



## Estado del arte: tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016

- State of the Art: Trends in Teaching Quantum Physics between 1986 and 2016
- Estado da arte: tendências do ensino da física quântica entre 1986 e 2016

### Resumen

El artículo presenta un estado del arte de la enseñanza de la física cuántica desde el cual ha sido posible identificar siete tendencias que pueden resultar útiles para futuras investigaciones relacionadas con el mejoramiento en los procesos de enseñanza y aprendizaje de este campo de conocimiento científico. Se siguió una metodología cualitativa-interpretativa-hermenéutica, lo que implicó la búsqueda documental para posteriormente elaborar categorías de análisis y, desde allí, favorecer la organización, la interpretación, la comparación y la identificación de características comunes y diferenciadoras. De este estudio se concluye que la ausencia de reflexión conceptual sobre la física cuántica genera dificultades en el proceso de formación de los estudiantes, ya que los fundamentos de este conocimiento por lo general son contrarios a la intuición de los educandos, y por esta razón, la consideran un conocimiento abstracto y difícil. Por otra parte, se aprecia un énfasis fuerte en enfoques de enseñanza basados en asuntos algorítmicos con poco análisis, lo que ahonda las dificultades de aprendizaje, pues en muchas ocasiones los estudiantes no poseen el conocimiento matemático requerido. Las soluciones a las dificultades de la enseñanza de la física cuántica no son definitivas; sin embargo, se encuentra un cierto reconocimiento a los alcances de la naturaleza de las ciencias, como alternativa para repensar su enseñanza y la formación inicial y continuada de profesores de ciencias.

### Palabras clave

enseñanza de la física; física cuántica; libros de texto; antecedentes académicos; naturaleza de las ciencias

Yeison Javier Cuesta-Beltrán\*

\* Magíster en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales, estudiante del Doctorado Interinstitucional de Educación (DIE), integrante del Grupo de Investigación Didaquim, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

yjcestab@correo.udistrital.edu.co.

ORCID: <http://0000-0001-7552-6507>.



## Abstract

The paper presents the state of the art of teaching of quantum physics, based on which we were able to identify seven (7) trends, which may be useful for future research related to the improvement of teaching and learning processes in this field of scientific knowledge. We followed a hermeneutic-interpretative-qualitative methodology, which involved documentary search to later elaborate categories of analysis and, based on that, encouraging the organization, interpretation, comparison and identification of common and differentiating characteristics. From this study, it is concluded that the absence of conceptual reflection on quantum physics generates difficulties in the education process of the students, since the foundations of this knowledge are generally contrary to the students' intuition and, for this reason, they see quantum physics as an abstract and difficult type of knowledge. On the other hand, there is a strong emphasis on teaching approaches based on algorithmic issues with little analysis, which deepens the learning difficulties, since in many cases students do not possess the required mathematical knowledge. The solutions to the difficulties of teaching quantum physics are not definitive; however, there is a certain recognition of the scope of the nature of sciences as an alternative to rethink their teaching and the initial and continued training of science teachers.

## Keywords

physics education; quantum physics; textbooks; academic background; nature of science

## Resumo

O artigo apresenta um estado da arte do ensino da física quântica desde o qual foi possível identificar sete (7) tendências que podem ser úteis para futuras pesquisas relacionadas com o melhoramento nos processos de ensino e aprendizagem neste campo de conhecimento científico. Utilizou-se uma metodologia qualitativa-interpretativa-hermenêutica, que implicou busca documental para posteriormente elaborar categorias de análise e, desde esse ponto, favorecer a organização, a interpretação, a comparação e a identificação de características comuns e diferenciadoras. Deste estudo podemos concluir que a ausência de reflexão conceitual sobre a física quântica gera dificuldades no processo de formação dos estudantes, pois os fundamentos deste conhecimento são, geralmente, contrários à intuição dos educandos e, por isso, eles consideram a física quântica um conhecimento abstrato e difícil. Por outra parte, podemos apreciar uma forte ênfase em abordagens de ensino baseados em assuntos algorítmicos com pouca análise, o que aprofunda as dificuldades de aprendizagem, já que em muitas ocasiões os estudantes não possuem o conhecimento matemático requerido. As soluções às dificuldades do ensino da física quântica não são definitivas, porém há um certo reconhecimento dos alcances da natureza das ciências como alternativa para repensar seu ensino e a formação inicial e continuada dos professores de ciências.

## Palavras-chave

ensino da física; física quântica; livros de texto; antecedentes acadêmicos; natureza das ciências

## Introducción y contextualización

La Física Cuántica (FC) ha adquirido gran reconocimiento debido a la aplicación de sus planteamientos para el desarrollo de tecnologías revolucionarias como el láser o el transistor, entre otros avances que han permitido progreso en la salud, la ingeniería y en múltiples campos del saber, lo que ha generado impacto directo en la sociedad. La FC además ha posibilitado nuevos enfoques debido a sus implicaciones, desde donde se elaboran discursos y discusiones como la filosofía de la incertidumbre, el papel del observador en un fenómeno, entre otras posturas que han causado controversia en la física y en otras ramas del saber. La FC es una de las ramas más importantes de la física en el siglo xx, debido a su revolución conceptual para explicar los fenómenos, lo que ha modificado la manera en que los físicos ven la naturaleza, lo que justifica el interés de maestros e investigadores por estudiar los procesos de enseñanza y aprendizaje de la FC desde mediados del siglo xx (Akarsu, 2010).

Este artículo tiene como objetivo establecer cuáles son las tendencias más importantes en el estado del arte de la enseñanza de la FC. Para este trabajo se revisaron y analizaron 87 artículos publicados entre 1986 y 2016, tiempo definido debido a que en esas tres décadas se ha consolidado la didáctica de las ciencias como una disciplina emergente, y a su vez ha aumentado su número de publicaciones. La cantidad de material bibliográfico estudiado dependió del acceso a la literatura, por tanto el número de documentos analizados no corresponde a la totalidad de artículos publicados en el periodo enunciado.

La pregunta de investigación planteada para este trabajo es: ¿Cuáles son las tendencias más importantes en el estado del arte de la enseñanza de la FC entre 1986 y 2016? Con el fin de intentar abordar el interrogante

orientador se ha propuesto el siguiente diseño metodológico y fases de trabajo.

## Diseño metodológico y fases de trabajo

El fundamento metodológico propuesto para este estudio es el enfoque cualitativo interpretativo hermenéutico, con carácter documental en la modalidad de estado del arte. Según Vargas y Calvo (1987), el estado del arte es el estudio del conocimiento acumulado en documentos escritos, que tiene el propósito de inventariar, sistematizar y reflexionar con respecto a un conocimiento específico, lo que permite establecer tendencias y ausencias en un área concreta. Londoño, Maldonado y Calderón (2014) indican que el estado del arte permite al investigador plantear una postura crítica, con relación a lo que se ha realizado y lo que se ha dejado de hacer en un tema en específico, con lo que se configura un panorama general para no repetir estudios. Asimismo se pueden identificar maneras en que los investigadores han superado obstáculos propios del saber. Los autores señalan que el estado del arte genera nuevas hipótesis y problemáticas de investigación, razón por la cual es imprescindible en la fase inicial de los procesos investigativos.

El estudio se desarrolló en las siguientes fases:

1. *Preparatoria o iniciación:* se seleccionó la enseñanza de la FC como tema central para el estado del arte, además se estableció el objetivo y el problema de investigación.
2. *Exploración:* se avanzó en la comprensión del problema a través de la lectura analítica de trabajos acerca de la enseñanza de la FC. Se usó para la búsqueda documental Google académico, Scopus, Scielo, Doaj, entre otros catálogos en línea.

3. *Descriptiva*: se establecieron los referentes documentales, se limitó el periodo de estudio y se propuso el diseño metodológico.
4. *Formulación*: se estableció la contextualización formal del trabajo, enfocados en la importancia de la enseñanza de la FC en la didáctica de las ciencias.
5. *Recolección*: compilación, clasificación y registro de la información extraída de los documentos revisados. Para esto se utilizó la categorización manual empleando el software Mendeley. Se establecieron subcategorías.
6. *Selección*: se organizó el material en tablas donde se presentan características de los documentos, como: autor, año de publicación, título, descripción del trabajo según el énfasis de clasificación y finalmente a quién va dirigido tal estudio.
7. *Interpretación*: a partir del análisis de antecedentes se identificaron aspectos en común y distanciamientos entre los estudios, lo cual permitió un trabajo comparativo que condujo al reconocimiento de algunas tendencias emergentes.
8. *Construcción teórica*: se construye el documento final.
9. *Publicación*: proceso para dar a conocer a la comunidad académica el estudio.

## Resultados y discusión

El análisis documental de 87 trabajos acerca de la enseñanza de la FC permitió el desarrollo de las siguientes subcategorías:

### Dificultades de enseñanza de la FC

A continuación se presentan algunas tendencias en esta subcategoría:

Akarsu (2010); Cid y Dasilva (2012); Solbes, Catalayud, Climent y Navarro (1987); Fanaro (2009); Frechina (1996); Greca y Moreira (2001); Hobson (1994); Johnston, Crawford y Fletcher (1998); Monteiro (2010); Moreno y Guarín (2010); Muller (2008); Pantoja, Moreira y Herscovitz (2013) y Sinarcas y Solbes (2013) en sus artículos señalan implícita o explícitamente la influencia de las matemáticas en la FC. Según estos autores, el formalismo matemático que se aborda comúnmente en la enseñanza convencional de las clases de FC presenta dificultades a los estudiantes, debido al alto nivel de abstracción sobre el cual reposan modelos de ciertos fenómenos cuánticos que se han intentado explicar. Si la clase mantiene un enfoque que privilegia el desarrollo algorítmico frente a lo conceptual, y además los educandos no poseen las bases matemáticas adecuadas, se podrían generar serios conflictos en el momento de intentar enseñar la FC.

Akarsu (2010); Hobson (1994); Frechina (1996); Fanaro (2009); Greca y Moreira (2001); Johnston et al. (1998); Moreno y Guarín (2010); Baily y Finkelstein (2010); Sinarcas y Solbes (2013) y Baily y Finkelstein (2015) indican que cuando en un curso de FC prevalece como eje la orientación algorítmica para sustentar la construcción conceptual, sin generar procesos de reflexión acerca de las abstracciones y sus implicaciones, se está cayendo en prácticas inadecuadas de enseñanza de la FC, ya que en la mayoría de los casos los educandos no alcanzan a comprender la dimensión de sus estudios, lo que convierte sus alcances de comprensión en una práctica operativa sin análisis. Por esta razón, se considera clave la reflexión conceptual debido a que los fundamentos de este conocimiento son por lo general contrarios a la intuición de los educandos, muchos de los cuales, por esta razón, consideran la física cuántica abstracta, compleja y difícil. Lo anterior corresponde a una configuración de elementos que constituyen grado de dificultad para la enseñanza y la comprensión de la FC.

Swinbank (1992); Terrazzan (1992 y 1994); Ostermann y Moreira (2000); Gil, Senent y Solbes (1987); Stannard (1990); Sinarcas y Solbes (2013) y Greca (2000) sugieren transformaciones en el currículo de la física en el bachillerato, en donde se incluya la física moderna, con el fin de construir en los estudiantes nociones de la física después de 1900, para acercarlos a los desarrollos científicos actuales e intentar sembrar curiosidad en ellos, que escasamente tienen contacto con algunos de estos temas a través de la televisión. La física moderna se ha considerado difícil para los estudiantes, no obstante la clásica también lo es, de forma que esta noción no puede ser impedimento para su enseñanza. Ahora, la física de los siglos XX y XXI, por ser más reciente, facilita los estudios históricos y epistemológicos, mediante visiones de ciencia no lineal, dotada

de unos acontecimientos particulares, pero no necesariamente secuenciales, con lo cual se intentaría superar en los estudiantes la visión acumulativa del desarrollo científico planteada por los libros de texto típicos.

Martínez, Savall, Doménech, Rey y Rosa (2016) señalan que una de las dificultades en didáctica de las ciencias es que aún no existe una propuesta en común sobre cómo abordar los cursos introductorios de FC, no se han acordado los contenidos de las clases, ni tampoco los enfoques interpretativos de los modelos científicos que intentan explicar algunas fenomenologías. Greca y Herscovitz (2002) indican que en ciertos cursos introductorios de FC se exponen los temas con alto formalismo matemático para ser el primer contacto de los educandos con las ideas cuánticas. Esto aleja al estudiante de la "realidad", debido a las múltiples abstracciones algorítmicas con escasa interpretación y reflexión.

Moreira y Greca (2004); Greca y Herscovitz (2002); Koopman, Kaper y Ellermeijer (2005); Solbes y Sinarcas (2010) y Baily y Finkelstein (2014) señalan que en ocasiones los educandos presentan serias confusiones entre la física clásica y la FC. Esto podría explicarse porque comúnmente la física se enseña en cierto orden, el tradicional que involucra primero lo clásico y luego lo cuántico, razón por la que salen a la luz los preconceptos clásicos de los estudiantes cuando toman la clase de FC, algunos en beneficio del proceso educativo, pero otro buen número de preconceptos se convierten en obstáculos representacionales, pues los educandos consideran las mismas leyes para ambos casos, sin tener en cuenta que difieren entre sus planteamientos fundamentales. En consecuencia, las analogías clásicas en la enseñanza de la FC son peligrosas, ya que en vez de aclarar, pueden presentar ideas erróneas y confusas para los estudiantes.

Solbes, Bernabeu, Navarro y Vento (1988) y Greca (2000) indican que en cursos de FC para el profesorado de ciencias o para científicos se presentan dinámicas bastante operativas, donde se privilegia el carácter matemático e instrumental de la FC, con escasa reflexión conceptual con respecto a lo que se está haciendo con los algoritmos, y su significado profundo, a tal punto que se ha llegado a sugerir que la FC es una herramienta poderosa que no es necesario entender. Ahora, muchos de estos profesores en formación replicarán la operatividad de la clase de FC a sus futuros estudiantes. Asimismo, se ha detectado en un buen número de profesores en formación errores conceptuales, que persisten aún después de terminar el curso: los futuros maestros confunden las ideas clásicas con las cuánticas en situaciones propias de la FC, estos errores probablemente se propagarán a sus estudiantes, y a libros de texto escritos por ellos.

Garrido, Arias y Flores (2014) manifiestan que la falta de comprensión de los conceptos de la FC hace que los estudiantes repitan y memoricen sin reflexionar. Esto hace que sea imposible resolver problemas, dificultades en la argumentación, apatía por el nuevo saber y bajos resultados en las pruebas. Por parte del maestro se incurre en intentar enseñar a sus estudiantes lo superficial, lo básico, asumiendo su labor pedagógica como un trabajo repetitivo, con escasa reflexión e investigación.

## Discusiones acerca de libros de texto para la enseñanza de la FC

A continuación se estudia la posición crítica encontrada en ciertos documentos que analizan algunos libros de texto de FC:

Koopman et al. (2005), Monteiro (2010), Savall (2015) y Vizcaíno (2016) manifiestan que en algunos libros de texto de FC se prioriza el desarrollo matemático sobre el conceptual, procurando un alto formalismo algorítmico, pretendiendo construir en el educando estructuras operacionales que lo formen en el “hacer” en FC. Por lo general, en los textos es escasa la interpretación del fenómeno físico y del significado de las abstracciones que dicen caracterizarlo, razón por la cual en ellos no se propician contextos que favorezcan el análisis y la discusión de los fenómenos. Es probable que la visión instrumentalista de algunos libros de texto sea extrapolada a los profesores de física y, por ende, a sus estudiantes. Koopman et al. (2005) indican que algunos libros en la fase inicial se enfocan en que el estudiante aprenda operativamente los algoritmos, y después abordan los significados, un proceso discontinuo entre la construcción conceptual y la formalización matemática.

Gil, Senent y Solbes (1986); Solbes et al. (1987); Frechina (1996) y Cid y Dasilva (2012) consideran que algunos libros que abordan la FC presentan errores conceptuales. Para Gil et al. (1986) estos errores se deben a que los libros no desarrollan adecuadamente la ruptura que existe entre la física clásica

y la física moderna, lo que genera dificultades conceptuales en la presentación de ideas fundamentales. Solbes et al. (1987) proponen que los errores surgen por tratar de explicar de forma sencilla y con escaso formalismo matemático algunos fenómenos, sobre los que yace poca intuición, motivo por el que se explican fenómenos cuánticos en términos clásicos, lo que va en detrimento de las argumentaciones. Frechina (1996) indica que algunos de los libros los escriben personas que no entienden a fondo la FC, de allí que se hagan planteamientos conceptuales acrílicos que se transmiten con múltiples errores a los estudiantes. Cid y Dasilva (2012) opinan que los errores conceptuales surgen por la falta de argumentos del autor del libro al intentar explicar un modelo, su origen y causas, así como a la visión científica positivista, a partir de la cual el autor realiza afirmaciones certeras acerca de los fenómenos. En muchos casos, tales afirmaciones no son del todo ciertas, este tipo de presentaciones no muestra el carácter dinámico de la física al estudiante.

Monteiro (2010) y Fanaro (2009) afirman que algunos libros de texto de FC han sido organizados temáticamente en orden cronológico sin tener en cuenta que el conocimiento científico no es lineal, y que otras organizaciones podrían permitir mayores alcances en lo que refiere a la comprensión. Monteiro (2010); Cid y Dasilva (2012); Domenech, Savall y Martínez (2013), Savall, DomenechMartínez (2013) y Savall (2015) destacan en los textos la ausencia de contextualización histórica acerca de las problemáticas científicas, las causas que originaron la crisis, los personajes, el impacto social de la ciencia, entre otras características que podrían enriquecer el interés y aprendizaje del lector. Para estos autores, los libros por lo general muestran el resultado final, donde no se expresan dudas y pareciera que la física se produce de manera continua, sin crisis ni discusión.

Sinarcas y Solbes (2013) y Savall et al. (2013) indican que en algunos textos de FC no se explica por qué se ha tenido que modificar los modelos científicos de un determinado fenómeno; falta análisis y profundidad epistemológica. Solbes et al. (1987) consideran que ciertos libros presentan los modelos clásicos como aquellos que no han satisfecho la explicación de un fenómeno, motivo por el que ha surgido el modelo cuántico, que se presenta como si no tuviese limitantes. Esto lleva al lector a entender que este modelo explica el fenómeno en todas sus dimensiones, una postura con orientación positivista.

Blanco (2008) y Savall (2015) indican que algunos libros de FC no le dan protagonismo al estudiante, se enfocan totalmente en los contenidos, y los temas abordados son poco contextualizados y con mínima profundidad. Blanco (2008) señala que en los libros de texto hay escasez de prácticas de laboratorio, falta variedad en las actividades complementarias distintas a las lecturas y escasean las actividades de evaluación. No obstante, los textos poseen bastantes imágenes lo que posibilita apoyos visuales para la comprensión. Fanaro (2009) señala que hay que tener cuidado con las imágenes en los libros, ya que a veces se refuerzan ideas inconvenientes, como la de presentar siempre algunos entes físicos como partículas.

## Propuestas de enseñanza conceptual de la FC

En este apartado se revisaron trabajos enfocados en enseñar a los estudiantes construcciones conceptuales de la FC.

Ayoub, García y Amador (2000); Bertozzi (2013); Budde, Niedderer, Scott y Leach (2002); Greca y Herscovitz (2002); Ostermann y Ricci (2004); Pantoja et al. (2013); Solbes y Sinarcas (2010); Okulik, Núñez, Aguado y Castro

(2002); Fernández, González y Solbes (2005); Hobson (2007); Ballesteros, Bejarano, Forero y Muñoz (2013); Castro (2014); Garrido et al. (2014); Elgue (2015); González (2015); Zamora (2015); Castrillón (2016); Escudero, Jaime y González (2016) y Valverde (2016) plantean propuestas didácticas que pretenden ser alternativas para disminuir las dificultades de enseñanza y aprendizaje de fenomenologías particulares de la FC, buscando la construcción y el afianzamiento de conceptos que, desde su perspectiva, son claves en el proceso educativo en FC. Las propuestas por lo general van encaminadas hacia la discusión y reflexión conceptual, algunas enriquecidas por el formalismo matemático, pero no con el enfoque operacional como eje central de la clase; los trabajos comúnmente plantean formas alternativas para abordar los conceptos, algunas proponen situaciones problémicas o preguntas que buscan cuestionar y motivar a los educandos, asimismo ciertas iniciativas van acompañadas por pre-test y pos-test.

A continuación se discriminan las propuestas didácticas que van encaminadas para el bachillerato y la universidad:

Ayoub et al. (2000); Greca y Herscovitz (2002); Okulik et al. (2002); Ostermann y Ricci (2004); Fernández et al. (2005); Hobson (2007); Bertozzi (2013); Pantoja et al. (2013) y Zamora (2015) presentan alternativas de enseñanza de la FC para estudiantes universitarios.

Budde et al. (2002), Ballesteros et al. (2013), Castro (2014); Elgue (2015); González (2015); Castrillón (2016) y Valverde (2016) presentan alternativas de enseñanza de la FC para estudiantes de bachillerato. A partir de los trabajos estudiados es interesante el número de propuestas didácticas de FC para los niveles de secundaria y media, a pesar de que en muchos contextos educativos la FC aún no se ha incluido en los currículos. Esto podría sugerir que aumenta la tendencia a abordar estos temas en estos niveles.

En la revisión documental se encontró que el tema más frecuente de las propuestas es el modelo atómico. Castrillón (2016); Castro (2014); Ballesteros et al. (2013); Budde et al. (2002) y Okulik et al. (2002) abordan los modelos atómicos con el objetivo principal de enseñar ideas asociadas al átomo cuántico. Es posible que las propuestas de enseñanza sobre los modelos atómicos, específicamente las del modelo cuántico del átomo, surjan y sean más frecuentes debido a que:

- Los modelos atómicos se encuentran incluidos dentro del currículo de las clases de física y química en los niveles educativos fundamentales.
- Comúnmente se explican los modelos clásicos del átomo, pero no el modelo cuántico, lo cual es un reto para los investigadores.
- Es necesario reforzar las concepciones cuánticas del átomo.
- Los modelos atómicos proporcionan explicaciones parciales a otras fenomenologías, razón por la cual es fundamental tener noción clara de estos modelos.



## Propuestas de enseñanza de la FC con énfasis en TIC

Enseguida se presentan las tendencias con relación a las propuestas de enseñanza de la FC con apoyo de TIC.

Taylor, Vokos, O'Meara y Thornber (1998); Müller y Wiesner (2002), Fernández, Morales y Ballesteros (2007); Muller (2008); Fanaro (2009); Fanaro, Otero y Moreira (2009); Otero, Fanaro y Arlego (2009); Fanaro y Otero (2011); Materán, Daboín, Reverol, Villarreal y Lobo (2013); López (2014) y Jaramillo (2015) plantean iniciativas apoyadas en TIC con el objetivo de enseñar temas asociados a la FC, implementando simulaciones, entornos virtuales y en general medios audiovisuales, como herramientas para intentar recrear y acercar los fenómenos a los estudiantes, a partir de estímulos visuales, auditivos e interactivos. Este proceso educativo con TIC siempre lo orienta el maestro, quien tiene planificadas las actividades para sus estudiantes; los autores de forma general indican que el estudio de la FC a través de las TIC es motivante para los educandos, gracias a la materialización de los fenómenos y a la interacción con ellos.

Muller (2008); Fanaro (2009); Fanaro et al. (2009); Otero et al. (2009); Fanaro y Otero (2011); Materán et al. (2013); López (2014) y Jaramillo (2015) plantean sus propuestas de enseñanza de la FC para el bachillerato. En muchos contextos no se ha vinculado la FC a los currículos de física en la secundaria o la media, sin embargo fue frecuente encontrar iniciativas de enseñanza con TIC para estos niveles.

Müller y Wiesner (2002); Fanaro (2009); Fanaro et al. (2009); Otero et al. (2009); Fanaro y Otero (2011) y Jaramillo (2015) proponen en sus trabajos el estudio del experimento de la doble rendija, que fue el tema más frecuente de la FC con apoyo de las TIC.

## Énfasis en prácticas experimentales para acercar la FC a los estudiantes

A continuación se analizan propuestas que pretenden enseñar a los estudiantes temas particulares de la FC a través del trabajo experimental.

Monroy (2012); Castrillón, Freire y Rodríguez (2014); Savall, Doménech y Martínez (2014); Elgue (2015); Fanaro, Elgue y Otero (2015); Faúndez, Rojas, Pinto y Astudillo (2015) y Fanaro, Elgue y Otero (2016) plantean propuestas de enseñanza de la FC con apoyo de prácticas de laboratorio, con las que se pretenden trabajar con los estudiantes en la identificación, argumentación y explicación de los fenómenos cuánticos. Esta experiencia se ve como punto de análisis y reflexión conceptual acerca de los fenómenos; las prácticas generalmente se orientan por situaciones problemáticas planeadas por el maestro, quien acompaña y apoya a los estudiantes en el proceso, en el que se procura aprovechar los montajes experimentales para estimular sensorialmente a los educandos. Estas prácticas habitualmente son poco sofisticadas en términos instrumentales, lo que permite que sean de fácil acceso en los entornos escolares.

Moreno y Guarín (2010); Monroy (2012); Castrillón et al. (2014); Savall et al. (2014); Elgue (2015); Fanaro et al. (2015;2016) y Faúndez et al. (2015) plantean en sus propuestas prácticas experimentales asociadas a la naturaleza de la luz, que fue el tema más frecuente abordado por este énfasis; entre los experimentos se encuentra el de doble rendija y la construcción de espectroscopios.

Moreno y Guarín (2010); Monroy (2012); Castrillón et al. (2014); Savall et al. (2014); Elgue (2015); Fanaro et al. (2015); Faúndez et al. (2015) y Fanaro et al. (2016) plantean propuestas de enseñanza de FC para estudiantes

de bachillerato con orientación en prácticas experimentales. A pesar de que en muchos contextos no se ha vinculado la FC al bachillerato, existe una tendencia a presentar iniciativas de enseñanza con enfoque experimental para este nivel.

Son pocos los documentos que se hallaron en esta subcategoría, en la cual la enseñanza de la FC se apoya en prácticas experimentales. A manera de hipótesis se considera que esto se debe a que los experimentos en este campo no son fáciles de preparar, ya que muchos requieren equipos especializados e infraestructuras que no todas las instituciones educativas poseen. No obstante, la destreza del maestro de física enfrenta esta dificultad haciendo posible algunas iniciativas en este enfoque.

## Reflexiones acerca de la enseñanza de la FC

A continuación se presentan algunas tendencias de la subcategoría Reflexiones acerca de la enseñanza de la FC.

Stefanel (1998); Fernandez et al. (2005); Savall (2015); Cuesta y Mosquera (2016); Tuzón y Solbes (2016); Martínez et al. (2016) manifiestan que la FC debe abordarse desde la secundaria. Stefanel (1998) y Tuzón y Solbes (2016) consideran que el incluir el estudio de la FC en la secundaria puede generar inquietud y motivación en los estudiantes. Sin embargo, en muchos de los currículos esta no se incluye o solo se hace tangencialmente. Villaveces (2000) expresa que el mundo no será el mismo después del artículo de Max Planck. Sin embargo, la física se sigue enseñando como en 1900; es una revolución que no ha llegado a los currículos ni a los salones de clase. Stefanel (1998) y Savall (2015), en referencia a la exclusión de la FC en los programas de física en el bachillerato, destacan que una limitante para la modificación y ampliación de los currículos en ciencias son las evaluaciones oficiales estandarizadas, ya que estas imponen temas específicos. Cabe señalar que por lo general las pruebas son referentes y a su vez propósitos en la mayoría de instituciones. Savall (2015) insinúa que las evaluaciones oficiales estandarizadas en ciencias refuerzan la enseñanza operativista, a lo cual no escapan las escasas preguntas con relación a la FC. Tuzón y Solbes (2014) indican que cuando se logra abordar en cursos de secundaria ciertos temas de la FC, se presentan los avances de la primera parte del siglo XX, pero no se trabaja lo que ha pasado en los últimos ochenta años. Esto se debe a la ausencia de la física contemporánea en los currículos, a la resistencia del maestro por abordar estos temas, posiblemente por su falta de formación y porque en los libros de texto poco se encuentra con respecto al tema.

Aubrecht (1989) considera que los libros de texto de física para estudiantes de ciencias e ingeniería continúan influenciando la organización de los procesos de enseñanza, textos que comúnmente no presentan mucho contenido en física contemporánea, razones por las que cree necesario actualizar los libros de texto incluyendo física del siglo XX, áreas de interés de la investigación actual

en este campo que han pasado prácticamente desapercibidas en la presente generación de libros de texto de física.

Savall et al. (2013) y Savall (2015) indican que algunos maestros no tienen claros ciertos conocimientos de la FC, poseen visiones inadecuadas de sus orígenes, tienen concepciones conceptuales erróneas y no conocen a fondo los modelos explicativos, razón por la cual enseñan de forma inadecuada. Posiblemente a ellos les sucedió lo mismo durante su formación, y es muy probable que un mal aprendizaje se deba a una incorrecta enseñanza.

Fernández et al. (2005) y Céspedes (2016) indican que los modelos científicos pueden representar una posible explicación de los fenómenos, así como saber de modelos permite reconocer sus limitaciones. Céspedes (2016) considera que el modelo es un eje fundamental en los procesos de enseñanza científica. Fernández et al. (2005) y Céspedes (2016) manifiestan que los modelos facilitan la consolidación de estructuras abstractas como las de la FC.

Greca y Moreira (2001); Ireson (2002) y Savall (2015) indican que los estudiantes por lo general presentan bajo o básico conocimiento acerca de la FC. Greca y Moreira (2001); señalan que los estudiantes se limitan a manejar el formalismo matemático pero realmente no comprenden a fondo la FC. Escudero et al. (2016) resaltan que a pesar de que los estudiantes hayan visto la misma clase de FC no han comprendido lo mismo. Ireson (2002) y Escudero et al. (2016) indican que no todos los estudiantes, aun después de ver la clase de Física Cuántica en la universidad, poseen pensamiento cuántico; por lo general un buen número de ellos persiste en el pensamiento mecanicista, y otros tienen serias confusiones entre lo cuántico y lo clásico. Savall (2015) manifiesta que los estudiantes

conservan concepciones erróneas de tipo histórico, sin reconocer el origen de la FC como una época de crisis, y sin identificar claramente los resultados experimentales que llevaron al cambio de paradigma.

Daboín (2015) resalta la importancia de las matemáticas en la enseñanza de la FC, sin que prevalezca este enfoque en la formación del pensamiento cuántico. Además el autor indica que para los estudiantes universitarios el formalismo matemático se convierte en un constructo de los hechos, ya que ellos conciben los entes físicos como entes mentales. De Ronde (2014) critica la forma de enseñanza netamente algorítmica e instrumentalista que se le ha dado a la FC, en la búsqueda de relaciones de poder político, militar y económico.

Céspedes (2014) manifiesta que la enseñanza de la FC debe ser un campo activo de investigación para los maestros de física. Akarsu (2011) invita a los maestros a investigar la comprensión de los estudiantes acerca de la FC, para así mismo mejorar herramientas como las TIC, las prácticas de laboratorios y los instrumentos de diagnóstico, con el fin de fortalecer su enseñanza.

## Aportes e implicaciones de la naturaleza de las ciencias (Ndc) en la enseñanza de la FC

McComas, Clough, y Almazroa (1998) indican que la Ndc es una intersección de los conocimientos abordados por la historia de la ciencia, la epistemología de la ciencia, la filosofía de la ciencia, la sociología de la ciencia y la psicología de la ciencia, elementos que potencialmente logran impactar la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia. A continuación se exponen algunas tendencias acerca de esta subcategoría.

Frechina (1996); Solbes y Sinarcas (2009); Talero (2009); Bautista (2012); Savall

et al. (2013); Domenech et al. (2013); Solbes (2014) y Cuesta y Mosquera (2016) sugieren abordar la enseñanza de la FC con apoyo de los estudios históricos, con el fin de que los estudiantes se contextualicen con respecto al surgimiento y desarrollo de este saber. Arévalo y Bautista (1996); Moreira y Massoni (2009); Bautista (2012); Domenech et al. (2013); Henriksen, Bungum, Angell, Tellefsen, Frågåt y Vetleseter (2014); Céspedes (2014) y Cuesta y Mosquera (2016) señalan la importancia de la epistemología en la enseñanza de la FC, ya que consideran que a partir de esta se pueden llevar procesos reflexivos de enseñanza acerca del porqué y cómo se desarrolla la FC. Frechina (1996); Bautista (2012); Henriksen et al. (2014); Solbes (2014) y Cuesta y Mosquera (2016) resaltan la importancia de la filosofía en la enseñanza de la FC, debido a que esta permite a los estudiantes reflexionar acerca de las interpretaciones e implicaciones de fondo de la FC.

Arévalo y Bautista (1996); Frechina (1996); Solbes y Sinarcas (2009); Moreira y Massoni (2009); Talero (2009); Bautista (2012); Savall et al. (2013); Domenech et al. (2013); Solbes (2014); Henriksen et al. (2014); Daboín (2015) y Cuesta y Mosquera (2016) dan importancia bien sea a la historia, a la epistemología o a la filosofía. Algunos autores privilegian dos de estas, y otros hasta las tres para la enseñanza de la FC, debido a que a través de estos saberes acerca de la ciencia, se puede enseñar una estructura humanizada de la FC. Esto podría permitir en los educandos una visión científica no lineal, ni acumulativa, ni necesariamente secuencial en cuanto a cómo se hace ciencia, en la cual se aborden sus dificultades, incertidumbres, desarrollo de nuevos planteamientos, controversias, errores, aceptación de la comunidad científica, consensos e implicaciones del surgimiento conceptual, hasta su refutación, donde aspectos como la imaginación, las motivaciones personales y el contexto del científico sean importantes; un entorno de aula donde se promuevan discusiones y reflexiones alrededor del conocimiento, buscando que los estudiantes cuestionen y quebranten la noción tradicional de ciencia determinista y su método, pretendiendo que adquieran mayor apropiación conceptual y reconociendo las interpretaciones e implicaciones de la FC para la sociedad.

### Algunas reflexiones en torno a las subcategorías emergentes

Hasta este momento, con base en lo evidenciado en las subcategorías emergentes, se puede inferir que la enseñanza de la FC presenta problemáticas principalmente asociadas a la falta de interpretación en las aulas de clases. En el periodo de tiempo estudiado se encontró que la enseñanza de la FC ha sido fuertemente influenciada por el enfoque operativista, reforzado a través de la enseñanza de una generación de profesores a otra. Este enfoque recae en la elaboración de la mayoría de libros de texto, se vuelve a caer en la visión algorítmica ausente de interpretación en la formación de casi todos aquellos que estudian este saber.

La enseñanza de la FC presenta problemáticas específicas diferentes de las de la enseñanza de otros contenidos propios de la física clásica. Cabe señalar

que la FC enmarca un cambio de paradigma en la física, y en general en la ciencia, al reconsiderar la noción de determinismo científico. La FC en su naturaleza es distinta a la física clásica, razón por la cual se considera que también lo debe ser su didáctica. No se pueden abordar de la misma manera todas las problemáticas de la FC como las de la física clásica, pues a pesar de tener problemáticas en común, existen concretas dificultades de la FC como las expuestas en párrafos anteriores que la hacen única para la investigación en el campo de la didáctica de las ciencias.

En los últimos treinta años han ido aumentando el número de propuestas de enseñanza de la FC desde diversos enfoques, alternativas importantes que señalan la preocupación de los profesores investigadores con respecto a la emergencia problemática de este tema. La NDC se postula como una opción importante en el proceso de enseñanza de la FC con un enfoque interpretativo, humanizado y reflexivo de las implicaciones de este saber. Cabe señalar que la NDC no es una fórmula determinante para la solución de todas las problemáticas de la enseñanza de la FC, pero según este estado del arte la NDC puede generar alcances favoreciendo reflexiones profundas en torno a este conocimiento.

## Conclusiones

A manera de conclusiones se exponen algunos hallazgos del estudio documental de la enseñanza de la FC entre 1986 y 2016.

- En el periodo estudiado se observa que año tras año ha aumentado la cantidad de publicaciones en enseñanza de la FC, lo que indica mayor interés por parte de los investigadores en este tipo de conocimiento.
- Del análisis documental en enseñanza de la FC emergieron por la naturaleza misma de los estudios las siguientes subcategorías: Dificultades de enseñanza de la FC, Libros de texto para la enseñanza de la FC, Enseñanza conceptual de la FC, Enseñanza de la FC con énfasis en TIC, Prácticas experimentales para acercar la FC a los estudiantes, Reflexiones acerca de la enseñanza de la FC, Implicaciones de la naturaleza de las ciencias (NDC) en la enseñanza de la FC.
- Existe un considerable número de propuestas de enseñanza de la FC para el bachillerato, a pesar de que en muchos contextos educativos esta no se ha incluido en los currículos.
- La ausencia de reflexión conceptual de la FC genera dificultades en el proceso de formación de los estudiantes, debido a que los fundamentos de este conocimiento por lo general son contrarios a la intuición de los educandos.
- Una de las dificultades en la enseñanza de la FC es que aún no existe una propuesta en común sobre cómo abordar los cursos introductorios, no se han acordado los contenidos, ni tampoco los enfoques interpretativos de los modelos científicos que intentan explicar algunas fenomenologías.
- El tema más frecuente que abordan las propuestas de enseñanza conceptual de la FC son los modelos atómicos.
- Entre las propuestas de enseñanza de la FC con orientación en TIC el experimento de doble rendija fue el tema más frecuente.

- En las propuestas con énfasis en prácticas experimentales de FC fue frecuente encontrar iniciativas de laboratorio asociadas a la luz, principalmente el experimento de doble rendija y la construcción de espectroscopios.
- Son escasas las propuestas con énfasis en prácticas experimentales de FC, no obstante aquellos trabajos se concentran más en el análisis conceptual que en el operacional.
- En ciertos textos de FC se destaca la ausencia de contextualización histórica acerca de las problemáticas científicas, las causas que originaron la crisis, el impacto social de la ciencia. Por lo general los libros muestran el resultado final como si no se hubiesen presentado problemáticas ni discusión.
- Haciendo referencia a la exclusión de la FC en los programas de física en el bachillerato, algunos autores destacan que una limitante para la modificación y la ampliación de los currículos en ciencias son las evaluaciones oficiales estandarizadas, ya que éstas imponen temas específicos.
- La NdC se postula como una alternativa para el mejoramiento de la enseñanza de la FC con carácter interpretativo-reflexivo.
- El estado del arte de la enseñanza de la FC hace manifiesta la emergencia por su investigación en el campo de la didáctica de las ciencias.

## Referencias

- Akarsu, B. (2010). Einstein's redundant triumph "quantum physics": An extensive study of teaching/learning quantum mechanics in college. *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 3(2), 273-285.
- Akarsu, B. (2011). Instructional designs in quantum physics: A critical review of research. *Asian Journal of Applied Sciences*, 4(2), 112-118.
- Arévalo, J. y Bautista, G. (1996). Sobre el análisis mecanicista en el surgimiento de la mecánica cuántica. *Física y Cultura: Cuadernos sobre Historia y Enseñanza de las Ciencias*, 1(3), 83-89.
- Aubrecht, G. (1989). Redesigning courses and textbooks for the twenty-first century. *American Journal of Physics*, 57(4), 352-359.
- Ayoub, M., García, A. y Amador, J. (2000). El láser como contexto para la enseñanza de la física cuántica en ingeniería. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 21(4), 52-56.
- Baily, C. y Finkelstein, N. (2010). Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 6(1), 1-11.

- Baily, C. y Finkelstein, N. (2014). Ontological flexibility and the learning of quantum mechanics. *1(physics.ed-ph)*, (1-11). *arXiv preprint arXiv:1409.8499*.
- Baily, C. y Finkelstein, N. (2015). Teaching quantum interpretations: Revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, *11*(2), 1-14.
- Ballesteros, A., Bejarano, A., Forero, T. y Muñoz, L. (2013). Estrategias y modelos para la enseñanza del concepto orbital atómico. En *IX Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias* (259-265). Girona, España.
- Bautista, G. (2012). Una recontextualización para la enseñanza de la mecánica cuántica. Reflexiones sobre el principio de superposición de estados. *Física y Cultura: Cuadernos sobre Historia y Enseñanza de las Ciencias*, *8*(1), 27-37.
- Bertozzi, E. (2013). What is what we call the 'quantum field'? Answering from a teaching perspective by taking the foundations into account. *European Journal of Physics*, *34*(3), 603-611.
- Blanco, M. (2008). La cuántica en los libros de texto de segundo curso de bachillerato. *Campo Abierto. Revista de Educación*, *27*(2), 49-72.
- Budde, M., Niedderer, H., Scott, P. y Leach, J. (2002). 'Electronium': A quantum atomic teaching model. *Physics Education*, *37*(3), 197-203.
- Castrillón, C. (2016). *Estrategia didáctica para la enseñanza del modelo mecánico cuántico del átomo, mediante la implementación de la unidad de producción de conocimiento (Udproco)* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Castrillón, J., Freire, O. y Rodríguez, B. (2014). Mecánica cuántica fundamental, una propuesta didáctica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, *36*(1), 1-12.
- Castro, A. (2014). *Diseño e implementación de una unidad didáctica para la enseñanza significativa de los modelos atómicos para estudiantes de grado décimo del colegio José María Vargas Vila* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Céspedes, Y. (2014). La producción de conocimiento: una reflexión en torno a la didáctica de la mecánica cuántica. En *III Conferencia Latinoamericana del International, History and Philosophy of Science Teaching Group IHPST* (393-411). Santiago de Chile, Chile.
- Céspedes, Y. (2016). Modelos y modelización como estrategia de producción de conocimiento en la enseñanza de la mecánica cuántica. En *III Congreso Internacional en temas y Problemas de Investigación en Educación, Sociedad, Ciencia y Tecnología*. Bogotá, Colombia.
- Cid, M. y Dasilva, A. (2011). Modelos atómicos: ¿Enseño contextualizado? *Boletim das ciências*, *24*(73), 1-23.
- Cid, M., R. y Dasilva, A. (2012). Estudiando cómo los modelos atómicos son introducidos en los libros de texto de Secundaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, *9*(3), 329-337.
- Cuesta, Y. y Mosquera, C. (2016). Algunas reflexiones en torno a las implicaciones de la NDC en educación en ciencias: el caso de la enseñanza de la mecánica cuántica. *Tecné, Episteme y Didaxis, TED*, número extraordinario, 867-873.

- Daboín, F. (2015). Interpretación de la función de onda de Schrödinger y la repercusión en su aprendizaje. *Revista de Enseñanza de la Física*, 27(2), 73.
- De Ronde, C. (2014). Colonialidad del saber/poder en la educación y el conocimiento científico-tecnológico en América Latina. El caso de la mecánica cuántica en la investigación y la formación universitaria. *Revista de Enseñanza de la Física*, 26(2), 355-363.
- Domenech, J., Savall, F. y Martínez, J. (2013). La introducción del concepto de fotón en bachillerato. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(2), 1-14.
- Elgue, M. (2015). *Enseñanza y aprendizaje de aspectos fundamentales de Física Cuántica en la escuela secundaria a partir del estudio de la luz* (tesis de doctorado). Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil, Argentina.
- Escudero, C., Jaime, E., y González, S. (2016). Hacia la conciencia cuántica a partir del efecto fotoeléctrico. *Enseñanza de las Ciencias*, 34(3), 183-200.
- Fanaro, M. (2009). *La enseñanza de la mecánica cuántica en la Escuela Media* (tesis de doctorado). Universidad de Burgos, Burgos, España.
- Fanaro, M., Otero, M. y Moreira, A. (2009). Teoremas- en-acto y conceptos-en acto en dos situaciones relativas a la noción de sistema cuántico. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 9(3), 1-19.
- Fanaro, M. y Otero, M. (2011). Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media: análisis de los aspectos afectivos de los estudiantes. *Revista de Investigación*, 35(73), 85-118.
- Fanaro, M., Elgue, M. y Otero, M. (2015). Diseño y análisis de situaciones potencialmente significativas para enseñar conceptos relativos a la luz desde el enfoque de Feynman para la mecánica cuántica. En V Encuentro Iberoamericano sobre Investigación en Enseñanza de las Ciencias. Burgos, España.
- Fanaro, M., Elgue, M. y Otero, M. (2016). Secuencia para enseñar conceptos acerca de la luz desde el enfoque de Feynman para la mecánica cuántica en la escuela secundaria: un análisis basado en la teoría de los campos conceptuales. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(2), 477-506.
- Faúndez, C., Rojas, Y., Pinto, A. y Astudillo, H. (2015). Taller de física cuántica: un método para introducir conceptos fundamentales en una actividad extracurricular. *Formación Universitaria*, 8(2), 53-62.
- Fernández, P., González, E. y Solbes, J. (2005). Evolución de las representaciones docentes en la física cuántica. *Enseñanza de las Ciencias*, número extra, 1-5.
- Fernández, J., Morales, R. y Ballesteros, J. (2007). Complementos pedagógicos para la enseñanza de la teoría cuántica en física y su adecuación a la metodología del Espacio europeo de Educación Superior. *Buenas Prácticas de Innovación Docente en la Universidad de Córdoba*, 1(1), 18-20.



- Frechina, J. (1996). El uso de los textos originales de los científicos y sus dificultades en el caso de la enseñanza de la mecánica cuántica. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 10(1), 93-100.
- Garrido, N., Arias, M. y Flores, M. (2014). Tendencias educativas en el marco del aprendizaje y enseñanza de conceptos fundamentales de física cuántica. *Omnia*, 20(3), 34-64.
- Gil, D., Senent, F. y Solbes, J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2(1), 16-21.
- Gil, D., Senent, F. y Solbes, J. (1987). La introducción a la física moderna: un ejemplo paradigmático de cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, número extra (1), 209-210.
- González, S. (2015). *La enseñanza de conceptos básicos de física cuántica para un aprendizaje significativo del modelo atómico actual* (tesis doctoral). Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil, Argentina.
- Greca, I. (2000). ¿Es posible hacer comprensible la mecánica cuántica? *Revista de Enseñanza de la Física*, 13(2), 13-19.
- Greca, I. y Moreira, M. (2001). Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. *Investigações em Ensino de Ciências*, 6(1), 29-56.
- Greca, I. y Herscovitz, V. (2002). Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(2), 327-338.
- Henriksen, E., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C., Frågåt, T. y Vetleseter, M. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), 678-684.
- Hobson, A. (1994). Teoría cuántica y educación concerniente. *Revista de Enseñanza de la Física*, 7(2), 48-50.
- Hobson, A. (2007). Teaching quantum physics without paradoxes. *The Physics Teacher*, 45(2), 96-99.
- Ireson, G. (2001). On the quantum thinking of physics undergraduates. En H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, M. Komorek, A. Kross y P. Reiska. (Ed.), *Research in science education-Past, present, and future* (pp. 83-88). Nueva York: Kluwe Academic Publishers.
- Jaramillo, J. (2015). *Implementación de una propuesta didáctica apoyada en el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para la enseñanza y el aprendizaje de la Mecánica Cuántica Fundamental (MCF) en el nivel medio en Colombia* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Johnston, I., Crawford, K. y Fletcher, P. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, 20(4), 427-446.
- Koopman, L., Kaper, H., y Ellermeijer, A. (2005). *Understanding student difficulties in first year quantum mechanics courses*. Ponencia presentada en The First European Physics Education Conference (EPEC-1) Conference (4-8). Bad Honnef, Alemania.
- Londoño, O., Maldonado, L. y Calderón, L. (2014). Guía para construir estados del arte. Recuperado de <http://repositorio.minedu.gov.pe/bitstream/handle/123456789/4637/Gu%C3%ADas%20para%20construir%20estados%20del%20arte.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- López, G. (2014). *Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media a partir del concepto de superposición* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Martínez, J., Savall, F., Doménech, J., Rey, A. y Rosa, S. (2016). La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio. Una propuesta fundamentada. *Revista de Enseñanza de la Física*, 28(2), 77-100.
- Materán, I., Daboín, F., Reverol, G., Villarreal, M. y Lobo, H. (2013). Webquest un recurso didáctico para el aprendizaje guiado. Caso: el efecto fotoeléctrico. *Revista Electrónica Quimer@*, 1(2), 103-106.
- McComas, W., Clough, M. y Almazroa, H. (1998). The role and character of the nature of science in science education. En W. McComas (ed.), *The nature of science in science education rationales and strategies* (pp. 3-39). Nueva York: Kluwer Academic Publishers.
- Monroy, R. (2012). *Diseño e implementación de una unidad didáctica para introducir conceptos de mecánica cuántica en estudiantes de bachillerato* (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México D. F., México.
- Monteiro, M. (2010). *Discursos de professores e de livros didáticos de física do nível médio em abordagens sobre o ensino da física moderna e contemporânea: algumas implicações educacionais* (tesis doctoral). Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Brasil.
- Moreira, M. y Greca, I. (2004). Obstáculos representacionales mentales en el aprendizaje de conceptos cuánticos. *Cambio conceptual, obstáculos representacionales, modelos mentales, esquemas de asimilación y campos conceptuales*. 1-16.
- Moreira, M. y Massoni, N. (2009). Física de partículas y visiones epistemológicas contemporáneas en la formación postgraduada de profesores de física. *Experiências em Ensino de Ciências*, 4(1), 57-64.
- Moreno y Guarín (2010). Nociones cuánticas en la escuela secundaria: Un estudio de caso. *Lat. Am. J. Phys. Educ*, 4(3), 669-676.
- Muller, D. (2008). *Designing effective multimedia for physics education* (tesis doctoral). University of Sydney, Sydney, Australia.
- Müller, R. y Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics*, 70(3), 200-209.
- Okulik, N., Núñez, M., Aguado, M. y Castro, E. (2002). Una experiencia de investigación en la enseñanza de la estructura atómica. *Journal of Science Education*, 3(1), 31.
- Ostermann, F. y Moreira, M. (2000). Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(3), 391-404.

- Ostermann, F. y Ricci, S. (2004). Construindo uma unidade didática conceitual sobre mecânica quântica: um estudo na formação de professores de física. *Ciência & Educação*, 10(2), 235-257.
- Otero, M., Fanaro, M. y Arlego, M. (2009). Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la Física en la Escuela Secundaria: Nociones Cuánticas. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 4(1), 58-74.
- Pantoja, G., Moreira, M. y Herscovitz, V. (2013). La enseñanza de conceptos fundamentales de mecánica cuántica a alumnos de graduación en física. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 9(1), 22-39.
- Savall, F. (2015). *L'ensenyament problematitzat de la física quàntica en batxillerat com a instrument de millora de l'aprenentatge* (tesis de doctorado). Universidad de Alicante, Alicante, España.
- Savall, F., Doménech, J. y Martínez, J. (2013). ¿Los profesores de Física y Química disponen de un modelo que explique la formación de los espectros atómicos? En *IX Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias* (3237-3242). Girona, España.
- Savall, F., Doménech, J. y Martínez, J. (2014). El espectroscopio cuantitativo como instrumento para la construcción y uso de modelos de emisión y absorción de radiación en física cuántica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(4), 1-8.
- Sinarcas, V., y Solbes, J. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, 31(3), 9-25.
- Solbes, J., Catalayud, M., Climent, J. y Navarro, J. (1987). Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos. *Enseñanza de las Ciencias*, 5(3), 189-195.
- Solbes, J., y Bernabeu, J., Navarro, J. y Vento, V. (1988). Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la física cuántica. *Revista Española de Física*, 2(1), 22-27.
- Solbes, J. y 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*, 23(1), 123-151.
- Solbes, J. y Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física*, 23(1 y 2), 57-84.
- Stannard, R. (1990). Modern physics for the young. *Physics Education*, 25(3), 133-145.
- Stefanel, A. (1998). Una experiencia en el marco de la introducción de la física cuántica en la escuela secundaria. *Revista de Enseñanza de la Física*, 11(2), 35-44.
- Swinbank, E. (1992). Particle Physics: a new course for schools and colleges. *Physics Education*, 27(2), 87-91.
- Talero, P. (2009). Didáctica de la mecánica cuántica: sistemas de dos estados. *XXXIII Congreso Nacional de Física* (164). Congreso llevado a cabo en Santa Marta, Colombia.
- Taylor, E., Vokos, S., O'Meara, J. y Thornber, N. (1998). Teaching Feynman's sum-over-paths quantum theory. *Computers in Physics*, 12(2), 190-199.
- Terrazzan, E. (1992). A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 9(3), 209-214.

- Terrazzan, E. (1994). *Perspectivas para a inserção de física moderna na escola média* (tesis doctoral). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Valverde, M. (2016). *Una propuesta didáctica de mejora sobre física cuántica* (tesis de maestría). Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- Vargas, G., y Calvo, G. (1987). Seis modelos alternativos de investigación documental para el desarrollo de la práctica universitaria en educación. *Educación Superior y Desarrollo*, 5(3), 7-37.
- Villaveces, J. (2000). La enseñanza de la física a los cien años de la mecánica cuántica. *Momento-Revista de Física*, 21, 1-6.
- Vizcaino, D. (2016). Significados de matematización en la enseñanza de la física presentes en libros didácticos de física universitaria. *Tecné, Episteme y Didaxis, TED*, número extraordinario, 908-914.
- Zamora, J. (2015). *Enseñanza de la mecánica cuántica a estudiantes del PCLQ* (tesis pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

### Para citar este artículo

- Cuesta, Y. (2018). Estado del arte: tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, 44, 147-166.