formulaciones matemáticas que pudieran describir de manera consistente lo observado en los laboratorios. Uno de estos cambios radicales en la descripción de lo observado fue el abandonar la idea de que un estado físico de una partícula queda completamente determinado si conocemos su posición y momentum (y por lo tanto abandonar la idea de trayectoria en el sentido de la mecánica clásica, por ejemplo) y reemplazarlo por una función  $\Psi(x, y, z, t)$ , denominada *función de onda*, la cual contiene toda la información accesible de dicha partícula.

Esta función de onda, sin embargo, no describe la perturbación de algún medio material o de un campo, sino que tiene interpretación en términos de probabilidad: su módulo al cuadrado ( $|\Psi(x, y, z, t)|^2$ ) define una densidad de probabilidad. Así, la probabilidad de encontrar a la partícula en cierto estado (definido por la función de onda) en una región del espacio de tamaño  $V$  (infinitesimalmente pequeña) es  $V * |\Psi(x, y, z, t)|^2$ .

Para describir la dualidad onda-partícula consideramos el experimento de difracción de electrones en una rendija doble. Sus resultados los podemos observar en la figura 2:

**Imagen 2 1:** *Secuencia de resultados del experimento de Tonomura en Hitachi, 1989, con electrones lanzados uno a uno.*



Fuente: Licencia Creative Commons de Wiki.

Para describir la propagación de los electrones individuales debemos utilizar la teoría ondulatoria. “El detector de captura de electrones en posiciones diferentes durante un tiempo lo bastante largo, en todos los casos se encuentra un típico patrón de interferencias de ondas para los conteos por minuto o la probabilidad de llegada de los electrones, la cual está determinada por el hecho de encontrar la intensidad de dos ondas de materia que interfieren.” (Serway, 2010, p. 180).

“En la Mecánica Cuántica, la dualidad onda-partícula se ilustra cómo (...) determinados fenómenos que se explican mejor desde el punto de vista ondulatorio mientras otros se explican mejor desde el punto de vista corpuscular” (Segura, et. al, 2012).

El principio de incertidumbre – una propiedad de la naturaleza cuántica de los sistemas físicos – está íntimamente relacionada con esta descripción ondulatoria de partículas. En efecto, para medir la posición de un objeto debemos interactuar con dicho objeto a través de, por ejemplo, luz de longitud de onda  $\lambda$ , podemos medir la posición  $x$  sólo hasta una incertidumbre  $\Delta x$  del orden de  $\lambda$  debido a los efectos de difracción. Si utilizamos luz de longitud de onda  $\lambda$ , los fotones tienen un momento lineal  $h/\lambda$ .

Cuando estos fotones se dispersan luego de la interacción con el objeto en estudio, el momento lineal del objeto se modifica también (debido a la dispersión), pero no se puede tener información sobre dicha modificación y, en tal sentido, es *incontrolable*. La incertidumbre en la medida del momento lineal  $\Delta p_x$  del objeto introducido al intentar observar, es del orden de  $h/\lambda$ . De este modo, en palabras de su propio autor, el principio de incertidumbre se enuncia como:

*“(...) La desviación respecto a la física precedente puede simbolizarse en las llamadas relaciones de indeterminación. Se demostró que no es posible determinar a la vez la posición y la velocidad de una partícula atómica con un grado de precisión arbitrariamente fijado. Puede señalarse muy precisamente la posición, pero entonces la influencia del instrumento de observación imposibilita hasta cierto grado el conocimiento de la velocidad; e inversamente, se desvanece el conocimiento de la posición al medir precisamente la velocidad; en forma tal, que la constante de Planck constituye un coto inferior del producto de ambas imprecisiones. Esta formulación sirve desde luego para poner de manifiesto con toda claridad que a partir de la mecánica newtoniana no se alcanza gran cosa, ya que para calcular un proceso mecánico, justamente, hay que conocer a la vez con precisión la posición y la velocidad en determinado instante, es decir:  $\Delta p_x \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$  ” (Heisenberg, 1955).*



La interferencia y difracción de la luz no eran fenómenos nuevos para los físicos de la época, por el contrario ya era una afirmación por el experimento de la doble rendija de Thomas Young en 1801. En la sección siguiente se estudian estos fenómenos con mayor detalle.

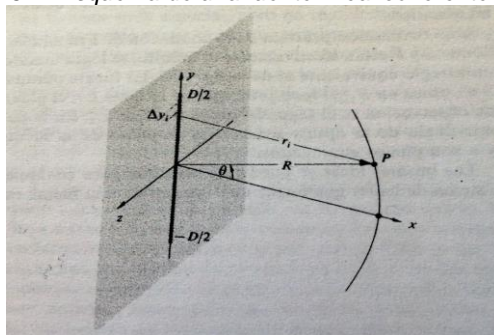
### 2.3.1. DIFRACCIÓN E INTERFERENCIA DE LA LUZ

El efecto llamado difracción es una característica general de los fenómenos ondulatorios que ocurre donde quiera que una porción de un frente de onda, sea sonido, onda material o luz, es obstruido de alguna manera. El primer estudio detallado que se publicó sobre esta desviación de la luz de su propagación rectilínea fue de Francesco Grimaldi cuyo efecto lo llamó “*diffraction*” (Hecht-Zajac, 1986).

La difracción de Fraunhofer o de campo lejano refiere a un obstáculo que contiene una abertura pequeña (dimensiones comparables con la longitud de onda del objeto que pasa por él) y que está iluminada por ondas planas de una fuente puntual. Cuando se observa la difracción producida por un obstáculo, proyectando sobre una pantalla a una distancia muy grande del propio objeto, la distribución de intensidades observada en la pantalla se conoce como *patrón de difracción de Fraunhofer* (Barbero, Sf).

Consideremos el esquema presentado en la figura 2. Donde ahora el punto de observación está muy distante de la fuente lineal coherente y  $R \gg D$ . Según el principio de Huygens, “cada punto en el frente de onda se puede visualizar como una fuente de onditas esféricas secundarias” (Hecht-Zajac, 1986, pp 358). Puesto que por hipótesis, el haz incidente es una onda plana y la rendija se encuentra perpendicular a él, todas estas ondas secundarias se encuentran en fase.

**Imagen 3 1:** Esquema de una fuente lineal coherente.



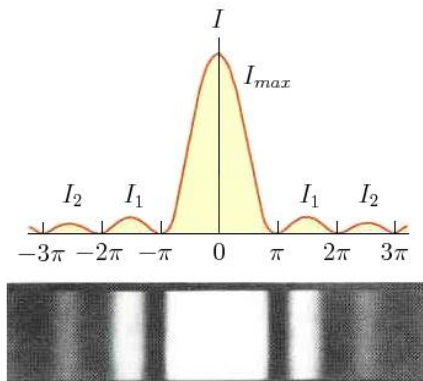
Fuente: Extraído de Hecht-Zajac, 1986. Pp. 357.

Ahora, considerando el esquema de la figura 3, en el centro de la pantalla (punto 0) aparecerá un máximo de intensidad, porque todos los focos secundarios que forman la rendija son equidistantes y las ondas secundarias que originan llegan en fase. A medida que nos alejamos de ese punto central, hacia un lado y otro, hay desfases debido a la diferencia de camino óptico en las ondas secundarias que alcanzan cada punto y en consecuencia aparecen variaciones en la intensidad. Consideremos seguidamente el rayo que forma un ángulo  $\theta$  (ver figura 2) con la dirección perpendicular a la rendija y la pantalla, cuya trayectoria es la hipotenusa  $R$  de un triángulo rectángulo. Llamando  $I_0$  a la intensidad del máximo central, si la rendija está lo suficientemente lejos de la pantalla, puede demostrarse que la intensidad de la luz difractada según dirección dada por el ángulo  $\theta$  es:

$$I(\theta) = I(0) \left( \frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right)^2,$$

$$\text{con } \beta \equiv (kD/2)\text{sen}\theta.$$

**Imagen 4 1:** Patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija.

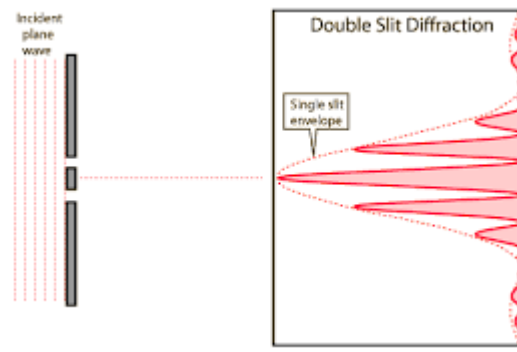


Fuente: <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.cl>

La interferencia óptica se puede decir que es una interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante, la cual se desvía de la suma de las irradiancias componentes. En una escala macroscópica podríamos considerar el problema de la interacción de las ondulaciones de la superficie en una tina de agua. Nuestra experiencia diaria con este tipo de situación nos permite visualizar una distribución compleja de perturbaciones. Puede haber regiones en donde dos (o más) ondas se hayan superpuesto, anulándose mutuamente o incluso completamente. Más aún, otras regiones podrían existir en el patrón, donde los valles o crestas resultantes fueran más pronunciados que los de cualquiera de las ondas constitutivas.

Después de superponerse, las ondas individuales se separan y continúan completamente inafectadas por su encuentro previo (Hecht-Zajac, 1986, p. 293).

**Imagen 5 1:** Patrón de interferencia de una doble rendija.



Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

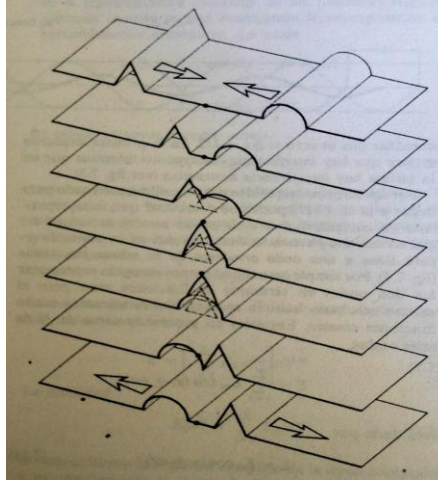
Comparando la 4 con la 5, podemos observar que no hay distinción física significativa entre *interferencia* y *difracción*. Sin embargo, se ha vuelto común, aunque no siempre apropiado, hablar de interferencia cuando se está considerando la superposición de solamente unas pocas ondas y difracción cuando se está tratando un gran número de ondas. Aun así, nos referimos a la interferencia de haces múltiples en un contexto y a la difracción por una red en otro (Hecht-Zajac, 1986, p. 350).

Finalmente, los fenómenos de difracción e interferencia, ambos, obedecen al principio de superposición.

### 2.3.1. PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

Esta propiedad postula que la perturbación resultante en cualquier punto de un medio es la suma algebraica de sus ondas constitutivas separadas (ver imagen 6). Ahora sólo nos interesa los sistemas lineales donde el principio de superposición es aplicable. Téngase en mente, sin embargo, que ondas de amplitud grande, bien sean ondas de sonido u ondas de una cuerda, pueden generar una respuesta no lineal. Por ejemplo el haz de un láser de alta intensidad enfocado (donde el campo eléctrico podría ser tan alto como  $10^{10}$  V/cm) puede generar efectos no lineales. Por comparación, el campo eléctrico asociado con la luz del sol aquí en la tierra tiene una amplitud de alrededor de  $10^{10}$  V/cm (Hecht-Zajac, 1986, p. 206).

**Imagen 6 1:** Superposición de dos perturbaciones.



Fuente: Extraído de Hecht-Zajac, 1986. Pp. 206.

Los electrones al pasar uno a uno por una doble rendija, del orden de la longitud de onda de dicha partícula, obedecen a este mismo principio como veremos a continuación.

### 2.3.2. INTERFERENCIA DE ELECTRONES

El electrón es una partícula subatómica elemental que no tiene componentes o subestructura, es decir, no puede “romperse” en partículas más pequeñas. En la teoría del modelo estándar, los electrones corresponden a la familia de los leptones. Los electrones tienen una masa definida ( $9.2095 \times 10^{-31} \text{Kg}$ ), carga eléctrica ( $-1.602177 \times 10^{-19} \text{C}$ ) y spin ( $\pm \frac{1}{2}$ ). “El electrón no fue descubierto hasta 1897, cuando JJ Thomson descubrió la partícula en su investigación con tubos de rayos catódicos. No fue hasta 1909 cuando el físico experimental Robert Millikan calculó la masa del electrón en su clásico experimento de la gota de aceite” (traducido de: <http://physics.about.com>).

Ahora bien, si intentamos reproducir el mismo experimento con el cual obtenemos los patrones de interferencia de la luz, pero ahora con electrones individuales, es decir, uno a uno por cada una de las rendijas, observaremos patrones contrarios a lo que esperaríamos ver de una partícula newtoniana cualquiera. Veamos que esperaríamos si estos electrones (que hemos dicho, son partículas en el sentido de la mecánica de Newton) pasan a través de la rendija (y por lo tanto la dimensión de la rendija ha de ser mayor que el tamaño de estas partículas) sin

interactuar con los bordes de dicha rendija, entonces esperaríamos que continuaran en línea recta e incidieran en la pantalla creando un punto (de máxima intensidad) justo frente a la rendija.

Algunos de los electrones, por otra parte, tendrán interacción con los bordes de la rendija y serán dispersados. La interacción con el borde de la rendija puede ser, incluso, de naturaleza eléctrica (dado que los electrones tienen carga eléctrica y el material que obstruye el paso de los electrones está compuesto también por partículas cargadas) y, por lo tanto, la interacción con los bordes no necesariamente es una interacción de contacto. Como sea, se espera que un cierto número de electrones sea dispersado y no llegue al punto central (que está justo en frente de la rendija).

Esperamos, entonces, que el número mayor de electrones llegue al centro de la pantalla (es decir al punto que está justo en frente de la rendija) y esperamos una señal menos intensa en torno a dicho punto. Como sea, la distribución de los electrones debe ser una función continua de la posición (sobre la rendija). La siguiente figura ilustra el patrón que observaríamos en la pantalla, si dejamos pasar electrones uno a uno por una rendija simple.

**Imagen 7 1:** Patrón que se observa en una pantalla cuando electrones individuales pasan por una rendija.

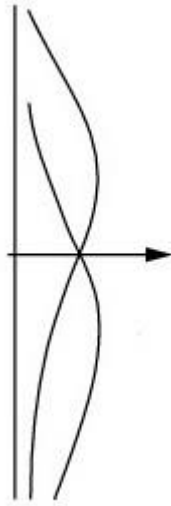


Fuente: [http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III\\_01.html](http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html)

Continuando con el experimento, ahora debemos hacer incidir electrones uno a uno pero por una rendija doble. Los argumentos para el caso de una rendija se aplican de igual forma para cada una de las rendijas por separado y, por lo tanto, esperamos tener una distribución de electrones sobre la pantalla que sea la suma de las distribuciones individuales de cada rendija. Note que, para un caso idealmente simétrico, esperamos que la mitad de los electrones pase por una rendija y, la otra mitad por la otra, suponiendo que un pequeño número de éstos queda

retenido por el material entre las rendijas o bien, es dispersado, pero no logra pasar por ninguna de las ranuras. Nótese también que, este argumento es cierto incluso si los electrones se envían de uno en uno.

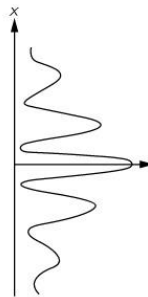
**Imagen 8 1:** Patrón esperable de electrones individuales pasando por una rendija doble.



Fuente: [http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III\\_01.html](http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html)

Sin embargo, lo que logramos observar en la pantalla es un patrón de interferencia como el que observamos cuando experimentamos con luz (ver imagen 12).

**Imagen 9 1:** Patrón que se observa en una pantalla cuando los electrones individuales pasan por una rendija doble.



Fuente: [http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III\\_01.html](http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html)

Sabemos, que la interferencia de la luz está explicada bajo el principio de superposición, pero ¿cómo es posible que electrones, lanzados uno a uno, se superpongan? ¿Es posible que los electrones pasen por ambas rendijas a la vez? ¿Es posible, entonces, determinar por cual rendija pasa el electrón?

De lo anterior, se concluye que los electrones han de ser descrito por ondas, antes que por medio de trayectorias en el sentido newtoniano. El significado físico de estas ondas no es, naturalmente, claro a partir de este experimento. Hoy sabemos, efectivamente, que un estado físico – es decir, toda la información accesible sobre un sistema físico que en el caso presente es el electrón – está descrito por *la función de onda* cuyo módulo cuadrático define una densidad de probabilidad. Así, podríamos decir que el electrón está descrito por una onda de probabilidad.

Por otro lado, esta onda satisface el principio de superposición y, por tanto, lo que efectivamente observamos en la pantalla se puede entender como un patrón de interferencia para estas ondas de probabilidad.

### **2.3.3. DIFICULTADES EN LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA MECÁNICA CUÁNTICA**

Al instalar el mundo cuántico en la sala de clases, innegablemente se presentan dificultades en el proceso de enseñanza y aprendizaje. Por una parte los estudiantes se ven expuestos a contradicciones y problemáticas similares a los que vivieron los científicos de la época al momento de aprender mecánica cuántica (Schaposnik, 2014). Mientras que los docentes se enfrentan a obstáculos sobre su formación y experiencias en el aula en el sentido de que las dificultades de los estudiantes permanecen (Martá, 2008).

En investigaciones recientes, Solbes y Sinarcas (2013), clasifican las dificultades en dos tipos: Ontológicas y Epistemológicas.

Las dificultades ontológicas, refieren al terreno de las relaciones entre las entidades y propiedades que trae la teoría de la mecánica cuántica, pues la concepción de mundo que se adquiere en la enseñanza escolar no es contigua a la nueva concepción de mundo subatómico (Pozo y Gomez Crespo, 1998).

A su vez, estas entidades y propiedades resultan ser poco común en el proceso de aprendizaje escolar, ya que además requieren del uso de contenidos matemáticos muy complejos, incompatibles con los contenidos curriculares de la enseñanza media, principalmente, en Latinoamérica y España (Valverde y Näslund-Hadley, 2010).

Las dificultades epistemológicas prosiguen de los cambios conceptuales que la enseñanza y aprendizaje de la mecánica cuántica presenta, ya que residen en lo “que se puede o no conocer” (Solbes y Sinarcas, 2013). Es decir, se relacionan con los modelos mentales y con la posibilidad de reconstruir el conocimiento en base a actividades concretas en el laboratorio, necesarias para poder entrar al mundo cuántico.

Gastón Bachelard (1938) en su trabajo *La formación del espíritu científico* define los obstáculos como una facilidad que la mente se concede para seguir razonando de manera sencilla, una especie de “comodidad intelectual”, por consiguiente define un obstáculo epistemológico como: “entorpecimientos y confusiones que se experimentan en el acto de conocer”.

Según Hodson, “El primer paso para asegurar que los estudiantes tengan éxito en el aprendizaje sobre la naturaleza de la mecánica cuántica, es convertir lo implícito en explícito.” (Faúndez, Rojas, Pinto y Astudillo, 2015). Por lo tanto, si estos modelos fallan, la construcción de conocimiento se verá seriamente afectada debido a dificultades epistemológicas presentes en el proceso de enseñanza-aprendizaje (Solbes y Sinarcas, 2009).

De lo anterior, los recursos didácticos -como veremos en la sección 2.3.4.- cumplen un rol estratégico para apoyar el trabajo docente y resolver en lo posible las dificultades ya mencionadas, adoptando los métodos vigentes de la enseñanza de las ciencias (Campanario y Moya, 1999). Sin embargo, existen investigaciones que afirman la escasez de actividades experimentales y recursos didácticos en la mecánica cuántica para poder implementarlo en las aulas de Latinoamérica (Bustos, Otaíza y Yupangui, 2013).

Diversos estudios, mayoritariamente en cursos universitarios, han reportado dificultades que tienen los estudiantes para entender la mecánica cuántica (Olsen, 2002; Pantoja, Moreira y Herscovitz, 2013).

Algunas de estas dificultades refieren a la no apropiación de conocimientos previos de cursos anteriores tanto de la mecánica cuántica como de la mecánica clásica por parte de los estudiantes (Singh. CH., 2001). También revelan “creencias de que las partículas viajan a lo largo de trayectorias sinusoidales” (McKagan, S.B, Perkins & K.K, Wieman, C.E, 2010). Así



como también problemas con la medición: “la medición es uno de los aspectos más contrarios a la intuición de la mecánica cuántica, ya que se desvía en gran medida de los resultados de medición deterministas en la mecánica clásica” (Sadaghiani, H.R & Pollock, S.J, 2015). Por último una dificultad intrínsecamente epistemológica y relacionada con las ideas alternativas que tienen los estudiantes es la transferencia de las propiedades macroscópicas de las sustancias a los átomos (Furió, Solbes y Carrascosa, 2006).

#### **2.3.4. PROPUESTAS EDUCATIVAS PARA LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA EN LA ESCUELA**

La enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela, es uno de los temas de mayor interés durante los últimos 10 años, lo que ha permitido desarrollar constantemente nuevas investigaciones y propuestas educativas en relación a las nuevas exigencias para la educación científica escolar (Barrios, Arias-Rueda y Flores, 2014).

En particular, en el camino de avanzar y superar las dificultades de la enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela, existe un conjunto de propuestas didácticas desarrolladas y orientadas a simplificar las dificultades matemáticas para enfocarse mayoritariamente en una enseñanza que supere los errores conceptuales.

Dentro de este marco de propuestas didácticas para la enseñanza de la mecánica cuántica a estudiantes de enseñanza media, resultan de gran interés para esta investigación resaltar las herramientas de aquellos trabajos que desarrollan una relación entre el fenómeno físico, el concepto cuántico que envuelve dicho fenómeno y el quehacer de los estudiantes respecto a lo que observan y aprenden.

En gran parte de la bibliografía consultada, se encuentran propuestas didácticas que utilizan interferómetro virtual de Mach-Zehnder, o bien algún otro software de simulación como el *dopplespalt*, o bien animaciones digitales, pues son considerados una herramienta potente para discutir los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica (Scarini y Suarez, 1998; Müller und Wiesner, 2002; Fanaro et al, 2007; Hoekzema et al, 2007; Pereira et al, 2009; Heusler, 2010; Pereira et al, 2012).

En secciones anteriores mencionamos la existencia de dificultades para reproducir experimentos en la sala de clases en la enseñanza de la mecánica cuántica. El avance de las

tecnologías ha influido enormemente a la educación. En ese sentido los simuladores son la herramienta que nos permite reproducir, a partir de modelos matemáticos desarrollados por la física teórica y experimental, experimentos reales en la sala de clases y que nos permite el estudio, el análisis y evaluaciones de distintas situaciones físicas (Cataldi, Lage y Dominighini, 2013).

Una simulación es un conjunto de ecuaciones matemáticas que modelan en forma ideal situaciones del mundo real, ya sea por su dificultad para experimentar o comprender un fenómeno (Casanovas, 2005). De este modo las simulaciones son herramientas poderosas de carácter predictivo.

También los simuladores se han transformado en un mecanismo de la innovación tecnológica en la educación, aportando a la cultura científica de los estudiantes y transformando significativamente la práctica docente (Contreras y Carreño, 2012). Algunas ventajas del uso de simuladores son:

- Eliminan riesgos que se presentan en la manipulación de los dispositivos por parte de los estudiantes, lo que permite centrarse en el aspecto del fenómeno que se va a estudiar.
- Producen retroalimentación rápida debido a los resultados inmediatos que entrega la simulación al cambiar los parámetros físicos de interés. Esto permite corregir o confirmar problemas planteados a los estudiantes. El aprendizaje se da por esta posibilidad de modificar valores de variables para inferir el comportamiento del modelo, o para ensayar o experimentar hipótesis.
- Poseen un componente lúdico que permite mantener el interés de los estudiantes. Este beneficio se presenta gracias a que la información de los applets es de tipo dinámico, interactivo y multimedia, lo que no es posible que se presente en el papel, pizarrón, diapositivas, entre otros.
- Involucran al estudiante en su aprendizaje, ya que es él quién tendrá que manejar el simulador, observar los resultados y actuar en consecuencia.
- Los simuladores pueden resolver la carencia de experiencia en el fenómeno de estudio que las teorías científicas buscan explicar.
- Pueden utilizarse en el diseño de actividades que promueven un acercamiento social del aprendizaje.

Finalmente, innovar en la enseñanza de la física tanto dentro como fuera del aula es una alternativa que propicia el interés de las nuevas generaciones. Los simuladores hoy por hoy son la posibilidad de incorporar el cambio y el desarrollo evolutivo del funcionamiento de la sociedad en las salas de clases.

## **CAPÍTULO 3**

### **MARCO METODOLÓGICO**

En relación a los antecedentes y discusión bibliográfica realizada en el capítulo anterior, se presentan a continuación las bases que orientan la construcción de una propuesta didáctica titulada “Enseñanza del principio dualidad onda-partícula a través de Clases Interactivas Demostrativas en contextos de aprendizaje activo”.

#### **3.1. DIAGNÓSTICO Y ANTECEDENTES PARA LA PROPUESTA**

Con el objetivo de caracterizar qué y cómo se presenta el contenido en las escuelas, se recurre a un análisis de contenido de libros de texto, específicamente en la unidad “El átomo y su núcleo” del nivel cuarto año medio, con un enfoque descriptivo-exploratorio.

El *análisis de contenido* en palabras de Bardin (1996) es “el conjunto de técnicas de análisis de las comunicaciones tendentes a obtener indicadores (cuantitativos o no) por procedimientos sistemáticos y objetivos de descripción del contenido de los mensajes permitiendo la inferencia de conocimientos relativos a las condiciones de producción/recepción (contexto social) de estos mensajes” (Bardin, 1996, p. 32).

Los textos escolares, como instrumento pedagógico, cumplen un rol de gran importancia ya que son el lugar físico permanente donde se encuentran construidos los conocimientos a través del lenguaje, tanto verbal como visual. Estos conocimientos, además, se encuentran propuestos en “una secuencia de instrucción basada en un programa de estudios organizado” (Hyneman, 2007, p.439). Además, es una de las herramientas de mayor influencia en el proceso enseñanza-aprendizaje para los profesores, estudiantes y apoderados (Alzate, Gómez y Romero, 1999).

Esto le apropia a los textos escolares ser el recurso pedagógico más utilizado en diversos escenarios educativos. Con usos que permiten, por ejemplo, al profesor poder planificar sus clases, a estudiantes poder estudiar y prepararse para evaluaciones y a los apoderados poder involucrarse en el desarrollo de aprendizaje de sus hijos pese al impedimento por deficiencias educacionales que puedan existir (Alzate et al, 1999; Choppin, 2000; Venegas, 1993).

Con base en la disponibilidad de textos escolares existentes, se han seleccionado los siguientes para un análisis detallado, en orden no correlativo con las gráficas y resultados:

- a) Física III-IV Medio, Texto del estudiante, Edición especial para el ministerio de educación distribuidos en establecimientos municipales el año 2014, Editado por: “empresa editora Zig-Zag, S.A.” Y que además integra una guía didáctica para el docente.
- b) Material didáctico *Física 4, Proyecto Bicentenario* distribuidos en establecimientos particular-subvencionados, Editado por: “Santillana del pacífico S.A de Ediciones.”
- c) Texto “Física 4º Medio-Proyecto Nuevo Explor@ndo” utilizado en establecimientos particulares, Creado por el Departamento de Estudios Pedagógicos de Ediciones SM-Chile.

El texto del estudiante de la editorial zig-zag corresponde al licitado por el MINEDUC el año 2015-2016. Mientras que los textos de las editoriales Santillana S.A y SM-Chile, corresponden a los textos más vendidos en el mercado privado, según Sernac el año 2015<sup>4</sup>.

Para la selección de contenidos conceptuales, utilizamos las siguientes categorías expuestas por Contreras y González (2014). Estas se clasifican en:

- Cuantitativos: Corresponde a conceptos relacionados con las unidades de medida y propiedades extensivas e intensivas de la materia, como por ejemplo masa y energía, respectivamente. Además de conceptos vinculados con cantidad de sustancia.
- Teorías, leyes y modelos: Este aspecto incorpora concepto relacionados con las principales teorías y modelos atómicas además de las leyes ponderales. Por ejemplo principio de exclusión de Pauli.

---

<sup>4</sup> En: <http://www.sernac.cl/27350/>

- Cualitativos: Incluye conceptos generales y específicos relacionados con la materia, sus características y propiedades. Por ejemplo fotón y onda.

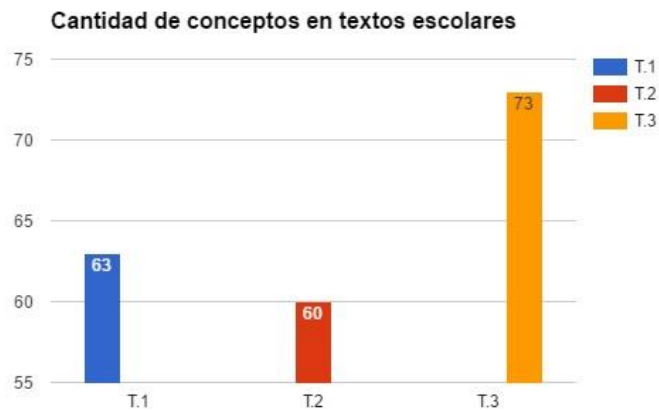
Primero se contabilizaron las frecuencias de cada uno de los conceptos mencionados en la unidad “el átomo y su núcleo” según las categorías mencionadas. Luego del total de conceptos identificados, se realizó una selección de conceptos con mayor frecuencia y una selección a los conceptos microscópicos existentes en cada uno de los textos escolares, es decir conceptos exclusivos de la mecánica cuántica.

### 3.1.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CONTENIDO

A continuación se presentan los resultados obtenidos del conteo de frecuencias de los conceptos categorizados de los tres textos escolares, en orden no correlativo.

El gráfico 1 muestra las cantidades totales de conceptos incluidos. En el anexo I, en la tabla 1, se encuentran las frecuencias de cada uno de estos conceptos.

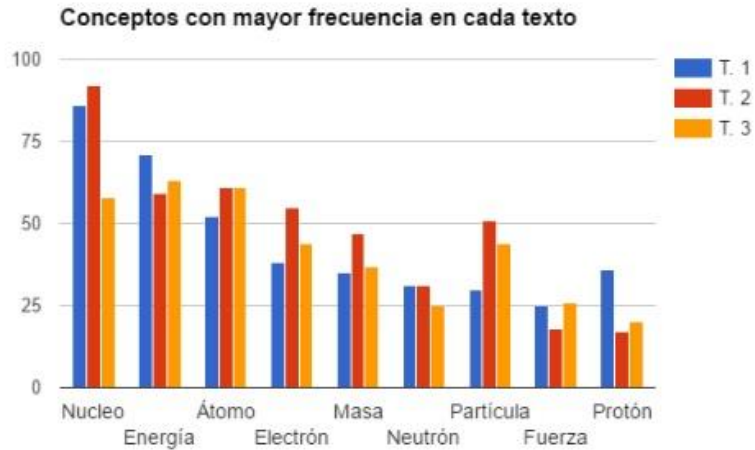
**Gráfico 1 1:** Cantidad de conceptos incluidos en la unidad el átomo y su núcleo para tres textos escolares analizados.



Fuente: Elaboración propia.

De la primera selección podemos observar los conceptos con mayor repetición en los tres textos escolares. El gráfico 2 muestra cuáles son los conceptos con mayor frecuencia en cada uno de los textos escolares analizados, en orden no correlativo.

**Gráfico 2 1:** *Conceptos de mayor frecuencia en cada uno de los textos escolares.*



*Fuente:* Elaboración propia.

Del total de conceptos presentados en el gráfico 1, se seleccionaron aquellos conceptos que corresponden exclusivamente a la mecánica cuántica. A continuación se indican con una “x” los textos escolares que incluyen dichos conceptos:

**Tabla 7:** *Selección de conceptos exclusivamente cuánticos incluidos en los textos escolares analizados.*

Conceptos cuánticos	Texto 1	Texto 2	Texto 3
Número cuántico	x	x	x
Función de onda	x	x	x
Constante de Planck	x	x	x
Fotón	x	x	x

Principio de incertidumbre de Heisenberg		x	x
Principio de exclusión de pauli*	x		
Teoría cuántica			x
Teoría de Bohr	x		
Dualidad onda-corpúsculo(partícula)		x	x
Líneas espectrales		x	x
Modelo mecánico cuántico		x	x
Bosones		x	x
Espectros atómicos			x
Configuración electrónica			x
Cuantos de energía		x	x
Mecánica cuántica		x	x
Espectro de emisión		x	x
Cuantización de la energía			x
Spin	x	x	x

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente podemos visualizar de forma global qué texto escolar contiene mayor cantidad de conceptos exclusivos de la mecánica cuántica. Estos resultados se expresan en la siguiente gráfica:

**Gráfico 3 1:** *Tabla comparativa entre cantidad de conceptos totales versus conceptos cuánticos en los textos escolares.*



*Fuente:* Elaboración propia.

Podemos observar que de un total de 19 conceptos exclusivos de la mecánica cuántica entre los tres textos escolares analizados desde el contenido en la unidad “el átomo y su núcleo” - donde es inevitable hablar del mundo cuántico- sólo cinco conceptos coinciden en los tres textos escolares. Estos son: fotón, número cuántico, constante de Planck, spin y función de onda.

A su vez, ocho conceptos cuánticos coinciden únicamente entre el T.2 y T.3: dualidad onda-corpúsculo, líneas espectrales, principio de incertidumbre, modelo mecánico cuántico, bosones, cuantos de energía, mecánica cuántica y espectro de emisión. También resulta importante destacar, los conceptos incluidos sólo en el T.3, los cuales corresponden a: Teoría cuántica, espectros atómicos, cuantización de la energía y configuración electrónica.

Si bien existe una gran diversidad de conceptos en los textos escolares, podemos identificar que varios de ellos se abordan de distintas maneras y que podrían estar refiriéndose al mismo concepto en cuestión; por ejemplo: teoría cuántica/mecánica cuántica, espectros atómicos/espectro de emisión, constante de Planck/cuantos de energía.



Por último, si comparamos estos 19 conceptos cuánticos seleccionados, sólo un concepto incluido en los tres textos escolares coincide con los conceptos claves propuestos por el programa de estudio *física* de cuarto año medio/actualización 2009: el Espín.

A continuación podemos ver en el contexto que se encuentra este concepto (spin) en los tres textos escolares.

**Imagen 10 1:** *Concepto Spin T.1.*

### Espines y momentos magnéticos

Al igual que los electrones, los nucleones (protones y neutrones) también son partículas de espín. Los nucleones también tienen un momento angular orbital asociado con sus movimientos dentro del núcleo y asociado a un momento angular nuclear, hay un momento magnético.

*Fuente:* T.1, Pp 247.

**Imagen 11 1:** *Concepto Spin T.2.*

### Decaimiento $\beta$

La emisión de partículas beta  $\beta$  por parte de un núcleo padre no solo da origen a un núcleo hijo y las partículas, sino que también a una nueva partícula de características bastante singulares: no posee carga eléctrica, su masa en reposo es cero y su espín es  $\frac{1}{2}$ . Si bien Wolfgang Pauli propuso en 1930 la existencia de una partícula con estas características, fue Enrico Fermi quien dio nombre a esta pequeña partícula neutra: el **neutrino**  $\nu$ . Pero fue en 1956 que finalmente se detecta experimentalmente dicha partícula.

*Fuente:* T.2, Pp 141.

**Imagen 12 1:** Concepto Spin T.3.

probabilidad de encontrar un electrón en una determinada región del espacio. Los distintos orbitales se obtienen a partir de los llamados **números cuánticos**; estos son: el número cuántico principal ( $n$ ), el número cuántico del momento angular ( $l$ ), el número cuántico magnético ( $m$ ) y el spin ( $m_s$ ). La combinación de estos cuatro números determinan la configuración electrónica del átomo y, por lo tanto, las propiedades del elemento químico al cual corresponden.

*Fuente:* T.3, Pp. 122.

Como vemos en las imágenes 7 y 6, el espacio de explicación para el concepto spin es nulo y sólo se remite a mencionarlo. Este concepto, además, es mencionado sólo una vez en cada uno de los textos analizados.

Entre los otros conceptos exclusivos de la mecánica cuántica, existen algunos que se encuentran relacionados entre sí dentro de un mismo tema, como por ejemplo en la figura 8 el concepto principio de incertidumbre en el T.2 es un tema para hablar de la dualidad onda partícula e introducir los conceptos de mecánica cuántica. Así como en el T.3 se requiere hablar de la dualidad onda partícula, contextualizarla e introducirla con los conceptos relacionados como la constante de Planck, para luego hablar del principio de incertidumbre y el modelo mecánico cuántico.

**Imagen 7 2:** Extracto de T.2

Otra de las visiones duales que se contraponen a la mecánica absoluta proviene de la naturaleza de la luz, pues ciertos experimentos y observaciones concuerdan en que esta se compone de partículas recurriendo al concepto de fotones. Así es posible explicar, por ejemplo, el efecto fotoeléctrico. Sin embargo, la luz presenta ciertas características de interacción con la materia y las superficies, particularmente los fenómenos de interferencia y difracción, lo cual indica que estaría compuesta por ondas y no por partículas. Esta diferencia se conoce como la **dualidad onda-partícula**, ya que muestra ambos comportamientos.

*Fuente:* T.2, Pp. 128.

### 3.2. DISEÑO Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

En base a los antecedentes recopilados a través del diagnóstico realizado mediante el análisis de los libros de textos escolares, se ha construido una propuesta didáctica para enseñar la dualidad onda-partícula basado en la estrategia Clases Interactivas Demostrativas (CID).

En el capítulo 4 del presente trabajo, se presenta la propuesta didáctica que consiste en dos actividades para el estudiante y una guía de orientaciones para el docente.

Dicha propuesta fue validada mediante el método *evaluación por pares*. “El propósito de la revisión por pares es medir la calidad, factibilidad y credibilidad de las investigaciones, con miras a ser publicadas, ya sean sus procesos o sus efectos” (Ladrón, M. Hincapié, J. Jackman, J. Herrera, O. y Caballero, C. 2008). Para el desarrollo de evaluación por pares se ha construido una rúbrica de evaluación (ver anexo 2).

La propuesta está dirigida a estudiantes de cuarto año de enseñanza media, en el inicio de la unidad 3: “El átomo y su núcleo”, con una duración de 4 horas pedagógicas. La unidad corresponde a la primera unidad del segundo semestre según los planes y programas propuestos por el MINEDUC.

El objetivo general de la propuesta consiste en: “Desarrollar colaborativamente el aprendizaje la dualidad onda-partícula, apoyado de actividades experimentales y recursos digitales en el marco de una estrategia de clases demostrativas interactivas”.

Dicha propuesta contiene dos actividades divididas en 4 etapas cada una, según el ciclo de aprendizaje PODS que declara la metodología CID. Así, cada una de las actividades consta de un ciclo completo de aprendizaje con una duración de 2 horas pedagógicas cada una.

Cada etapa tiene sus propios objetivos y habilidades, en ellas se proponen actividades experimentales para desarrollar en clases, preguntas para el desarrollo del objetivo general y, apoyo de simuladores y vídeos para el caso en que los experimentos no puedan ser realizados en la sala de clases y para apoyar también las discusiones. Además la propuesta cuenta con una guía de orientaciones para el docente.

La siguiente tabla de resumen, muestra la distribución de la propuesta en el ciclo PODS. El orden de desarrollo de la propuesta primero, corresponde a realizar el ciclo completo de

aprendizaje de la actividad I (señalada en la primera columna) y segundo el ciclo completo de aprendizaje de la actividad II (señalada en la segunda columna).

**Tabla 8:** Tabla de resumen de la propuesta didáctica según el ciclo PODS.

Etapas de CID	Etapas y preguntas de la propuesta  Actividad I	Etapas y preguntas de la propuesta  Actividad II
Predicción	<p><b>Actividad I - Hoja de predicciones</b></p> <p><b>Habilidades:</b> <i>Determinación de la validez de observaciones científicas de acuerdo con teorías aceptadas por la comunidad científica.</i></p> <p><b>Etapa I: Predicción individual.</b></p> <p>(Tiempo de duración 15 minutos).</p> <p><b>Objetivo:</b> <i>Formular predicciones, según la descripción experimental dada por el/la profesora.</i></p> <p>1. ¿Qué imagen se proyectará en la pantalla, cuando el haz de luz pase por las rendijas? Dibuje la imagen que crees que la luz proyectará en la pantalla y formula una explicación, para cada caso. (El dibujo no está construido a escala).</p> <hr/> <p><b>Etapa II: Predicción grupal.</b></p>	<p><b>Actividad II - Hoja de predicciones</b></p> <p><b>Habilidades:</b> <i>Determinación de la validez de observaciones científicas de acuerdo con teorías aceptadas por la comunidad científica.</i></p> <p><b>Recursos digitales:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="http://www.santiagoapostol.net/revista05/fisica.html">http://www.santiagoapostol.net/revista05/fisica.html</a></li> <li>- <a href="https://youtu.be/YZR1t9qgwm4">https://youtu.be/YZR1t9qgwm4</a></li> </ul> <p><b>Etapa A: Predicción individual.</b></p> <p>(Tiempo de duración: 15 minutos).</p> <p><b>Objetivo:</b> <i>Formular predicciones, según la descripción experimental dada por el/la profesora.</i></p> <p>1. ¿Qué imagen se proyectará en la pantalla, cuando los electrones individuales pasen por las rendijas? Dibuje la imagen que crees que los</p>

	<p>(Tiempo de duración 20 minutos).</p> <p><b>Objetivo:</b> <i>Discutir las predicciones individuales en grupos de 2 ó 3 estudiantes para obtener una predicción grupal.</i></p> <p>2. A partir de la situación expuesta en el ítem I, compartan y comenten las explicaciones de las predicciones individuales.</p> <p>3. Elaboren una predicción como grupo, para cada rendija simple y doble. ¿Qué imagen creen se verá en la pantalla? (El dibujo no está construido a escala).</p> <p>4. Expliquen y comparen sus predicciones con las de otros grupos, ¿Existen diferencias o similitudes? Identifica cuáles.</p>	<p>electrones proyectarán en la pantalla y formula una explicación, para cada caso. (El dibujo no está construido a escala).</p> <p><b>Recursos digitales:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="https://youtu.be/YZR1t9qqwm4">https://youtu.be/YZR1t9qqwm4</a></li> <li>- <a href="http://weelookang.blogspot.cl/2013/07/double-slit-wave-particle-duality-model.html">http://weelookang.blogspot.cl/2013/07/double-slit-wave-particle-duality-model.html</a></li> </ul> <hr/> <p><b>Etapa B: Predicción grupal. (Tiempo de duración: 20 minutos).</b></p> <p><b>Objetivo:</b> <i>Discutir las predicciones individuales en grupos de 2 ó 3 estudiantes para obtener una predicción grupal.</i></p> <p>2. A partir de la situación expuesta en la Etapa A, compartan y comenten las explicaciones de las predicciones individuales.</p> <p>3. Elaboren una predicción como grupo, para cada rendija simple y doble. ¿Qué imagen creen se verá en la pantalla? (El dibujo no está construido a escala).</p> <p>4. Expliquen y comparen sus predicciones con las de otros grupos, ¿Existen diferencias o similitudes?</p>
--	--	--

		Identifica cuáles.
Observación	<p><b>Actividad I - Hoja de datos</b></p> <p><b>Habilidades:</b> <i>Determinación de la validez de observaciones e investigaciones científicas de acuerdo con teorías aceptadas por la comunidad científica.</i></p> <p><b>Etapas:</b> <b>III: Demostración Experimental</b> (Tiempo de duración 35 minutos).</p> <p><b>Objetivo:</b> <i>Comparar predicciones con los resultados experimentales obtenidos.</i></p> <p><b>Objetivos Específicos:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Asociar los fenómenos de interferencia y difracción con una descripción en términos de ondas</li> <li>2. Establecer diferencias con descripciones en términos de partículas y sus trayectorias asociadas.</li> </ol> <p>5. ¿Coinciden las predicciones del grupo con lo observado?. Complete la siguiente tabla:</p> <p>- <b>Cuadro recordatorio: Propiedades ondulatorias de la luz (difracción e</b></p>	<p><b>Actividad II - Hoja de datos</b></p> <p><b>Etapas:</b> <b>C: Demostración experimental.</b> (Tiempo de duración: 25 minutos).</p> <p><b>Objetivo:</b> <i>Comparar predicciones con los resultados experimentales obtenidos.</i></p> <p><b>Objetivos Específicos:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reconocer el patrón de interferencia para los electrones en el experimento de la doble rendija.</li> <li>2. Asociar su comportamiento con una descripción en términos de ondas.</li> </ol> <p><b>Recursos digitales:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="http://weelookang.blogspot.cl/2013/07/double-slit-wave-particle-duality-model.html">http://weelookang.blogspot.cl/2013/07/double-slit-wave-particle-duality-model.html</a></li> </ul> <p>5. ¿Coinciden las predicciones del grupo con lo observado?. Complete la siguiente tabla:</p> <p>- <b>Cuadro recordatorio: Los electrones son partículas. (5 min. aprox.)<sup>6</sup></b></p>

<sup>6</sup> *idem.*

	<p><i>interferencia) y propiedades de las partículas según el principio de inercia. (5 min. aprox.)<sup>5</sup></i></p>	
Discusión	<p>6. ¿Cómo viaja la luz hacia la pantalla?</p> <p><b>Recursos digitales:</b></p> <p>a. <a href="https://youtu.be/qyimiM5dhf">https://youtu.be/qyimiM5dhf</a> A</p> <p>b.</p> <p>7. ¿Cuál de los dos comportamientos (onda o partícula) describe de forma consistente su predicción grupal del ítem II? Explique.</p>	<p>6. ¿Cómo viajan los electrones hacia la pantalla?</p> <p>7. ¿Cuál de los dos comportamientos (onda o partícula) describe de forma consistente su predicción grupal? Explique.</p>
Síntesis	<p>8. ¿Qué comportamiento describe la luz en los experimentos realizados?</p> <p><b>Etapa IV: Discusión de situaciones físicas análogas.</b> (Tiempo de duración 20 minutos).</p> <p><b>Objetivo:</b> Confirmar el comportamiento ondulatorio de la luz según los experimentos realizados y utilizar simuladores como una herramienta para</p>	<p><b>Etapa D. Discusión de situaciones físicas análogas.</b> (Tiempo de duración: 30 minutos).</p> <p><b>Habilidades:</b> Análisis y argumentación de controversias científicas contemporáneas relacionadas con el conocimiento del nivel.</p> <p><b>Objetivo:</b> Explicar la descripción en términos de ondas de las partículas subatómicas.</p>

<sup>5</sup> Includo en el tiempo de duración de la etapa.

	<p><i>predecir los resultados de dichos experimentos.</i></p> <p>9. ¿Es posible predecir la posición de las zonas oscuras y claras, y utilizar esta información para reproducir lo que has observado en clases de forma virtual utilizando un programa de computación?</p> <p><b>Recursos digitales:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/wave-interference">https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/wave-interference</a></li> </ul>	<p>8. ¿Qué comportamiento describen los electrones? ¿Depende del experimento?</p> <p><b>Recursos digitales:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="https://www.youtube.com/watch?v=Xmq_FJd1oUQ">https://www.youtube.com/watch?v=Xmq_FJd1oUQ</a></li> <li>-</li> </ul> <p>9. La luz está compuesta de partículas llamadas fotones. Al lanzar fotones hacia una rendija doble ¿Qué comportamiento describen los fotones?</p> <p><b>Recursos digitales:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="https://youtu.be/zsAvyVvO_6s">https://youtu.be/zsAvyVvO_6s</a></li> <li>- <a href="https://phet.colorado.edu/es/simulation/quantum-wave-interference">https://phet.colorado.edu/es/simulation/quantum-wave-interference</a></li> <li>-</li> </ul> <p><b>Pregunta de evaluación:</b></p> <p>10. Redacten una explicación sobre cómo se describen las partículas subatómicas en base a las actividades desarrolladas.</p> <p><b>Recursos digitales:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="https://www.youtube.com/watch?v=7NP8Fw67NUU">https://www.youtube.com/watch?v=7NP8Fw67NUU</a></li> </ul>
--	--	---

Fuente: Elaboración propia.



### 3.2.1 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN

Para la validación de la propuesta, participaron 5 profesores de colegios y 2 profesores universitarios. Se muestra a continuación la tabla de resumen de los promedios por ítem de la rúbrica de evaluación (ver anexo).

**Tabla 9:** *Tabla de resumen de promedios por ítem de la rúbrica de evaluación.*

<b>Sobre la propuesta en general</b>	<b>Promedio</b>
Son coherentes los objetivos propuestos con el desarrollo de las actividades.	2,86
Existe coherencia en las etapas de las actividades.	2,86
Todas las preguntas son necesarias en el desarrollo de las actividades para cumplir los objetivos.	1,86
Los cuadros recordatorios son pertinentes para el desarrollo de las actividades.	2,71
Es factible el tiempo propuesto para cada actividad.	2,29
Se fomenta el razonamiento científico expresamente.	2,71
Permite a los estudiantes desarrollar explicaciones cualitativas.	2,86
Es adecuada para implementar el Principio de dualidad onda-partícula.	2,71
Los recursos digitales contribuyen en el logro de los objetivos.	2,57
Favorece la visualización real del fenómeno estudiado.	2,57
<b>Sobre las preguntas de cada etapa</b>	<b>Promedio</b>
Permiten un razonamiento cualitativo y explicaciones verbales.	2,86
Contribuyen al logro del objetivo de la propuesta didáctica.	2,71
Existe una cantidad suficiente de preguntas.	2,14

Siguen un orden lógico y coherente con la metodología utilizada.	2,71
Están relacionadas con las habilidades científicas del nivel.	2,71
Permiten visualizar dificultades conceptuales de los estudiantes.	2,86

Fuente: Elaboración propia.

También, los promedios de las evaluaciones de cada docente.

**Tabla 10:** Promedios de aprobación de la propuesta de cada docente.

Docente	Colegio 1	Colegio 2	Colegio 3	Colegio 4	Colegio 5	Univer 6	Univer 7	Total
Promedio	2,87	2,69	2,68	1,69	2,93	2,56	2,69	<b>2,58</b>
%	96	90	89	56	98	85	90	<b>86</b>

Fuente: Elaboración propia.

La propuesta didáctica obtuvo un 86% de aprobación, con un promedio de 2,58 puntos de un total de 3 puntos.

### 3.2.2. OBSERVACIONES

A continuación se detallan las sugerencias realizadas por los profesores que revisaron la propuesta en orden correlativo a los promedios de la tabla 10.

**Tabla 11:** Observaciones de profesor de colegio 1.

Sugerencias Evaluador	Se acoge o no la sugerencia	Comentario o justificación
"Colocar los cuadros recordatorios al principio y generar 1 ó 2 preguntas al respecto".	No	Pierde el carácter predictivo del ciclo de la metodología.

**Tabla 12:** Observaciones de profesor de colegio 2.

<b>Sugerencias Evaluador</b>	<b>Se acoge o no la sugerencia</b>	<b>Comentario o justificación</b>
"Incluir aplicaciones".	Si	Se sugiere al docente plantear aplicaciones de la nanotecnología en la guía del docente en la parte de síntesis.
"¿cómo se evalúa la actividad?".	Si	Se le explícita al docente la pregunta de evaluación en la guía para el docente y se explicita en la guía del estudiante..

**Tabla 13:** Observaciones de profesor de colegio 3.

<b>Sugerencias Evaluador</b>	<b>Se acoge o no la sugerencia</b>	<b>Comentario o justificación</b>
"Explicitar y diferenciar claramente la etapa introductoria de la etapa procedimental en la guía del docente".	No	En una actividad realizada con la estrategia CID no cabe hacer la distinción entre introducción y procedimiento, ya que se estructura en etapas distintas.
"Se podrían explicitar referencias bibliográficas".	Si	Se agregó bibliografía complementaria al final de la guía para el docente
"Explicitar habilidades a desarrollar en cada una de las actividades".	Si	Se agregó al comienzo de la actividad 1 y 2, junto al objetivo en la guía para el estudiante.
"Explicitar los tipos de contenidos a trabajar en cada etapa en la guía del docente".	No	Esto está detallado tanto para el estudiante y para el docente.
"No utilizar la palabra compañeros".	No	Si bien la palabra "estudiantes" es más genérico, se requiere reforzar el trabajo colaborativo.

“No es conveniente utilizar dos verbos por cada objetivo”.	Si	Se modifican en los casos que corresponde.
“El objetivo debiese redactarse desde la base que debe ser demostrable y/o comprobable y “desarrollar colaborativamente el aprendizaje” se escapa un poco de esa definición”.	No	Se especifica la metodología de trabajo en el objetivo para reforzar el desarrollo colaborativo del aprendizaje. Si bien el objetivo de síntesis el lograr desarrollar una explicación del principio dualidad onda-partícula en base a experimentos observados el fin último es que los estudiantes puedan resolver dicho problema físico con trabajo en equipo y colaborativamente.
“Propongo que se definan los objetivos específicos que ayuden a conseguir el objetivo general en la guía para el docente”.	Si	Se definen los objetivos específicos en las etapas que corresponde.
“Debiese aprovecharse de mejor manera la primera pregunta ¿qué imagen se proyectará en la pantalla, cuando (...)? y acompañarse de nuevas preguntas guiadas”.	No	No se ve la necesidad producto que están acompañados de dibujos y montaje experimental.
“Todas las “respuestas posibles” de los alumnos, deben fundamentarse en base a lo que se revisó de la literatura”.	No	Estas respuestas están justificadas en el marco teórico del trabajo de titulación.

**Observaciones de profesor de colegio 4.**

No integra comentarios y/o sugerencias.

**Observaciones de profesor de colegio 5.**

No integra comentarios y/o sugerencias.

**Tabla 14:** Observación de profesor universitario 6.

<b>Sugerencias Evaluador</b>	<b>Se acoge o no la sugerencia</b>	<b>Comentario o justificación</b>
<p>“El uso de rendijas y dobles parece redundante. En ambos casos se observa un patrón de interferencia, por lo que cualquiera de ellos sirve para mostrar el comportamiento ondulatorio de la luz. No veo ventajas en usar ambos experimentos”.</p>	<p>No</p>	<p>Los diversos montajes experimentales están presentes para confrontar distintos comportamientos tanto de la luz como de los electrones con iguales montajes experimentales, de esta forma poder producir en el estudiante el quiebre repetitivo de pensamiento y ahondar en la aceptación de que los electrones a veces quedan mejor descrito como onda y a veces como partícula y así perder la idea falsa de que un objeto microscópico se comporta como onda y como partícula simultáneamente. Error que se mantiene incluso en materiales de divulgación científica.</p>
<p>“ Me parece que es importante comenzar con una discusión sobre las características intrínsecas de ondas y partículas... (esto es importante para entender la “dualidad” onda-partícula, que no es tal, pues una partícula no es nada más que una (función de) onda localizada.)”.</p>	<p>No</p>	<p>Pierde el carácter del ciclo de aprendizaje de la metodología usada. En particular pierde el carácter de predicción.</p>
<p>“ Un alumno inteligente podría hacer dos preguntas para las cuales más vale estar preparado: - ¿por qué se observa interferencia si no hay otra fuente de luz con la cual interferir?”.</p>	<p>No</p>	<p>Para la primera pregunta, cabe señalar que la explicación del fenómeno para la interferencia de la luz, como es un ejercicio de predicción, luego con un cuadro recordatorio se orienta a los estudiantes con el principio de superposición como fundamento del porqué se observa interferencia si no está “interfiriendo con otra luz”.</p>
<p>“ Un alumno inteligente podría hacer dos preguntas para las cuales más vale estar preparado: ¿por qué no vemos sombras tan bien definidas cuando, por ejemplo, jugamos al sol?”</p>	<p>No</p>	<p>Ahondar en esta explicación requiere romper el esquema de la metodología y además desvía la discusión sobre a lo que queremos llegar.</p>

¿No deberían observarse patrones de interferencia? sería bueno tener material para mostrar este fenómeno”.		
“Sería bueno incluir instrucciones precisas de qué plugin se debe tener instalado en el computador para visualizar sin problemas los contenidos”.	Si	Se integra en pie de página en la guía del docente el plugin que se necesita para manipular los simuladores.
“ ...Dice “láser de color rojo”. Es más preciso especificar la longitud de onda del láser”.	Si	Se corrige la sugerencia en la guía del docente.
“En la guía para el estudiante hay una “nota histórica”. El último párrafo de esta nota es profundamente impreciso. Recomiendo revisarlo”.	Si	Se corrige la nota histórica de la segunda actividad de la guía del estudiante.
“En la guía del estudiante en el recuadro “recuerden” con dos imágenes. La segunda imagen tienen escrito debajo “...de una doble simple”. No está claro a que se refiere”.	Si	Se corrige en la guía del estudiante, actividad I.

**Tabla 15:** Observaciones de profesor universitario 7.

<b>Sugerencias Evaluador</b>	<b>Se acoge o no la sugerencia</b>	<b>Comentario o justificación</b>
“ En la actividad, etapa I el dibujo puede llamar a confusión si no se explicita el ancho de la rendija o alguna cualidad geométrica del experimento...sólo se hace mención a la importancia de las dimensiones del experimento cuando se muestra los applets. Tengo dudas si esto puede generar confusión ya que dicha etapa es la síntesis de la actividad”.	Si	Se incorpora “(no está a escala)” antes de los dibujos.

<p>“El rol del observador en el experimento con electrones sólo aparece en uno de los videos de apoyo en la última actividad de la síntesis. Si no hay una explicación de ello por parte del profesor de forma previa, nuevamente puede generar confusión”.</p>	<p>Si</p>	<p>Se sugiere en la guía del docente, discutir sobre el rol del observador al momento de visualizar dicho vídeo. Ya que es imposible reproducir en clases dicho fenómeno. Y la metodología usada se basa en el carácter experimental para llegar a los conocimientos.</p>
<p>“...Hay coherencia en la propuesta, pero ésta podría ser más profunda en contenido”.</p>	<p>No</p>	<p>Existen límites de tiempo.</p>
<p>“Algunos videos no parecen tan adecuados al concepto a reforzar”.</p>	<p>Si</p>	<p>Se hacen cambios en los vídeos y preguntas, principalmente en las preguntas finales de la actividad II.</p>

Con base en los resultados de la validación, se presenta en el capítulo siguiente la propuesta didáctica consensuada y corregida.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROPUESTA DIDÁCTICA**

En consideración con los resultados del análisis de conceptos y la literatura consultada en cuanto a las dificultades en la enseñanza y aprendizaje de la mecánica cuántica, el desarrollo de la propuesta didáctica diseñada en este trabajo de titulación se realizó para el principio dualidad onda-partícula, según los siguientes criterios:

- Los conceptos con mayor frecuencia en los tres textos escolares (ver gráfico 2) se relacionan en su mayoría en tener un tratamiento sólo en términos de partículas, incluso sus propiedades. En ese sentido, los textos escolares en su totalidad carecen de una visión en términos de onda de las partículas subatómicas.
- El concepto spin, es un fenómeno del cual no podemos valernos ciertamente de alguna actividad concreta en el laboratorio, sólo con simulaciones, lo cual permite mantener ciertas dificultades epistemológicas con respecto al comportamiento dual de las partículas subatómicas.
- El concepto dualidad onda-partícula, por su parte, nos permite recrear actividades concretas de laboratorio y además apoyarnos de simulaciones. En ese sentido las preguntas se pueden abordar para caracterizar a las partículas subatómicas tanto en términos de onda como de partículas. Lo que a su vez contribuye en poder visualizar las diferencias entre el mundo clásico y el mundo cuántico.

A continuación se presenta la propuesta didáctica con la guía para el estudiante, actividad I y II respectivamente y luego la guía para el docente de la actividad I y II respectivamente.



**Guía para el estudiante – Actividad I**  
Actividad I - Hoja de predicciones

Nombre: _____	Fecha: _____	Curso: _____
---------------	--------------	--------------

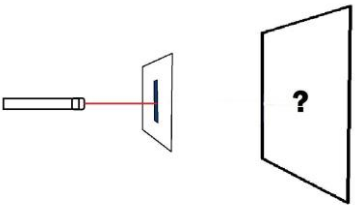
**Habilidades:** *Determinación de la validez de observaciones científicas de acuerdo con teorías aceptadas por la comunidad científica.*

**Etapa I: Predicción individual.** *(Tiempo de duración: 15 minutos).*

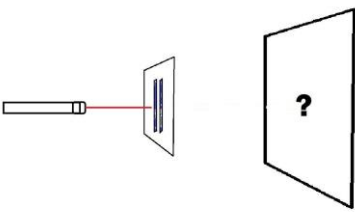
**Objetivo:** *Formular predicciones, según la descripción experimental dada por el/la profesora.*

1. ¿Qué imagen se proyectará en la pantalla, cuando el haz de luz pase por las rendijas? Dibuje la imagen que crees que la luz proyectará en la pantalla y formula una explicación, para cada caso. (El dibujo no está construido a escala).

**Caso A**

<p><i>Ejemplo:</i></p> 	<p><i>Dibuja aquí la imagen.</i></p>
--	--------------------------------------

**Caso B**

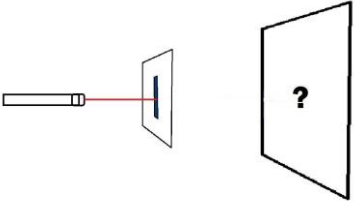
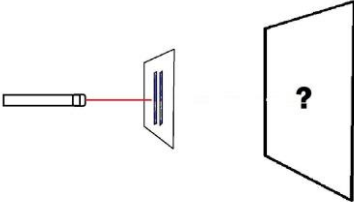
<p><i>Ejemplo:</i></p> 	<p><i>Dibuja aquí la imagen.</i></p>
--	--------------------------------------

**Etapa II: Predicción grupal.** (Tiempo de duración: 20 minutos).

Nombres: _____
Fecha: _____ Curso: _____

**Objetivo:** Discutir las predicciones individuales en grupos de 2 ó 3 estudiantes para obtener una predicción grupal.

2. A partir de la situación expuesta en el Etapa I, compartan y comenten las explicaciones de las predicciones individuales.
3. Elaboren una predicción como grupo para cada rendija, simple y doble. ¿Qué imagen creen se verá en la pantalla? (El dibujo no está construido a escala).

<p>Caso A Ejemplo:</p> 	<p>Dibuja aquí la imagen.</p>
<p>Caso B Ejemplo:</p> 	<p>Dibuja aquí la imagen.</p>

4. Expliquen y comparen sus predicciones con las de otros grupos, ¿Existen diferencias o similitudes? Identifica cuáles.

### Actividad I - Hoja de datos

Nombres: _____
Fecha: _____ Curso: _____

**Habilidades:** *Determinación de la validez de observaciones e investigaciones científicas de acuerdo con teorías aceptadas por la comunidad científica.*

**Etapa III. Demostración experimental.** *(Tiempo de duración: 35 minutos).*

**Objetivo:** *Comparar predicciones con los resultados experimentales obtenidos.*

**Objetivos Específicos:**

1. *Asociar los fenómenos de interferencia y difracción con una descripción en términos de ondas*
2. *Establecer diferencias con descripciones en términos de partículas y sus trayectorias asociadas.*
- 3.

A partir de la demostración realizada por el profesor/a, dibuje las imágenes que observan en la pantalla sobre el papel milimetrado, para cada una de las rendijas simple y doble. Trabaje colaborativamente con su equipo para la elaboración de cada uno de los esquemas.

<i>Rendija</i>	<i>Dibujo de la luz en la pantalla.</i>
Rendija Simple	<b>Caso A</b> Pegue aquí

Rendija Doble	<b>Caso B</b> Pegue aquí
---------------	-----------------------------

Una vez realizada la demostración experimental, responda a las siguientes preguntas:

5. ¿Coinciden las predicciones del grupo con lo observado? Complete la siguiente tabla:

	Predicción	Observación	¿Coinciden?
<b>Caso A</b>	Dibuje aquí	Dibuje aquí	
<b>Caso B</b>	Dibuje aquí	Dibuje aquí	

## Recuerden

En 1º medio revisaron los modelos que explican el comportamiento de la luz: El modelo corpuscular y, el ondulatorio. En esa oportunidad vieron las propiedades ondulatorias de la luz. Una de ellas es la INTERFERENCIA la cual podemos verificar con el experimento de la doble rendija de Thomas Young (ver imagen 1). Este experimento dio pruebas concluyentes sobre el comportamiento ondulatorio de la luz.

Otra propiedad ondulatoria de la luz que podemos verificar es la DIFRACCIÓN de Fraunhofer por una rendija simple (ver imagen 2).

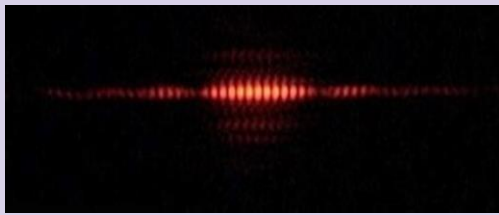


Imagen 1: Patrón de interferencia de una doble

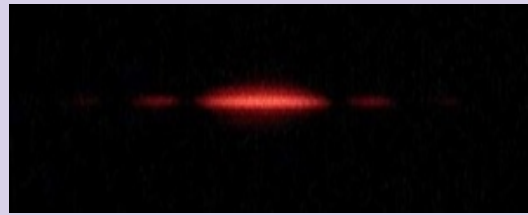
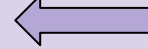


Imagen 2: Patrón de difracción de una rendija simple.

## Recuerden

“La explicación que formuló Thomas Young fue que cada una de las ranuras se transforma en una nueva fuente de ondas, las que se **superponen** entre sí; algo similar a lo que sucede cuando se dejan caer dos piedras al agua. En el patrón de interferencia existen zonas donde las ondas se anulan (percibidas como sombras) y otras donde se suman (percibidas como luz)” - *Física 1° medio, texto para el estudiante, SM 2016.*



Para el caso de las propiedades de las partículas, según las leyes de Newton y en particular el principio de inercia, “esta(s) permanecerán en estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme si no actúa ninguna fuerza sobre ella”. *Física 2° medio, texto para el estudiante, SM 2016.*

**6. ¿Cómo viaja la luz hacia la pantalla?**

Tomando en cuenta los cuadros recordatorios decida si, para cada uno de los resultados del experimento, la luz se comporta como onda o partícula. Haga un esquema de la propagación de la luz consistente con su respuesta.

<b>OBSERVACIÓN</b>	<b>¿Onda o Partícula?</b>	<b>Dibuja un esquema de la propagación</b>
<b>Caso A</b>		<b>Dibuje aquí</b>
<b>Caso B</b>		<b>Dibuje aquí</b>

**7. ¿Cuál de los dos comportamientos (onda o partícula) describe de forma consistente su predicción grupal del Etapa II? Explique.**

**8. ¿Qué comportamiento describe la luz en los experimentos realizados?**

**Etapa IV. Discusión de situaciones físicas análogas.** (*Tiempo de duración: 20 minutos*).

**Objetivo:** *Confirmar el comportamiento ondulatorio de la luz según los experimentos realizados*

**Objetivo específico:** *Utilizar simuladores como una herramienta para predecir los resultados de dichos experimentos.*

**9.** ¿Es posible predecir la posición de las zonas oscuras y claras, y utilizar esta información para reproducir lo que has observado en clases de forma virtual utilizando un programa de computación?



## Guía para el estudiante – Actividad II

### Actividad II - Hoja de predicciones

Nombre: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_ Curso: \_\_\_\_\_

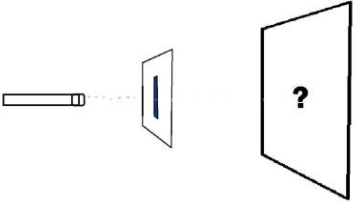
**Habilidades:** *Determinación de la validez de observaciones científicas de acuerdo con teorías aceptadas por la comunidad científica.*

**Etaa A: Predicción individual.** (*Tiempo de duración: 15 minutos.*)

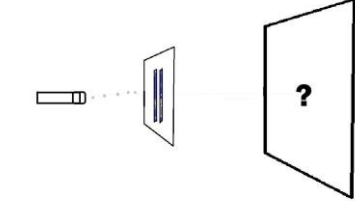
**Objetivo:** *Formular predicciones, según la descripción experimental dada por el/la profesora.*

1. ¿Qué imagen se proyectará en la pantalla, cuando los electrones individuales pasen por las rendijas? Dibuje la imagen que crees que los electrones proyectarán en la pantalla y formula una explicación, para cada caso. (El dibujo no está construido a escala).

#### Caso A

<p><i>Ejemplo:</i></p> 	<p><i>Dibuja aquí la imagen.</i></p>
--	--------------------------------------

#### Caso B

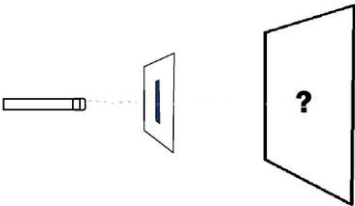
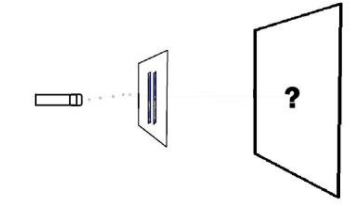
<p><i>Ejemplo:</i></p> 	<p><i>Dibuja aquí la imagen.</i></p>
--	--------------------------------------

**Etapa B: Predicción grupal.** (Tiempo de duración: 20 minutos).

Nombres: _____
Fecha: _____ Curso: _____

**Objetivo:** *Discutir las predicciones individuales en grupos de 2 ó 3 estudiantes para obtener una predicción grupal.*

2. A partir de la situación expuesta en la Etapa A, compartan y comenten las explicaciones de las predicciones individuales.
3. Elaboren una predicción como grupo, para cada rendija simple y doble. ¿Qué imagen creen se verá en la pantalla? (El dibujo no está construido a escala).

<p>Caso A</p> <p>Ejemplo:</p> 	<p><i>Dibuja aquí la imagen.</i></p>
<p>Caso B</p> <p>Ejemplo:</p> 	<p><i>Dibuja aquí la imagen.</i></p>

4. Expliquen y comparen sus predicciones con las de otros grupos, ¿Existen diferencias o similitudes? Identifica cuáles.

## Actividad II - Hoja de datos

Nombres: _____
Fecha: _____ Curso: _____

**Etapa C. Demostración experimental.** (*Tiempo de duración: 25 minutos*).

**Objetivo:** *Comparar predicciones con los resultados experimentales obtenidos.*

**Objetivos Específicos:**

1. *Reconocer el patrón de interferencia para los electrones en el experimento de la doble rendija.*
2. *Asociar su comportamiento con una descripción en términos de ondas.*

A partir de la demostración realizada por el profesor/a, dibuje las imágenes que observan en la pantalla, para cada una de la rendija simple y doble. Trabaje colaborativamente con su equipo para la elaboración de cada uno de los esquemas.

<i>Rendija</i>	<i>Dibujo de los electrones en la pantalla.</i>
Rendija Simple	<b>Caso A</b>

Rendija Doble	<b>Caso B</b>
---------------	---------------

Una vez realizada la demostración del experimento, responda a las siguientes preguntas:

5. ¿Coinciden las predicciones del grupo con lo observado?. Complete la siguiente tabla:

	Predicción	Observación	¿Coinciden?
<b>Caso A</b>	Dibuje aquí	Dibuje aquí	
<b>Caso B</b>	Dibuje aquí	Dibuje aquí	

## Nota histórica

El electrón es una partícula elemental cargada negativamente que constituye uno de los componentes fundamentales del átomo. “El electrón fue descubierto por J.J Thomson (1897) en el curso de sus estudios sobre los rayos catódicos, confirmando que estos consisten en partículas cargadas negativamente. Años más tarde, en 1910, Millikan, con su experimento de la gota de aceite, determinó el valor de la carga del electrón:  $e=1.602 \cdot 10^{-19}[\text{C}]$  y su masa  $=9.102 \cdot 10^{-31}[\text{Kg}]$ .” *Física III-IV medio, texto para el estudiante, Zig-Zag 2016.*

“En el modelo estándar de física de partículas, los electrones pertenecen al grupo de partículas subatómicas llamadas leptones, que se cree que son las partículas elementales fundamentales”. Física 4, Proyecto Bicentenario. Santillana

6. ¿Cómo viajan los electrones hacia la pantalla?

Tomando en cuenta la nota histórica a modo de recordatorio decida si, para cada uno de los resultados del experimento, los electrones se comportan como onda o partícula. Haga un esquema de la propagación de los electrones consistente con su respuesta.

OBSERVACIÓN	¿Onda o Partícula?	Dibuja aquí un esquema de la propagación
<b>Caso A</b>		Dibuje aquí
<b>Caso B</b>		Dibuje aquí

7. ¿Cuál de los dos comportamientos (onda o partícula) describe de forma consistente su predicción grupal? Explique.

8. ¿Qué comportamiento describen los electrones? ¿Depende del experimento?

**Etapa D. Discusión de situaciones físicas análogas.** (*Tiempo de duración: 30 minutos*).

**Habilidades:** *Análisis y argumentación de controversias científicas contemporáneas relacionadas con el conocimiento del nivel.*

**Objetivo:** *Explicar la descripción en términos de ondas de las partículas subatómicas.*

**9.** La luz está compuesta de partículas llamadas fotones. Al lanzar fotones hacia una rendija doble ¿Qué comportamiento describen los fotones?

**Pregunta de evaluación.**

**11.** Redacten una explicación sobre cómo se describen las partículas subatómicas en base a las actividades desarrolladas.

## GUÍA DE ORIENTACIONES PARA EL DOCENTE - AI

La siguiente propuesta didáctica para cuarto año de enseñanza media, basada en la metodología *Clases demostrativas interactivas*, se enmarca en la unidad 3: “El átomo y su núcleo”.

**Objetivo General:** Desarrollar colaborativamente el aprendizaje de la dualidad onda-partícula, apoyado de actividades experimentales y recursos digitales en el marco de una estrategia de clases demostrativas interactivas.

### Introducción

Esta primera actividad está basada en los experimentos de difracción (Fraunhofer) e interferencia (experimento de Young) de un haz de luz monocromático.

Para la difracción de Fraunhofer se hace incidir un haz de luz coherente (haz de luz de un puntero láser) sobre una rendija simple de 0.08 [mm] de ancho, de manera tal que la luz que pasa por dicha rendija se proyecta hacia una pantalla. Para el experimento de Young, se hace incidir un haz de luz coherente sobre una rendija doble de 0.08[mm] de ancho cada una y con una distancia entre ellas de 0.5 [mm].

Para el montaje experimental considere una distancia aproximada de 40[cm] entre el láser y la rendija, y una distancia de 50[cm] (aproximada) entre la rendija y la pantalla.

Esta actividad consta de cuatro Etapas. La Etapa I es de carácter individual mientras que las tres siguientes se deben realizar en grupos de máximo 3 estudiantes.

#### **Etapa I. Predicción individual.** (*Tiempo de duración: 15 minutos*).

En esta primera Etapa el docente debe montar el experimento y sólo **describir** al grupo curso el experimento a desarrollar **sin proporcionar resultados** con el objetivo de que los estudiantes,



de manera **individual**, registren sus predicciones en la hoja de predicciones<sup>7</sup>. El docente pregunta a los estudiantes:

**1. ¿Qué imagen se proyectará en la pantalla, cuando el haz de luz pase por cada una de las rendijas?**

*Una respuesta posible, basándose en sus conocimientos previos vistos en primer año medio (para el viaje de la luz en trayectorias rectilíneas) es que la imagen de la luz que se observará en la pantalla será una franja del tamaño de la rendija simple (para la difracción de Fraunhofer), y para el caso de la rendija doble es posible que respondan que observarán dos franjas del tamaño de las rendijas.*

*Otra posibilidad son respuestas acertadas (o cercanas a lo que se observará) en cualquiera de los dos casos. Note que esta posibilidad no asegura que los estudiantes comprendan la relación entre una descripción en términos de onda y sus predicciones. La pregunta número 6 de la Etapa III tiene como objetivo verificar esto último.*

Una vez completada la hoja de predicciones de forma individual, el docente puede pedir a los estudiantes que entreguen el material con sus predicciones individuales.

**Etapa II. Predicción grupal.** (Tiempo de duración: 20 minutos).

A continuación el docente pide a los estudiantes formar grupos de 2 ó 3 compañeros, entregándole a cada miembro del grupo la pauta de trabajo grupal<sup>8</sup>. El objetivo de esta etapa es lograr una predicción por cada grupo y explicar los argumentos físicos que sustentan dichas predicciones. Para ello se propone:

**2. A partir de la situación expuesta en el Etapa I, compartan y comenten las explicaciones de las predicciones individuales.**

*El objetivo es que los estudiantes comparen (entre los miembros del grupo) y comenten sus explicaciones desarrolladas en la Etapa I. Esta actividad les permitirá hacer explícitos los argumentos y fundamentos físicos de sus predicciones y confrontarlos con los de sus compañeros.*

---

<sup>7</sup> Ver hoja de predicciones Actividad I. Etapa I.

<sup>8</sup> Ver hoja de predicciones Actividad I. Etapa II.

**3. Elaboren una predicción como grupo para cada rendija, simple y doble. ¿Qué imagen creen que se verá en la pantalla?**

*El objetivo de esta pregunta es lograr, a partir de la discusión grupal de los estudiantes, una predicción consensuada en base al (los) argumento(s) físico(s) aceptados por la mayoría del grupo. Esta predicción debe hacerse explícita en la tabla correspondiente.*

*Es posible que no se llegue a un consenso al interior del grupo. En tal caso se debería permitir un registro de las predicciones distintas al interior del grupo.*

El docente debe observar cuidadosamente a los estudiantes y elegir el momento adecuado para continuar con el paso siguiente.

**4. Expliquen y comparen sus predicciones con las de otros grupos, ¿Existen diferencias o similitudes? Identifica cuáles.**

*El propósito de esta pregunta es representar **todas** las predicciones realizadas por los estudiantes y hacer explícitos los argumentos físicos que respaldan dichas predicciones. Para esto, el docente pide a los estudiantes que compartan sus predicciones con el grupo curso, a modo de lluvia de ideas. Los estudiantes pueden salir a la pizarra, explicando con sus dibujos las predicciones consensuadas. Los estudiantes, pueden hacer preguntas, aportes y/o comentarios a las predicciones de sus compañeros, de tal forma que se genere una discusión colaborativa respecto a lo que creen que va ocurrir.*

En toda esta etapa el docente no debe hacer comentarios sobre las predicciones (si son correctas o incorrectas). La labor del docente en esta etapa es guiar a los estudiantes para que identifiquen los principios físicos que sustentan sus predicciones. Si **ningún** estudiante expone alguno de los pensamientos alternativos más comunes, el docente debe presentarlos diciendo algo así como “un estudiante en el curso anterior realizó esta predicción”.

**Etapa III. Demostración experimental. (Tiempo de duración: 35 minutos).**

A continuación el docente realiza la demostración experimental al grupo curso según el montaje mostrado en la Figura 1, El docente puede apoyarse de un grupo de estudiantes para realizar el experimento. Los estudiantes recogen los datos y resultados de manera grupal.

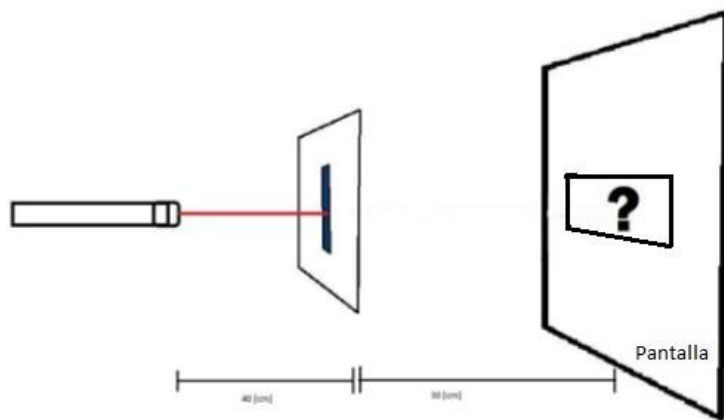


Fig. 1: *Montaje experimental, actividad I.*

**Materiales:**

- 1 tarjeta con rendija simple de: 0.08[mm].
- 1 tarjeta con rendija doble de 0.08 [mm] cada una y con una separación de 0.5[mm].
- Un puntero láser de 650 [nm].
- Soporte para el láser y la rendija (plasticina).
- Papel milimetrado y lápiz grafito.
- Cinta adhesiva de papel y tijeras.

**Procedimiento:**

A.- Ubique el puntero láser a una distancia de 90[cm] de la pantalla (o pared), como muestra la Figura 1.

B.- Pegué el papel milimetrado en la pared a la misma altura donde se ubicará el puntero láser.

C.- Ubique la tarjeta 1 entre el láser y la pantalla a 40 [cm] de distancia de la pantalla.

D.- Permita que los estudiantes observen el patrón que se forma en la pantalla dibujándolo en el papel milimetrado para luego pegarlo en la hoja de datos<sup>9</sup>. Repita este procedimiento para

---

<sup>9</sup> Ver Actividad I. Etapa III.

todos los grupos. Los registros digitales se pueden permitir siempre y cuando recojan la imagen fielmente y además sean imprimibles para que se puedan registrar en la hoja de datos.

E.- Repita el procedimiento anterior para la rendija doble.

Luego, a partir de los datos registrados, los estudiantes responden a las siguientes preguntas:

**5. ¿Coinciden las predicciones del grupo con lo observado?. Complete la siguiente tabla:**

*En esta etapa los estudiantes sólo deben verificar si sus predicciones coinciden o no con el resultado del experimento.*

Luego de esta primera pregunta los estudiantes cuentan con cuadros recordatorios sobre los contenidos previos vistos en primer año medio sobre el comportamiento de la luz, para así evitar desviar el objetivo de esta pregunta, el cual es identificar las diferencias entre una descripción en términos de onda o de partícula y sus trayectorias. Es importante que el profesor relacione los resultados experimentales con los contenidos previos, para que los estudiantes puedan reconocer que la actividad está basada en algo que ellos ya conocen.

**6. ¿Cómo viaja la luz hacia la pantalla?**

*En esta pregunta los estudiantes discuten en cada grupo cuál es la descripción de la luz (en términos de ondas o partículas) que es consistente con lo observado.*

*Para verificar si tal distinción es reconocida por los estudiantes debe haber una coincidencia entre la respuesta a la pregunta ¿Onda o Partícula? y el dibujo de la propagación.*

*Así, por ejemplo, si el llamado “Caso A” tiene como respuesta “Onda” y como dibujo de la propagación un conjunto de trayectorias (líneas rectas), entonces es posible que el estudiante haya identificado la luz con un fenómeno ondulatorio (tal vez gracias al cuadro recordatorio), pero no reconoce las características físicas que identifican la propagación de una onda.*

*En tal caso el docente debería incentivar una discusión que revela las contradicciones entre las dos respuestas. El docente se puede apoyar de imágenes y/o vídeos que permitan resolver dichas contradicciones de los estudiantes. Se propone el siguiente video:*

1. Este vídeo describe y muestra un experimento social sobre la interferencia de la luz del sol al pasar por una rendija doble y explica dicho fenómeno de forma análoga a las ondas del agua cuando interfieren, con este ejemplo el profesor puede mostrar claramente el principio de superposición: <https://youtu.be/qyimiM5dhfA>

Este video se encuentra en idioma inglés, se sugiere apoyar la traducción para los estudiantes para una mejor comprensión de lo expuesto. El video original en línea viene subtulado en español (ver referencias).

**7. ¿Cuál de los dos comportamientos (onda o partícula) describe de forma consistente su predicción grupal de la Etapa II? Explique.**

*El propósito de esta pregunta, en caso de no coincidir con el experimento, es identificar el hecho de que su predicción ha estado basada en una de las hipótesis sobre la naturaleza de la luz (onda o partícula) y, a la luz de los resultados experimentales debe abandonar dicha hipótesis.*

*Por otro lado, si su predicción coincide con el experimento, los estudiantes deberían poder reconocer si los argumentos que han utilizado para llegar a dichas predicciones son compatibles con el comportamiento ondulatorio de la luz (probado a partir de la demostración experimental).*

**8. ¿Qué comportamiento describe la luz en los experimentos realizados?**

*Esta pregunta tiene como objetivo reforzar el hecho que lo que se observa en el experimento es compatible sólo con la hipótesis que la luz ha de ser descrita como una onda y no como partículas.*

El docente debería resumir las principales características de este comportamiento resaltando el llamado principio de superposición en base a lo observado en el video propuesto (1).

**Etapa IV. Discusión de situaciones físicas análogas. (Tiempo de duración: 20 minutos).**

En esta Etapa el docente debe re direccionar los resultados de la actividad I.

La tarea del docente es hacer que sean los estudiantes los que proporcionen las respuestas deseadas. Evitando “enseñar” a los estudiantes, entendido esto como decirles cuál es la respuesta correcta.

El docente puede fomentar la discusión de situaciones físicas análogas sugiriendo preguntas que respondan al mismo concepto físico. Una pregunta propuesta es:

**9. ¿Es posible predecir la posición de las zonas oscuras y claras, y utilizar esta información para reproducir lo que has observado en clases de forma virtual utilizando un programa de computación?**

*El objetivo de esta pregunta es poder establecer -- en base al conocimiento de cómo se construye la física y las experiencias personales de los estudiantes en clases -- que el poder predictivo de las características cuantitativas de un fenómeno físico expresable, por ejemplo, por medio de una ecuación, permite construir simuladores computacionales que pueden recrear lo que ocurre en un experimento, pero que no pueden reemplazar a los experimentos.*

En el cierre de la presente actividad, entonces, se puede mostrar dicho simulador que modela el comportamiento de la luz en los experimentos realizados, en base a los mismos algoritmos de cálculo que se realizan para comprobar teóricamente los resultados experimentales. Pudiendo cambiar las condiciones del experimento.

- Simulador interferencia de ondas de luz:  
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/wave-interference>

## GUÍA DE ORIENTACIONES PARA EL DOCENTE - AII

La siguiente propuesta didáctica para cuarto año de enseñanza media, basada en la metodología *Clases demostrativas interactivas*, se enmarca en la unidad 3: “El átomo y su núcleo”.

**Objetivo General:** Desarrollar colaborativamente el aprendizaje de la dualidad onda-partícula, apoyado de actividades experimentales y recursos digitales en el marco de una estrategia de clases demostrativas interactivas.

### Introducción

Antes comenzar con la segunda actividad, se sugiere hacer una pequeña contextualización histórica del surgimiento de la mecánica cuántica con los estudiantes, apoyándose de una lectura de divulgación científica. Del siguiente link se recomiendan resaltar los puntos de partida de la Mecánica Cuántica con el problema del cuerpo negro y la hipótesis de Max Planck en el año 1900, luego una carrera de velocidades en el trabajo de diversos científicos de la época por dar solución a los problemas que contraponían la teoría con la experimentación para finalmente dar formulación a la Mecánica Cuántica entre los años 1925 y 1927 con Heisenberg, Schrödinger y Dirac: <http://www.santiagoapostol.net/revista05/fisica.html>

Esta segunda actividad trata de dos experimentos utilizando electrones individuales. Para el primer caso se hace incidir electrones individuales **de uno en uno** a través de una rendija simple hacia una pantalla y el segundo caso se hace incidir electrones de uno en uno a través de una rendija doble hacia una pantalla.

Para la descripción del experimento se sugiere apoyarse del siguiente video. Los primeros 10 segundos muestran una descripción experimental para la ejecución de la actividad:

- “Dos ranuras a nano escala se han insertado en el vacío de un microscopio electrónico junto con un sistema de registro innovador capaz de tomar hasta un millón de cuadros por segundo de manera que, por primera vez, es posible grabar cada electrón y su hora de llegada en el detector. Entonces, en un momento posterior, los marcos recogidos se

superponen y se hacen posible observar fuera de línea la acumulación del patrón de interferencia.”: <https://youtu.be/YZR1t9qqwm4>

De esta forma, el docente puede explicar a los estudiantes el por qué el uso de software para esta actividad, tomando en cuenta las conclusiones obtenidas por los estudiantes en la pregunta 9 de la actividad I y los tamaños de los materiales que se necesitan en esta oportunidad.

Para la demostración experimental se utilizará el simulador “*Double slit wave particle duality*” <http://weelookang.blogspot.cl/2013/07/double-slit-wave-particle-duality-model.html>.

Esta actividad consta de Cuatro Etapas. La Etapa I es de carácter individual mientras que las tres siguientes se deben realizar en grupos de máximo 3 estudiantes.

**Etapa A. Predicción individual.** (*Tiempo de duración: 15 minutos*).

En esta Etapa el docente sólo debe mostrar al grupo curso la parte del montaje experimental del vídeo propuesto, **sin proporcionar los resultados** con el objetivo de que los estudiantes de manera **individual**, registren sus predicciones en la Etapa A de la hoja de predicciones<sup>10</sup>. El docente pregunta a los estudiantes:

**1. ¿Qué imagen se proyectará en la pantalla, cuando los electrones pasen por cada una de las rendijas?**

*Una respuesta posible, utilizando la noción de partícula para los electrones es que la imagen que se observará de los electrones en la pantalla será una franja del tamaño de la rendija simple y para el caso de la rendija doble se observará en la pantalla dos franjas del tamaño del ancho de las rendijas simples.*

Una vez completada la hoja de predicciones individuales, el docente puede pedir a los estudiantes que entreguen el material con sus predicciones individuales.

**Etapa B. Predicción grupal.** (*Tiempo de duración: 20 minutos*).

---

<sup>10</sup> Ver hoja de predicciones Actividad II. Etapa A.



A continuación el docente pide a los estudiantes formar grupos de 2 ó 3 compañeros, entregándoles a cada miembro del grupo la pauta de trabajo grupal<sup>11</sup>. El objetivo de esta etapa es lograr una predicción por cada grupo y hacer explícitos los argumentos físicos que sustentan dichas predicciones. Para ello se propone:

**2. A partir de la situación expuesta en la Etapa A, compartan y comenten las explicaciones de las predicciones individuales.**

*En esta etapa el objetivo es que los estudiantes comparen y comenten sus explicaciones desarrolladas en la Etapa A entre los miembros del grupo. Esta actividad les permitirá hacer explícitos los argumentos y fundamentos físicos de sus predicciones y confrontarlos con los de sus compañeros.*

**3. Elaboren una predicción como grupo, para cada rendija simple y doble. ¿Qué imagen creen se verá en la pantalla?**

*El objetivo de esta pregunta es lograr, a partir de la discusión grupal de los estudiantes, una predicción en base al (los) argumentos(s) físico (s) aceptados por la mayoría del grupo. Esta predicción debe hacerse explícita en la tabla correspondiente.*

*Es posible que no se llegue a un consenso al interior del grupo. En tal caso se debería permitir un registro de las predicciones distintas al interior del grupo.*

El docente debe observar cuidadosamente a los estudiantes y elegir el momento adecuado para continuar con el paso siguiente.

**4. Expliquen y comparen sus predicciones con las de otros grupos, ¿Existen diferencias o similitudes? Identifica cuáles.**

*El propósito de esta pregunta es representar **todas** las predicciones realizadas por los estudiantes y hacer explícitos los argumentos físicos que respaldan dichas predicciones. Para esto, el docente pide a los estudiantes que compartan sus predicciones con el grupo curso, a modo de lluvia de ideas. Los estudiantes pueden salir a la pizarra, explicando con sus dibujos las predicciones consensuadas. Los estudiantes, pueden hacer preguntas, aportes y/o comentarios a las predicciones de sus*

---

<sup>11</sup> Ver hoja de predicciones Actividad II. Etapa B.

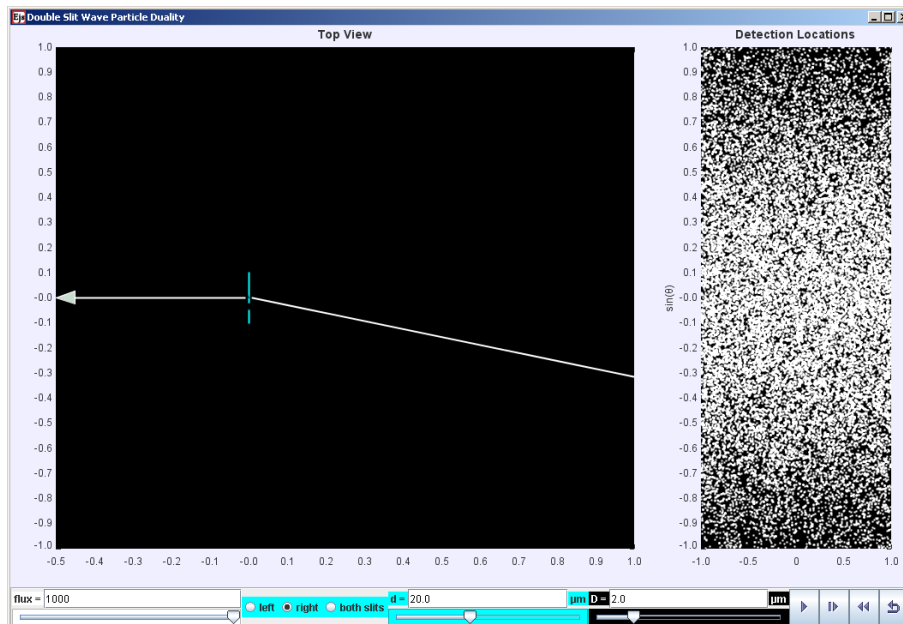
*compañeros, de tal forma que se genere una discusión colaborativa respecto a lo que creen que va ocurrir.*

En toda esta etapa el docente no debe hacer comentarios sobre las predicciones (si son correctas o incorrectas). La labor del docente en esta etapa es guiar a los estudiantes para que identifiquen los principios físicos que sustentan sus predicciones. Si **ningún** estudiante elige alguno de los pensamientos alternativos más comunes, el docente debe presentarlos diciendo algo así como “un estudiante en el curso anterior realizó esta predicción”.

### **Etapa C. Demostración experimental.** *(Tiempo de duración: 25 minutos).*

A continuación el docente realiza la demostración experimental para el grupo curso, utilizando el simulador “*Double slit wave particle duality*” que simula el lanzamiento de electrones individuales por una rendija y una rendija doble y un detector del lugar donde llegan los electrones a una pantalla. Dicho simulador se puede descargar de la página web: <http://weelookang.blogspot.cl/2013/07/double-slit-wave-particle-duality-model.html>. Necesitando los plugin “Java”. Los estudiantes recogen los datos y resultados de manera grupal.

*Fig. 2: Montaje experimental: La imagen corresponde cuando los electrones individuales son lanzados y pasan sólo por la rendija izquierda. La pantalla muestra los puntos de localización de los electrones al llegar a ella.*



**Materiales:**

- Computador y software.
- Proyector Data.

**Procedimiento:**

A.- Configure el software para el lanzamiento de electrones individuales para una rendija simple, modificando el ancho de la rendija según el software se lo permita.

B.- Permita que los estudiantes observen y dibujen ordenadamente el esquema que se forma en la pantalla, en la hoja de datos. Los registros digitales se pueden permitir siempre y cuando recojan la imagen fielmente y además sean imprimibles para que se puedan registrar en la hoja de datos.

C.- Repita el procedimiento anterior para una rendija doble.

D.- Finalmente, muestre los resultados dados en el vídeo inicial para describir los resultados experimentales, a partir del segundo 10.

Luego, a partir de los datos registrados, los estudiantes responden a las siguientes preguntas:

**5. ¿Coinciden sus predicciones con lo observado?. Complete la siguiente tabla:**

*En esta etapa los estudiantes sólo deben verificar si sus predicciones coinciden o no con el resultado del experimento.*

Luego de esta primera pregunta los estudiantes cuentan con una nota histórica que plantea y reafirma la hipótesis de que el electrón es un partícula. Esto con el objetivo de evitar cambios de concepciones al momento de la demostración experimental y se acepten los resultados experimentales sin dejar abandonada la hipótesis del electrón como partícula.

**6. ¿Cómo viajan los electrones hacia la pantalla?**

*En esta pregunta los estudiantes discuten en cada grupo cuál es la descripción de los electrones (en términos de ondas o partículas) que es consistente con lo observado.*

*Para verificar si tal distinción es reconocida por los estudiantes debe haber una coincidencia entre la respuesta a la pregunta ¿Onda o Partícula? y el dibujo de la propagación.*

*Así, por ejemplo, si el llamado “Caso B” tiene como respuesta “Onda” y como dibujo de la propagación un conjunto de trayectorias (líneas rectas), entonces es posible que el estudiante haya identificado los electrones con un fenómeno ondulatorio (tal vez gracias a la demostración experimental), pero no reconoce las características físicas que identifican la propagación de una onda.*

En tal caso el docente debería incentivar una discusión que revele las contradicciones entre las dos respuestas. El docente se puede apoyar de los resultados obtenidos del simulador para permitir resolver dichas contradicciones de los estudiantes. Se propone profundizar en cómo quedan mejor descritos los electrones en dicho experimento, que no son ni partículas ni ondas, para luego poder afirmar el comportamiento que describen en un experimento en particular.

**7. ¿Cuál de los dos comportamientos (onda o partícula) describe de forma consistente su predicción grupal? Explique.**

*El propósito de esta pregunta, en caso de no coincidir con el experimento, es identificar el hecho de que su predicción ha estado basada en una de las hipótesis sobre la naturaleza de los electrones y, a la luz de los resultados experimentales debe abandonar dicha hipótesis para describir dichos resultados.*

*Por otro lado, si su predicción coincide con el experimento, los estudiantes deberían poder reconocer si los argumentos que han utilizado para llegar a dichas predicciones son compatibles con el comportamiento ondulatorio de los electrones (probado a partir del experimento realizado).*

**8. ¿Qué comportamiento describen los electrones? ¿Depende del experimento?**

*Esta pregunta tiene como objetivo reforzar el hecho que lo que se observa en el experimento es compatible sólo con la hipótesis que los electrones han de ser descritos como una onda y no como partículas.*

El docente debería resumir las principales características de este comportamiento, resaltando la inevitable interpretación ondulatoria al que se le apropian los electrones en el experimento correspondiente al ser lanzados **uno a uno** por la doble rendija.

Finalmente, el docente puede mostrar la siguiente animación a modo de corrección de las descripciones de los distintos grupos y a modo de cierre de la Etapa, para concluir sobre si

depende del experimento (observador) el comportamiento de los electrones:  
[https://www.youtube.com/watch?v=Xmq\\_FJd1oUQ](https://www.youtube.com/watch?v=Xmq_FJd1oUQ)

**D. Discusión de situaciones físicas análogas.** (*Tiempo de duración: 30 minutos*).

En esta etapa el docente debe re direccionar los resultados de las actividades I y II, para que los estudiantes lleguen a construir una explicación respecto del fenómeno físico observado en relación al principio dualidad onda-partícula.

La tarea del docente es hacer que sean los estudiantes los que proporcionen las respuestas deseadas. Evitando “enseñar” a los estudiantes, entendido esto como decirles cuál es la respuesta correcta.

El docente puede fomentar la discusión de situaciones físicas análogas sugiriendo preguntas que respondan al mismo concepto físico, estas son:

**9. La luz está compuesta de partículas llamadas fotones. Al lanzar fotones hacia una rendija doble ¿Qué comportamiento describen los fotones?**

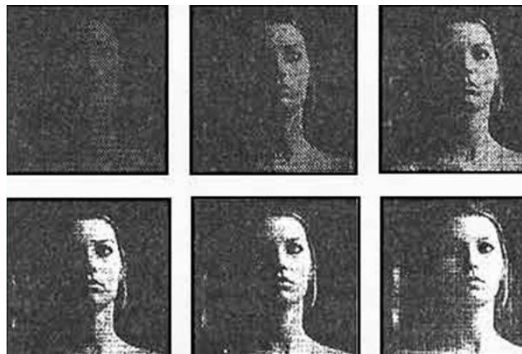
*La descripción de la luz como partícula en el mundo cuántico es contenido exclusivo del nivel cuarto año medio de enseñanza, por lo que es posible que los estudiantes declaren no conocer ningún experimento que describa dicho comportamiento de la luz y si esto es correcto o no.*

*Sin embargo una posibilidad es que los estudiantes puedan relacionar los fotones con el comportamiento de los electrones como partículas subatómicas y que por lo tanto, puede tener una descripción en términos de onda, dando por hecho que los fotones son partículas similares a los electrones.*

Se sugiere mostrar a los estudiantes el siguiente vídeo (en inglés) donde se visualiza la interferencia de fotones individuales al pasar por una doble rendija, de este modo se puede dar la discusión sobre la llegada de estos fotones individuales al azar en la pantalla, que más bien es la llegada de destellos y no de partículas puntuales como se entiende en la mecánica clásica y que a medida que van llegando más **fotones individuales** se forma un patrón de interferencia, siendo esto expresado por una función de onda, de la cual se puede obtener la probabilidad de localizar dichos destellos en la pantalla. [https://youtu.be/zsAvyVvO\\_6s](https://youtu.be/zsAvyVvO_6s)

También se puede utilizar el siguiente simulador para mostrar dicho experimento:  
<https://phet.colorado.edu/es/simulation/quantum-wave-interference>

Un ejemplo análogo al experimento visto de la luz descrita como partícula son las fotografías hechas usando técnicas de amplificación electrónica como la que se muestra a continuación. Estas son una ilustración obligada de la granularidad que exhibe la luz en interacción con la materia. Bajo iluminación excesivamente débil el modelo (cada punto corresponde a un fotón) aparece casi al azar, pero cuando el nivel de la luz aumenta el carácter cuántico del proceso desaparece gradualmente.



*Fuente: hecht-zajac, 1986.*

### **Pregunta de evaluación.**

**10. Redacten una explicación sobre cómo se comportan las partículas subatómicas en base a las actividades desarrolladas.**

*El objetivo de este ejercicio consiste en que los estudiantes puedan concluir sobre el comportamiento de las partículas subatómicas según lo observado en la actividad I y II. Para el profesor estas explicaciones son funcionales para determinar el nivel de comprensión que los estudiantes han alcanzado al final de la actividad.*

Finalmente resulta útil contextualizar dicho contenido en sus aplicaciones, en particular en sus aplicaciones tecnológicas de uso cotidiano. El siguiente vídeo muestra algunas aplicaciones de interés para los estudiantes: <https://www.youtube.com/watch?v=7NP8Fw67NUU>

### **Referencias vídeos**

- Difracción de un haz de luz: <https://www.youtube.com/watch?v=a8FTTr2qMutA>
- Interferencia de luz solar: <https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0>
- Interferencia de electrones: <https://www.youtube.com/watch?v=6gSIG2FBMu0>
- Interferencia de fotones individuales: <https://www.youtube.com/watch?v=TT-uCLwKhQ>
- Animación del principio dualidad onda-partícula: [https://www.youtube.com/watch?v=Xmq\\_FJd1oUQ](https://www.youtube.com/watch?v=Xmq_FJd1oUQ)

### **Referencias bibliográficas sugeridas para el docente**

Clases Interactivas Demostrativas: Las Clases Interactivas Demostrativas (ILDs por sus siglas en inglés) siguen una metodología basadas en el aprendizaje activo de la física e incluye actividades donde el alumno hace predicciones, analiza fenómenos, discute con sus compañeros y reflexiona sobre lo aprendido. Esta metodología ha mostrado buenos resultados incluso con grupos con más de 40 estudiantes (Diana López, 2016).

- <http://buphy.bu.edu/~duffy/ILD.html>
- <https://www.youtube.com/watch?v=933XYfUZGUo>
- <http://bdistancia.ecoesad.org.mx/?articulo=el-aprendizaje-activo-de-la-fisica-en-los-cursos-en-linea-del-ipn>

Dualidad onda-partícula

- [http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III\\_01.html](http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html)
- [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-010-2602-4\\_10#page-1](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-010-2602-4_10#page-1)

Principio de superposición

- Página 8. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/wasbleibt/57355817/57355817.pdf>

Ideas previas de los estudiantes

- <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Rz5RumT9WtQJ:https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3697858.pdf+&cd=6&hl=es&ct=clnk&gl=cl>

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una propuesta didáctica coherente con un enfoque de aprendizaje activo para enseñar la dualidad onda-partícula con la metodología llamada Clases Interactivas Demostrativas.

Considerando que es importante enseñar contenidos que contribuyan a alfabetizar científicamente a los estudiantes, y dada la necesidad de abordar la temática de mecánica cuántica en las aulas en base a la realidad del avance tecnológico que hoy está presente en la vida cotidiana de los estudiantes, se espera que esta propuesta motive y apoye la labor de incorporar este tema como una pequeña aproximación a las bases de la mecánica cuántica.

El diseño de la propuesta didáctica fue retroalimentada con las evaluaciones de cinco profesores de aula secundaria y dos profesores de aula universitaria, las cuales aportaron enormemente en el refinamiento de detalles técnicos, pedagógicos y de contenido.

Así, la propuesta consensuada cuenta con una guía para el docente que apoya tanto el contenido conceptual como el procedimiento para implementar las actividades con los estudiantes en el aula escolar. Además, favorece la implementación de nuevas estrategias en el aula, en coherencia con los nuevos enfoques y paradigmas educativos.

Una de las sugerencias que dio motivo de discusión importante en las preguntas planteadas a los estudiantes, es que si era necesario mostrar tanto los fenómenos de difracción y de interferencia de la luz, pues luego con los electrones individuales la experiencia se reduce sólo al fenómeno de interferencia y bastaba hacer el experimento con la doble rendija tanto para la luz como para los electrones individuales para visualizar la dualidad onda-partícula.

Finalmente, es importante destacar que para comprender el significado de la dualidad onda-partícula, es necesario dar cuenta de los distintos comportamientos que describen no tan sólo los electrones individuales sino que también la luz, al pasar por una rendija simple, una rendija doble o con un detector después de las rendijas en ambos casos. De lo contrario las dificultades epistemológicas persisten en el sentido de que los electrones queden caracterizados como partículas clásicas pero más pequeñas o que los fotones queden caracterizados en su descripción igual al comportamiento que los electrones individuales presentan. Esta discusión



fue abordada en la secuencia a raíz de las sugerencias de los evaluadores, con mayor énfasis en las orientaciones para el docente ya que es importante su rol como guía y orientador en el trabajo de los estudiantes.

Las diversas sugerencias que aportaron a refinar la propuesta didáctica nos muestran, primero, que la metodología utilizada es ampliamente flexible ya que se pueden combinar con temáticas de cursos anteriores y/o adelantar contenidos del nivel según corresponda. Segundo, esta metodología permite profundizar los contenidos de una forma no tradicional, es decir, sin que el docente asuma un rol de expositor frente al aula. Se potencia en toda la propuesta, la participación intelectualmente activa de los estudiantes a través del trabajo colaborativo.

Se sugiere como prospectiva para esta propuesta, su adaptación a nivel universitario profundizando en el análisis cuantitativo de los casos propuestos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alzate Piedrahita, M. V., Gómez Mendoza , M. A., & Romero Loaiza, F. (1999). *Textos Escolares y representaciones sociales de la familia 1: definiciones, dimensiones y campos de investigación*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Angarita Posada, D. S., & Pino Sánchez, J. D. (Junio de 2016). A propósito de la dualidad onda-partícula: una re-significación conceptual desde los planteamientos de Louis de Broglie. Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de [http://ayura.udea.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/2197/1/JD0386\\_davidangarita\\_juanpino\\_ondapartícula.pdf](http://ayura.udea.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/2197/1/JD0386_davidangarita_juanpino_ondapartícula.pdf)
- Bachelard, G. (200). La formación del espíritu científico. *Contribución a un psicoanálisis del conocimiento objetivo*. México, D.F.: siglo veintiuno editores, s.a.
- Barbero, A. J. (s.f.). Difracción de la luz. Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de <https://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/Practicas/DifraccionRendija.pdf>
- Bardin, L. (1986). *Análisis de Contenido*. Madrid: Ediciones Akal, S.A.
- Benegas, & Villegas. (2013). *El aprendizaje activo y la enseñanza de la física*. En Benegas, Pérez y Otero. (2013), *El aprendizaje activo de la física básica universitaria (pp. 57-62 )*. Santiago de Compostela: Andavira.
- Bustos, L., Otaíza, A., & Yupangui, M. (2013). La física Moderna en la educación media. *Eureka, Enseñanza de las ciencias físicas, memorias y Tesinas.*, 29-31.
- Campanario, J. M., & Moya, A. (1999). ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. *Enseñanza de las ciencias*, 17 (2), 179-192.
- Casanovas , I. (2005). La Didáctica en el diseño de simuladores digitales para la formación universitaria en la toma de decisiones: Un modelo teórico metodológico de diseño de simuladores de toma de decisiones basado en indicadores didácticos. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales Vol. 2(6)*, 17-34.
- Cataldi, Z., Lage, F. J., & Dominighini, C. (2013). Fundamentos para el uso de simulaciones en la enseñanza . *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales Vol. 10(17)*, 8-16.
- Contreras, G. A., & Carreño, P. (2012). Simuladores en el ámbito educativo: un recurso didáctico para la enseñanza. *INGENIUM Revista de la facultad de Ingeniería. Año 13. n° 25*, 107-119.

- Contreras, S., & González, A. (2014). La selección de contenidos conceptuales en los programas de estudio de Química y Ciencias Naturales Chilenos: Análisis de los niveles macroscópico, microscópico y simbólico. *Educ. quim.* 25 (2), 97-103.
- Esteba Ramos, D. (2013). <http://cvc.cervantes.es>. *Publicaciones centro*, 407-415.
- F. Pantoja, G. C., Moreira, M. A., & Herscovitz, V. E. (2013). La enseñanza de conceptos fundamentales de Mecánica Cuántica a alumnos de graduación en Física. *Revista electrónica de investigación en educación en ciencias*. V.9, 22-39.
- Fanaro, M., Otero, M. R., & Arlego, M. (2007). Nociones matemáticas necesarias para reconstruir fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela: la importancia de los vectores y los números complejos. *Acta I Encuentro Nacional sobre Enseñanza de la matemática.*, (págs. 297-309).
- Faúndez, Rojas, Pinto, & Astudillo. (2015). Taller de Física Cuántica: un Método para Introducir Conceptos Fundamentales en una Actividad Extracurricular. *Scielo Chile*.
- Furió, C., Solbes, J., & Carrascosa, J. (2006). Las ideas alternativas sobre conceptos científicos: tres décadas de investigación. *Revista Alambique* 48, 64-77.
- Gamow, G. (1958). *En el país de las maravillas. Relatividad y cuantos*. Fondo de Cultura Económica: México 12, D.F.
- Garrido de Barrios, N., Arias-Rueda, M. J., & Flores, M. (2014). Tendencias educativas en el marco del aprendizaje y enseñanza de conceptos fundamentales de física cuántica. *Omnia. año 20. N°3*, 34-64.
- Gil Pérez, D., & Vilches Peña, A. (2001). Una alfabetización científica para el siglo XXI. Obstáculos y propuestas de actuación. *Investigación en la escuela*, 43, , 27-37.
- Gobierno de Chile, Ministerio de Educación. (Diciembre de 2009). Recuperado el 16 de Octubre de 2016 de <http://www.agenciaeducacion.cl/wp-content/uploads/2013/02/Marco-Curricular-y-Actualizacion-2009-I-a-IV-Medio.pdf>
- Gómez B., J. C. (29 de Diciembre de 2012). <http://www.oei.es>. Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de <http://www.oei.es>: <http://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?La-alfabetizacion-cientifica-desde>
- Hake , R. R. (1998). Interactive-engagement methods in introductory mechanics courses. *Am.J.Phys.* 66, 64-74.
- HECHT-ZAJAC. (1986). *Optica*. Wilmington, Delaware: Addison-Wesley Iberoamericana, S.A.

- Heisenberg, W. (1930). *The physical principles of the quantum theory*. Chicago: Dover publications, Inc.
- Heisenberg, W. (1955). *La imagen de la naturaleza en la física actual*. Antwan.
- Hernández, C., Tecpan, S., & Osorio, A. (2015). Aprendizaje activo para futuros docentes de Física: Estrategias en un curso de didáctica. *ACTas IV Jornadas de Enseñanza e Investigación Educativa en el campo de las Ciencias Exactas y Naturales*. La Plata .
- Heusler, S. (2010). *Visualization of quantum entanglement*. Münster : Institut für Didaktik der Physik.
- Heyneman, S. P. (2006). La función de los libros de texto en un sistema de educación moderno: hacia una educación de buena calidad para todos. *Conferencia plenaria 1° Congreso Internacional de Textos Escolares*. Santiago.
- Hoekzema, D., van den Berg, E., Schooten, G., & van Dijk, L. (2008). The particle/wave-in-a-box model in Dutch secondary schools. *Phys. Educ.* 42, 391-398.
- Huber, G. L. (2008). Aprendizaje Activo y metodologías educativas . *Revista de educación, número extraordinario* , 59-81.
- Jiménez Aleixandri, M. P., Álvarez Pérez, V., & Lago Lestón, J. M. (2005). La argumentación en los libros de textos de ciencias. *Tarbiya*, 36, 35-58.
- Jiménez Valladares, J., & Perales Palacios, F. J. (2001). Aplicación del análisis secuencial al estudio del texto escrito e ilustraciones de los libros de física y química de la ESO. *Enseñanza de las ciencias* 19(1), 3-19.
- Ladrón, M. H. (2008). Revisión por pares: ¿Qué es y para qué sirve? *Revista científica salud Uninorte, Vol 24, N°2*.
- Lallena Rojo, A. M. (5 de Junio de 2014). El efecto tunel. La desintegración alfa y los orígenes de la mecánica cuántica. Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de <https://desayunoconfotones.org/2014/06/05/el-efecto-tunel-la-desintegracion-alfa-y-los-origenes-de-la-mecanica-cuantica/>
- Maiztegui, A., & y otros. (2002). Papel de la tecnología en la educación científica: una dimensión olvidada. *Revista Iberoamericana de Educación*.
- Marco Stiefel, B. (2002). *Educación para la ciudadanía: Un enfoque basado en el desarrollo de competencias transversales*. Madrid: Narcea.

- Martá Vargas, J. F. (2008). Pedagogía y Universidad. Obstáculos epistemológicos en la formación pedagógica del docente universitario. *Revista educación y desarrollo social*, 30-44.
- McDermott, R. (2001). *La adquisición de un niño por una discapacidad de aprendizaje*. Buenos Aires: Amorrortu.
- McKagan, S. B., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. (2010). Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. *Physics Education Research* 6.
- Michele Ladrón de Guevara Cervera, J. H. (2008). Revisión por pares: ¿Qué es y para qué sirve? *Revista Científica Salud Uninorte* .
- Mora, C. (2008). *Fundamentos del Aprendizaje Activo de la Física. X Taller internacional sobre la enseñanza de la Física*. La Habana: Educación Cubana.
- Müller, R., & Wiesner, H. (2002). *STUDENTS' CONCEPTIONS OF QUANTUM PHYSICS*. München.
- National Science Education Standards (1996). Recuperado el 16 de Octubre de 2016 de <https://www.nap.edu/read/4962/chapter/1>
- Navarro Faus, J. (2012). *¿Existe el mundo cuando no lo miras?* Barcelona: RBA.
- OCDE. (Marzo de 2013). Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de <https://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/Draft%20PISA%202015%20Science%20Framework%20.pdf>
- OCDE. (s.f.). Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de <https://www.oecd.org:https://www.oecd.org/pisa/39730818.pdf>
- Olsen, R. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. . *International Journal of Science Education*, 24(6), 565-574.
- Orozco Martínez, J. (2012). El aprendizaje activo de la Física en los cursos en línea del IPN. *Revista Mexicana de bachillerato a distancia*, 71-77.
- Otero, J. y. (2005). La comprensión de los libros de textos de ciencias. *Tarbiya*, 36, 5-9.
- Pereira , A. P., Cavalcanti, & Ostermann, F. (2009). On the use of virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. *Physics Education*, 44(3), 281-291.

- Pereira, A. P., Freire, C., Cavalcanti, & Ostermann, F. (2012). Uma abordagem conceitual fenomenológica dos postulados da física quântica. . *Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 29, Especial 2*, 831-863.
- Pontificia Universidad Católica de Chile . (2010). *Formando sujetos competentes en ciencias para los desafíos de un mundo en transformación*. Santiago: Bellaterra S.A.
- Porlán Ariza, R. (1998). Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de <http://www.raco.cat/index.php/ensenanza/article/viewFile/83243/108226>
- Pozo, J. I., & Gómez Crespo, M. A. (1998). *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*. Madrid: Morata.
- Proyecto de Ciencias Marco. (Marzo de 2013). Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de <https://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/Draft%20PISA%202015%20Science%20Framework%20.pdf>
- Ramirez Maldonado, G. Y., Lopez Ortega, A., & Ramirez Diaz, M. H. (2013). Clases demostrativas interactivas de magnetismo en el bachillerato del IPN . *Lat. Am. J. Phys. Educ, 27-36*.
- Reviglio, A. (2014). *Nanotecnología hoy: El desafío de conocer y enseñar*. Buenos Aires: Ministerio de Educación.
- Rosenfeld, L. (1973). The wave-particle Dilemma. En *The Physical Conception of Nature* (págs. 251-253).
- Rosenfeld, L. (1973). The Wave-Particle Dilemma. *The Physical Conception of Nature*, vol. 3, 251-253.
- Sabariego del Castillo , J. M., & Mazanares Gavilán , M. (2006). Alfabetización Científica. *I Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Sociedad e Innovación CTS+I*, (pág. 9). Palacio de Minería.
- Sadaghiani, H. R., & Pollock , S. J. (2015). Quantum mechanics concept assessment: Development and validation study. *Physics Education Research 11*.
- Scarini, V., & Suarez, A. (1998). Introducing quantum mechanics: One-particle interferences. *Am. J. Phys. 66 (8)*, 718-721.
- Schaposnik, F. A. (2014). *Qué es la Física Cuántica*. Buenos Aires: PAIDÓS.
- Schibeci, R. (1984). Attitudes to science: an update. *Studies in Science Education, 11*, 26-59.

- Segura, A., Nieto, V., & Segura, E. (21 de Marzo de 2012). Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de [http://www.lajpe.org/mar12/22\\_LAJPE\\_618\\_Aaron\\_Segura\\_preprint\\_corr\\_f.pdf](http://www.lajpe.org/mar12/22_LAJPE_618_Aaron_Segura_preprint_corr_f.pdf)
- Serrano Zárate , R. (Marzo de 2013). Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de [http://www.cicata.ipn.mx/OfertaEducativa/MFE/Estudiantes/Documents/Raquel\\_Serrano\\_2013\\_MCFE.pdf](http://www.cicata.ipn.mx/OfertaEducativa/MFE/Estudiantes/Documents/Raquel_Serrano_2013_MCFE.pdf)
- Serway, R. A., & Jewett, Jr., J. W. (2008). *FÍSICA para ciencias e ingeniería*. México D.F: Cengage Learning, Inc.
- Silvestri, S. O., Munuce, A. C., Alassia, M. E., Seferian, A., Reviglio, A., & Soria, L. R. (2014). *Nanotecnología hoy: El desafío de conocer y enseñar*. Buenos Aires: Ministerio de educación de la Nación.
- Sinarca, V., & Solbes, J. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las ciencias. Revista de Investigación y experiencias didácticas. Núm. 31. 1*, 9-25.
- Singh, C. (2001). Student understanding of quantum mechanics. *Am. J. Phys.* 69(8), 885-896.
- Sokoloff, D. (2006). Active Learning in Opticas and Photonics, First edition. En D. Sokoloff, *Active Learning in Opticas and Photonics, First edition* (pág. 10). Paris France: Unesco.
- Solbes, J., & Sinarcas, V. (2009). Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales. N°23.* , 123-151.
- Thornton, S. D. (2004). *Interactive Lecture Demonstration Active Learning in Introductory Physics*. EUA: John Wiley & Sons.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología*. Barcelona: Reverte.
- Treagust, D. F., & Duit, R. (2009 ). Multiple Perspectives of Conceptual Change in Science and the Challanges Ahead. *Journal of science and Mathematics Education in Southeast Asia*, 89-104.
- UNESCO. (1999). Declaración sobre la ciencia y el uso del saber científico. *Adoptada por la Conferencia mundial sobre la ciencia*. Budapest.
- Unidad de Currículum y Evaluación, Ministerio de Educación de Chile. (Enero de 2015). Recuperado de [http://www.curriculumenlineamineduc.cl/605/articles-30013\\_recurso\\_29\\_3.pdf](http://www.curriculumenlineamineduc.cl/605/articles-30013_recurso_29_3.pdf)

- Valverde, G., & Näslund-Hadley, E. (Noviembre de 2010). Recuperado el 16 de Octubre de 2016, de <http://www.iadb.org/wmsfiles/products/publications/documents/35547376.pdf>
- Vásquez-Alonso, Á., Acevedo-Díaz, J. A., & Manassero Mas, M. A. (2005). Más allá de la enseñanza de las ciencias para científicos: hacia una educación científica humanística. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*.
- Vázquez-Alonso , Á., Acevedo-Díaz, J. A., & Manassero Mas, M. A. (2005). Más allá de la enseñanza de las ciencias para científicos: hacia una educación científica humanística. *Revista electrónica de Enseñanza de las Ciencias Vol. 4 N°2*.
- Venegas, M. C. (1993). *El texto escolar: cómo aprovecharlo*. MEN-CARLALC.



## ANEXO

**Anexo I:** Tabla de frecuencias de cada uno de los conceptos incluidos en los textos escolares analizados.

Texto 1	Frecuencia	Texto 2	Frecuencia	Texto 3	Frecuencia
Núcleo	86	Núcleo	92	Energía	63
Energía	71	Átomos	61	Átomo	61
Átomos	52	Energía	59	Núcleo	58
Electrones	38	Electrones	55	Electrones	44
Protones	36	Masas	47	Partículas	44
Masa	35	Neutrones	31	Masa	37
Neutrones	31	Elemento	25	Elemento	27
Partículas	30	Carga	23	Fuerza	26
Nucleones	26	Modelo atómico	19	Neutrones	25
Fuerza	25	Decaimiento	18	Protones	20
Elemento	20	Fuerza	18	Materia	17
Radiación	18	Materia	15	Modelo atómico	16
Isótopos	18	Nucleones	14	Quarks	14

Núclidos	17	Estado	12	Onda	12
Modelos atómicos	12	Fotón	10	Carga	11
Carga	11	Desintegración	8	Decaimiento	9
Modelos nucleares	11	Fisión nuclear	6	Nucleones	9
Número másico	11	Fusión nuclear	5	Sustancias	9
Estabilidad nuclear	10	Líneas espectrales	5	Velocidad	7
Estado	10	Modelo del átomo	5	Fisión nuclear	6
Interacción	9	Modelo estándar de la materia	5	Momentum	6
Número cuántico	8	Núclido	5	Estado estacionario	5
Espin	6	Número atómico	5	Fotones	5
Número atómico	6	Cantidad de movimiento	4	Mecánica cuántica	5
Materia	5	Espectro de emisión	4	Número cuántico	5

Sistema	4	Isótopos	4	Principio de incertidumbre	5
Física atómica	3	Momento lineal	4	Estabilidad nuclear	4
Función de onda	3	Mecánica cuántica	3	Líneas espectrales	4
Constante de Planck	3	Momento angular	3	Número másico	4
Campo magnético	2	Muón	3	Radiación electromagnética	4
Física clásica	2	Neutrino	3	Constante de Planck	3
Fotón	2	Niveles de energía	3	Interacción nuclear débil(fuerza débil)	3
Fusión	2	Antineutrino	2	Scattering	3
Momento angular	2	Constante de Planck	2	Trayectoria	3
Momentos magnéticos	2	Dualidad onda-corpúsculo(partícula)	2	Vida media	3
Principio de conservación de la energía	2	Momento P	2	Cuantización de la energía	2

Principio de conservación de la masa	2	Número másico	2	Fisión controlada	2
Principio de exclusión de Pauli	2	Bosones	1	Fusión nuclear	2
Radiactivos	2	Corriente eléctrica	1	Glucos	2
Sustancia radiactiva	2	Cuanto de energía	1	Interacción nuclear fuerte	2
Velocidad de la luz	2	Diferencia de potencial	1	Interacciones fundamentales	2
Atracción electrostática	1	Electromagnetismo (leyes de Maxwell)	1	Leptones	2
Campo simétrico centrado promediado	1	Espín	1	Mesones	2
Cantidad de movimiento angular (L)	1	Estabilidad nuclear	1	Modelo estándar	2
Decaimiento radiactivo	1	Función de onda	1	Modelo mecánico cuántico	2
Desintegración radiactiva	1	Glucos	1	Momento angular	2

Diferencia de potencial	1	Gravitones	1	Bariones	1
Física general	1	Inestabilidad nuclear	1	Bosones	1
Física nuclear	1	Interacción gravitatoria	1	Campos magnéticos	1
Isóbaros	1	Leptones	1	Configuración electrónica	1
Isómeros	1	Ley de Coulomb	1	Cuantos de energía	1
Isótonos	1	Modelo mecánico-cuántico	1	Diferencia de potencial	1
Ley de coulomb	1	Movimiento acelerado	1	Dualidad onda-partícula	1
Leyes de newton	1	Movimiento circunferencial uniforme	1	Emisiones Alfa	1
Mecánica clásica	1	Neutrinos electrónicos	1	Emisiones beta	1
Positrones	1	Neutrinos muónicos	1	Emisiones gamma	1
Potencial de Yukawa	1	Neutrinos tauónicos	1	Espectros atómicos	1
Rayos catódicos	1	Número cuántico	1	Estado base	1

		principal (n)			
Rayos gamma	1	Interacción electromagnética	1	Física de alta energía	1
Tensión superficial	1	Sistema ligado	1	Física de partículas	1
Teoría de Bohr	1	Principio de incertidumbre	1	Función de onda	1
Teoría de la relatividad	1			Isótopos	1
Trayectoria circular	1			Ley de Coulomb	1
				Modelo del decaimiento radiactivo	1
				Movimiento circular	1
				Neutrones libres	1
				Número atómico	1
				Osciladores electromagnéticos	1
				Principio de inercia	1

	Spin	1
	Teoría cuántica	1
	Teoría electromagnética	1
	Teoría de campo unificado	1

*Tabla 1.0: Análisis de contenido de 3 textos escolares.*

**Anexo 2:**

Rúbrica de evaluación

Luego de revisar la propuesta, valore cada uno de los indicadores propuestos, según las siguientes equivalencias:

1: En desacuerdo

3: De acuerdo

2: Indeciso/a

N.O.: No observado

<b>Sobre la propuesta en general:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>N.O.</b>
Son coherentes los objetivos propuestos con el desarrollo de las actividades.				
Existe coherencia en las etapas de las actividades.				
Todos las preguntas son necesarias en el desarrollo de las actividades para cumplir los objetivos				
Las cuadros recordatorios son pertinentes para el desarrollo de las actividades.				
Es factible el tiempo propuesto para cada actividad.				
Se fomenta el razonamiento científico expresamente.				
Permite a los estudiantes desarrollar				



explicaciones cualitativas.				
Es adecuada para implementar el Principio de dualidad onda-partícula.				
Los recursos digitales contribuyen en el logro de los objetivos.				
Favorece la visualización real del fenómeno estudiado.				
<b>Sobre las preguntas de cada etapa:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>N.O.</b>
Permiten un razonamiento cualitativo y explicaciones verbales.				
Contribuyen al logro del objetivo de la propuesta didáctica.				
Existe una cantidad suficiente de preguntas.				
Siguen un orden lógico y coherente con la metodología utilizada.				
Están relacionadas con las habilidades científicas del nivel.				
Permiten visualizar dificultades conceptuales de los estudiantes.				

Observaciones:

Por favor, señale a continuación cualquier comentario que considere usted necesario para mejorar la propuesta.

--

Nombre del Evaluador	Establecimiento educacional
Fecha	Firma (puede ser digital)

Gracias por su colaboración y participación.